



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 11, nº 1 (2025)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID38262>

Revista
de Geociências do Nordeste
Northeast Geosciences Journal

ISBN 2447-3359

Produção do
LABORATÓRIO DE GEOPROCESSAMENTO
E GEOGRAFIA FÍSICA

UFRN LAGGER

Laboratório de
Geoprocessamento e Geografia Física

LAGGER

Dispersão da espécie invasora braquiária em um estuário tropical

Dispersal of the brachiaria invasive species in a tropical estuary

Danilo de Oliveira Sant'Ana¹; Cynara de Lourdes da Nobrega Cunha²; Aline Trog Ferreira³; Beatriz Silvestre Puchalski⁴

¹ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Ambiental, Curitiba/PR, Brasil.
Email: danilooliveira@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5097-6728>

² Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Ambiental, Curitiba/PR, Brasil.
Email: cynara@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0005-467X>

³ Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Ambiental, Curitiba/PR, Brasil.
Email: alinetrog@ufpr.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1882-0165>

⁴ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Ambiental, Florianópolis/SC, Brasil.
Email: beasilvestre.p@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6048-4620>

Resumo: O excesso de nutrientes em estuários favorece o crescimento de plantas aquáticas. Plantas invasoras, como a braquiária (*Urochloa arrecta*), aumentam a competição no meio, dificultando a sobrevivência de espécies nativas e causando desequilíbrio ecológico. Este trabalho examinou a propagação da braquiária no estuário do rio Guaraguaçu em dois cenários (chuvisco e seco), considerando variações de vazão e salinidade. O espalhamento da braquiária foi avaliado pela simulação de trajetórias de partículas inertes, usando um modelo Lagrangeano de transporte. Os resultados mostraram que no cenário chuvoso (menor salinidade) as partículas tendem a sair mais facilmente do domínio modelado. No cenário seco (maior salinidade), tendem a permanecer por mais de 30 dias. Esses resultados demonstram a dinâmica de fixação e adaptação dessa espécie.

Palavras-chave: Invasão biológica; Salinidade; Transporte Lagrangeano.

Abstract: Excess nutrients in estuaries favor the growth of aquatic plants. Invasive plants, such as brachiaria (*Urochloa arrecta*), increase competition, compromising native species survival and causing ecological imbalance. This study examined the spread of brachiaria in the Guaraguaçu River estuary in Paraná, Brazil, in two scenarios (rainy and dry), considering flow and salinity variations. The brachiaria spread was evaluated using a Lagrangian transport model to simulate inert particle trajectories. Results indicate that in the rainy scenario (lower salinity), particles tend to move more easily out of the modeled domain. In the dry scenario (higher salinity), they tend to remain for over 30 days. These findings show the dynamics of species fixation and adaptation.

Keywords: Biological invasion; Salinity; Lagrangian transport.

1. Introdução

O Estuário do Rio Guaraguaçu (ERG), um importante afluente do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), está localizado na região sul do Brasil, no estado do Paraná. Este estuário é crucial para a comunidade local, que depende das múltiplas utilidades do rio (SATO; ÂNGULO, 2023). A foz do rio está próxima ao Porto de Paranaguá, o maior terminal de exportação agrícola do Brasil, essencial para a atividade econômica da região.

Diversas espécies de plantas aquáticas são encontradas neste estuário, incluindo a *Urochloa arrecta* (Hack. ex T.Durand & Schinz) Morrone & Zuloaga, Bora (2019), também conhecida como braquiária. Essa espécie é uma gramínea aquática perene e nitrofilica, com longos ramos flutuantes que formam densos tapetes de folhas, raízes e caules (FERREIRA et al., 2016; FARES, NONATO; MICHELAN, 2020). Trata-se de uma planta altamente invasora, cuja presença desequilibra o ecossistema local para as espécies nativas. Além disso, prejudica a navegabilidade em algumas áreas do estuário.

As espécies invasoras são introduzidas, na maioria dos casos, por ações humanas que eliminam barreiras naturais e transportam espécies de forma accidental (TEIXEIRA, 2015). Em estuários, as espécies invasoras são geralmente competidoras, possuindo grande potencial para diminuir a diversidade das espécies nativas e até mesmo levá-las localmente à extinção (MICHELAN et al. 2010; CARNIOTTO et al. 2013). O crescimento acelerado de espécies invasoras pode causar danos no abastecimento público de água, nos usos associados ao lazer, a pesca, a navegação e a estética do ambiente (TEIXEIRA, 2015).

Para compreender a permanência e a sobrevivência de espécies em ambiente estuarinos, a hipótese da competição-estresse pode ser uma análise adequada (NUNES et al. 2018). A hipótese sugere que algumas espécies são excluídas de diferentes regiões do estuário devido a fatores específicos, como variação da salinidade e a inundação causada pela ação da maré no baixo estuário; por outro lado, nas regiões mais internas, a competição entre as espécies é um fator limitante para a sobrevivência (CRAIN et al. 2004 and ENGELS et al. 2010).

A variação da salinidade em ambientes estuarinos está diretamente relacionada a descarga fluvial e maré. Quando a descarga fluvial diminui, em períodos de seca, a intrusão salina tende a avançar, aumentando a salinidade da água no interior do estuário. Este fenômeno pode provocar alterações na fauna e flora local, afetando a sobrevivência de espécies sensíveis à salinidade. Para se avaliar qual o alcance e impacto do ingresso das águas salinas, pode-se utilizar a modelagem ambiental, que permite simular as concentrações de sal em um estuário, para diferentes vazões e períodos de maré.

Alguns trabalhos dedicados ao estudo dos efeitos da intrusão salina na fisiologia e ecologia podem ser encontrados na literatura: i) Bond-Lamberty et al. (2023) investigaram os efeitos da intrusão salina na fisiologia e ecologia em uma floresta decídua costeira do meio-Atlântico (EUA), documentando as mudanças na área foliar específica da árvore (SLA) em resposta à exposição à salinidade. Os resultados mostraram uma redução significativa da SLA em árvores expostas a ambientes mais salinos, corroborando com a hipótese de que a exposição crônica à salinidade altera a morfologia foliar das espécies arbóreas; ii) Wanga et al. (2020) verificaram a influência que a hidrodinâmica exerce nos processos ecológicos do sistema, observando o transporte e destino de blooms de fitoplâncton e nutrientes ao longo de gradientes de salinidade e turbidez no estuário St. Johns. Os resultados revelam padrões sazonais e longitudinais de fitoplâncton, oxigênio dissolvido e nutrientes no estuário. Também, observa-se declínios notáveis nas concentrações de fitoplâncton e oxigênio dissolvido na zona de transição de água doce para salgada.

As variações das concentrações de sal podem afetar as comunidades biológicas. Portanto, analisar esse fenômeno permite mensurar impactos sobre os ecossistemas costeiros e auxiliar no entendimento do comportamento da distribuição das espécies em ambientes de transição de água doce a salobra. Outros trabalhos que investigaram a relação entre os forçantes que atuam em sistemas costeiros e a extensão da intrusão salina foram desenvolvidos, Medeiros (2003), Silva et al. (2018), Sant'Ana (2023) e Lima (2016).

A modelagem ambiental de sistemas estuarinos surge como uma ferramenta fundamental para a compreensão dos diferentes mecanismos de transporte que agem dentro do estuário. Nesse sentido, uma análise integrada entre os processos físicos e químicos, é importante para a compreensão dos processos ecológicos (ELLIOT et al., 2011).

Semelhantemente a outras regiões costeiras, o estuário do rio Guaraguaçu também sofre com os impactos decorrentes de espécie da invasora, a braquiária, podendo alterar, assim, sua circulação e os processos de misturas que ocorrem na região. A hipótese principal a ser analisada neste trabalho é como o espalhamento das braquiárias ao longo do estuário do rio Guaraguaçu é influenciado pelo aporte fluvial e, consequentemente, com a variação da intrusão salina. Para tanto, são analisadas as concentrações de sal e o transporte de partículas como indicadores da presença das braquiárias, no estuário. Este estudo tem como objetivo responder às seguintes questões:

(1) As braquiárias presentes no estuário do Rio Guaraguaçu têm potencial para alcançar regiões externas além deste estuário?

(2) Como a braquiária se espalha no estuário do Rio Guaraguaçu sob diferentes cenários de fluxo do rio?

(3) As variações de salinidade influenciam o estabelecimento das braquiárias?

(4) Quais são as áreas estagnadas no estuário do Rio Guaraguaçu e como elas influenciam a disseminação das braquiárias?

1.1 Área de Estudo

A bacia do rio Guaraguaçu (Figura 1) possui uma área de 311,0 km², constituindo a quarta maior sub-bacia da Bacia Litorânea do Paraná. Sua rede de drenagem é composta por oito rios. Os rios da bacia são afluentes aos rios Guaraguaçu e Cambará, os maiores em extensão, funcionando como um corredor ecológico e servindo de base para o fluxo gênico e a saúde de diversas comunidades de animais e plantas (ELSTE, 2021).

O rio Guaraguaçu possui relevante papel para o abastecimento dos municípios de Pontal do Paraná e Matinhos, com cerca de 70,000 habitantes (<https://cidades.ibge.gov.br/censo>, 2022), servindo como manancial, corpo receptor e diluidor de efluentes destes municípios. Encontra-se na bacia a Estação Ecológica de Guaraguaçu, protegendo a área em torno do rio, permitindo a recuperação do ecossistema original, bem como da evolução natural das espécies da flora e da fauna que ocorrem na região. Por se tratar de uma bacia hidrográfica próxima da Serra da Prata, as declividades variam entre forte ondulado (20-45%), montanhoso (45-75%) e escarpado (acima de 75%); na região de planície, o relevo é suave, quase plano (<= a 3%) e suavemente ondulado (3-8%) (ELSTE, 2021). De acordo com a classificação climática de Köppen (1928), a área de estudo apresenta clima subtropical úmido (Cfa), caracterizado por verões longos, quentes e úmidos, com precipitação anual de 2.500 mm e umidade relativa média de 85% (ELSTE, 2021).

No Estuário do Rio Guaraguaçu (ERG), a temperatura da água apresenta variação sazonal, variando de 23º C a 30º C no verão, e entre 18º C e 25º C no inverno (ELSTE et al., 2021). A salinidade varia conforme as diferentes épocas do ano, em períodos mais chuvosos, como nos meses de dezembro a março, a salinidade pode apresentar valor máximo de 15.0 ups na confluência com o CEP, já em períodos mais secos, a salinidade pode variar entre 10.0 e 20.0 ups na embocadura do rio (SANT'ANA, 2023). Feltrin et al. (2011) mediram a salinidade no rio Guaraguaçu em 16 pontos no período de junho de 2005 a maio de 2006 e observaram que a salinidade decresceu conforme se adentra o rio, no verão. Estas variações da salinidade estão relacionadas diretamente ao aporte fluvial. No verão há um maior aporte fluvial fazendo com que a concentração de sal seja menor, já no inverno, considerando o menor aporte fluvial, a salinidade é maior nas regiões mais internas do rio.

Bora (2019) e Contente et al. (2011) analisaram a distribuição de salinidade no rio Guaraguaçu, relacionando-a com aspectos biológicos, como a assembleia de peixes e fatores abióticos indicando que as espécies estudadas dependem da concentração de sal na água.

Em relação a qualidade de água, Elste et al. (2019) investigaram os efeitos aportados pelo rio Pery, um afluente do rio Guaraguaçu, encontrando níveis de oxigênio dissolvido baixíssimos (0,56 mg/L) e altos níveis dos íons fosfatos (PO₄) e amônio (NH₄), demonstrando o descarte de efluentes sanitários de forma inadequada no rio Pery.

1.2 Espalhamento da Brachiaria

As braquiárias podem causar impactos que vão desde a supressão da vegetação nativa, redução da diversidade das comunidades aquáticas, entupimento de canais de hidrelétricas, até o entupimento de adutoras de coleta de água e bloqueio de canais (TEIXEIRA, 2015; FERREIRA et al. 2016; SATO et al. 2021; GALVANESE et al. 2022). A introdução e a dispersão dessa planta podem ocorrer de forma antrópica, quando utilizada em atividades pecuárias, como alimento para o rebanho, ou de forma natural, quando fragmentos da planta são carreados pelos corpos hídricos (FERREIRA et al. 2016; DIAMANTE et al. 2020). O crescimento acelerado de plantas aquáticas está relacionado à presença de nutrientes, em especial, o excesso de fósforo, nitrogênio e potássio (CUNHA; ROCHA, 2014), e pode afetar de forma negativa o comportamento natural de um corpo d'água.

Buscando verificar quais os macronutrientes exigidos em maior quantidade pela Braquiária, Bianco et al. (2015) conduziram experimentos de forma controlada em uma casa de vegetação, utilizando vasos com substrato de areia, irrigados diariamente com solução nutritiva completa. Os resultados obtidos apontam que os principais macronutrientes requerido pelas plantas foram o Potássio (K), em seguida Nitrogênio (N), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg), os menores requerimentos nutricionais foram Fósforo (P) e Enxofre (S).

Outro fator que pode ser considerado limitante para o crescimento da Braquiária é a salinidade. Em determinadas regiões do rio Guaraguaçu, a presença desta gramínea é desigual: bancos maiores se desenvolvem em baixa salinidade, enquanto bancos menores ocorrem em regiões de salinidade elevada (ARAÚJO; VITULE; PADIAL, 2021).

Em estudos realizados por Bora (2019), observar-se que, conforme aumentava-se os níveis de salinidade no rio Guaraguaçu, havia um decréscimo significativo no crescimento e na biomassa das braquiárias. Contudo, a sua sobrevivência pode ser adaptativa às condições de salinidade e a permanência dessa vegetação efetivamente ocorre em regiões onde os valores máximos de salinidade são 15,0 ups. Do ponto de vista ecológico, este fato pode ser explicado em razão da estratégia de sobrevivência dessa espécie. O estresse constante, neste caso causado pela salinidade, pode desenvolver a tolerância fisiológica das plantas, em virtude das respostas de aclimatação, ou seja, o seu alto crescimento como forma de reduzir a exposição a este estresse (POTT et al. 2011; BORA; THOMAS; PADIAL, 2020).

2. Metodologia

A definição da circulação hidrodinâmica é a etapa inicial em estudos de intrusão salina e de dispersão de substâncias, além de servir como base para pesquisas subsequentes. Considerando a extrema complexidade dos mecanismos de transporte em estuários e assumindo que o transporte de uma determinada substância em um corpo hídrico é dominado pela advecção, isso sugere uma dependência substancial entre a simulação hidrodinâmica e o processo de transporte.

Para o cálculo da hidrodinâmica e dos processos de transporte no estuário do Guaraguaçu, foi utilizado o Sistema Base Hidrodinâmico Ambiental da Bahia (SisBaHiA®). O SisBaHiA® utiliza o método de elementos finitos para discretização espacial e diferenças finitas para discretização temporal. As tensões turbulentas são parametrizadas conforme técnicas de filtragem baseadas em Large Eddy Simulation (LES).

Três modelos foram empregados neste estudo: o modelo hidrodinâmico, utilizado para resolver as equações de águas rasas, adotando a aproximação hidrostática para a distribuição de pressões e a aproximação de Boussinesq, na qual a densidade é considerada constante, exceto para os termos de flutuabilidade (ROSMAN, 2021); o modelo de transporte Euleriano, usado para analisar a intrusão salina; e o modelo Lagrangeano de dispersão de partículas, forçado com os campos de velocidade gerados pelo modelo hidrodinâmico, para simular as trajetórias das partículas. No presente estudo, a circulação hidrodinâmica no estuário do Rio Guaraguaçu não é detalhada, mas o leitor pode encontrar mais informações sobre esse tema em Sant'Ana (2023).

O modelo de transporte Euleriano utiliza uma abordagem para parâmetros conservativos, permitindo a análise da distribuição das concentrações de sal para diferentes descargas fluviais, a fim de obter a evolução temporal da intrusão salina em diferentes intervalos no domínio de estudo. Esse modelo de transporte utiliza a mesma malha espacial do modelo hidrodinâmico e permite a utilização de passos de tempo variáveis na análise. A vantagem da combinação dos dois modelos se dá na resolução dos campos de velocidade e coeficientes de turbulência, previamente calculados no modelo hidrodinâmico e diretamente aplicáveis no modelo de transporte (ROSMAN, 2021).

O modelo de transporte Lagrangeano é utilizado para determinar a dispersão da braquiária em diferentes cenários fluviométricos. Esse modelo permite a simulação do transporte de detritos flutuantes e da tendência de deriva de substâncias dissolvidas ou particuladas que flutuam em corpos d'água naturais. No modelo Lagrangeano, o banco de braquiária é representado por uma nuvem de inúmeras partículas, advectadas pelas correntes previamente calculadas no modelo hidrodinâmico. A principal questão é a obtenção das trajetórias dessas partículas nas diferentes regiões do estuário. A partir desse modelo, também é possível indicar as áreas de estagnação no ERG com base nos resultados do modelo de transporte Lagrangiano.

O modelo de transporte de partículas Lagrangeano possui duas condições de contorno. Quando uma partícula cruza um segmento de contorno aberto, ela deixa o domínio modelado e é removida. A segunda situação ocorre ao longo dos contornos de solo. Duas possibilidades podem ocorrer nesses contornos: absorção nula, quando a partícula atinge o contorno e retorna ao meio sem perda de massa; ou absorção parcial ou total, quando a partícula retorna ao meio com uma fração de sua massa (parcial ou totalmente) absorvida ao longo do contorno alcançado. A fração absorvida é definida pelo coeficiente de absorção estabelecido para os contornos de solo.

As variações de salinidade no estuário foram calculadas utilizando o modelo de transporte Euleriano. Esse modelo simula o transporte advectivo-difusivo de escalares dissolvidos na massa d'água para diferentes cenários fluviométricos, considerando que as descargas fluviais influenciam tanto a circulação hidrodinâmica quanto o transporte salino no estuário.

As vazões diárias foram obtidas com o modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), utilizado como condição de contorno para o modelo de circulação hidrodinâmica (SANT'ANA, 2023). O SWAT é um modelo

hidrológico semi-distribuído que permite o cálculo das vazões em diferentes locais da bacia de drenagem, possibilitando assim a criação de cenários com alterações de uso e ocupação do solo. Detalhes adicionais sobre o cálculo das vazões também podem ser encontrados em Sant'Ana (2023).

2.1 Sobre os dados usados nas simulações

A Figura 1 apresenta o domínio definido para a modelagem, com uma malha de elementos finitos quadráticos composta por 2.801 elementos finitos e 13.900 nós. Essa malha é utilizada para discretizar o domínio, localizar os principais rios e determinar o perfil longitudinal da elevação do fundo em relação ao nível médio do mar. O coeficiente de atrito é definido em termos do coeficiente de Chèzy, o qual depende da amplitude de rugosidade equivalente do fundo (ξ). No estuário do Guaraguaçu, predomina a presença de areia no canal principal, com ξ igual a 0,030 m.

Os rios mais extensos da bacia hidrográfica são o Guaraguaçu, com aproximadamente 43,0 km de extensão, seguido pelos rios Cambará e Pery, com 22,0 km e 17,5 km, respectivamente. A configuração hidrográfica revela que os rios Cambará e Guaraguaçu possuem maior número de afluentes. O Rio Cambará é afluente do Rio Guaraguaçu e o Rio Pery está localizado na região de confluência entre ambos. O Rio Pery é de grande importância para a região, apresentando os piores índices de qualidade da água (ELSTE et al., 2019), uma vez que é o principal receptor dos sistemas de drenagem urbana do município de Pontal do Paraná. Durante o verão, ocorre um elevado fluxo de turistas, por se tratar de uma região litorânea com diversos atrativos de lazer. Esse aumento populacional sazonal contribui para o desequilíbrio ambiental na área.

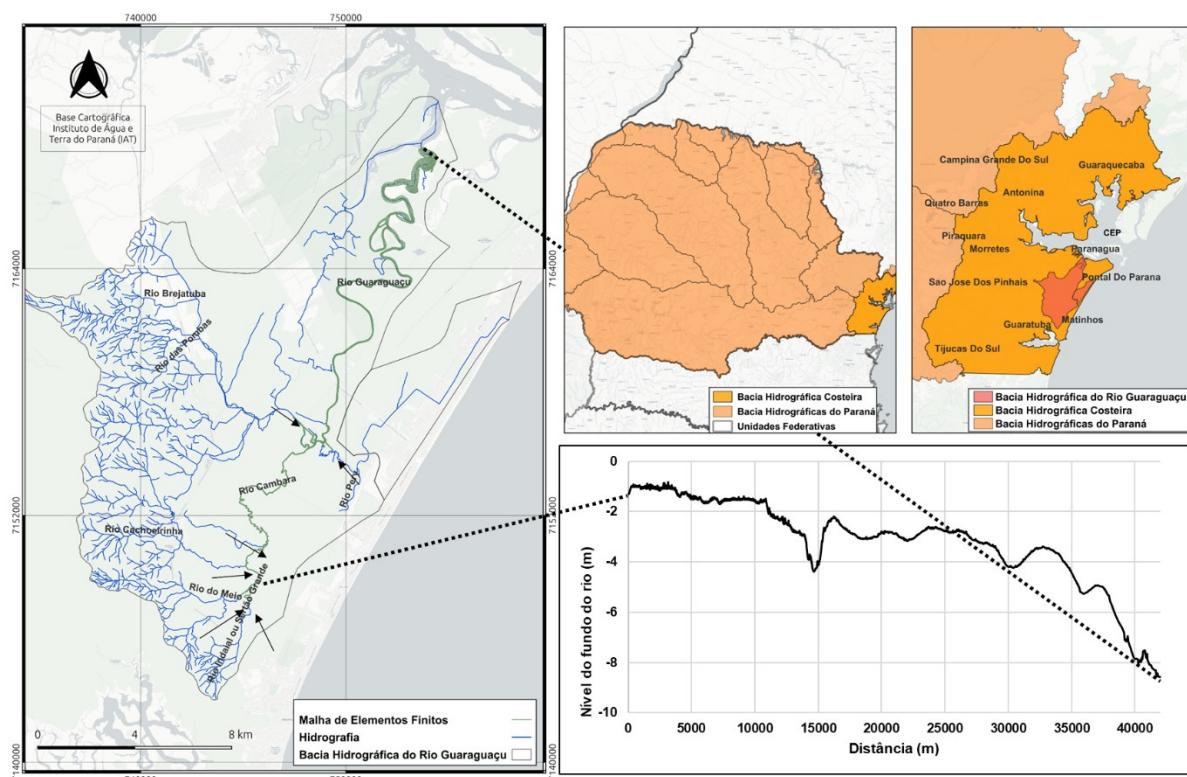


Figura 1 – Domínio de modelagem, afluentes, malha de elementos finitos e perfil longitudinal dos valores de cota de fundo em relação ao nível médio para o rio Guaraguaçu.

Fonte: Autores (2024).

Foram realizadas duas simulações para investigar a influência das diferentes vazões fluviais sobre a circulação e o transporte: a primeira, entre 01/02/2020 e 28/02/2020, com valores de vazão característicos da estação chuvosa; e a segunda, utilizando dados da estação seca, observados entre 01/07/2022 e 31/07/2022 (SANT'ANA, 2023). A Figura 2 apresenta as vazões consideradas em ambos os cenários sazonais. No cenário chuvoso, o maior valor de vazão ocorreu

em 08/02/2020, atingindo aproximadamente $60,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no Rio Guaraguaçu. Após o pico de vazão em 10/02/2020, verificou-se uma distribuição irregular das precipitações ao longo do período, com tendência de redução dos valores de vazão até o final da análise.

Por outro lado, no cenário seco, os maiores valores de vazão foram registrados no início da série, especialmente no Rio Guaraguaçu, onde atingiram $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$, seguido pelos rios Cambará e Pery. Esses valores foram consequência das chuvas ocorridas antes desse período. Somente em 17/07/2022 as precipitações voltaram a ocorrer, resultando em um aumento das vazões dos rios tributários, com valores próximos de $3,0 \text{ m}^3/\text{s}$ no Rio Guaraguaçu.

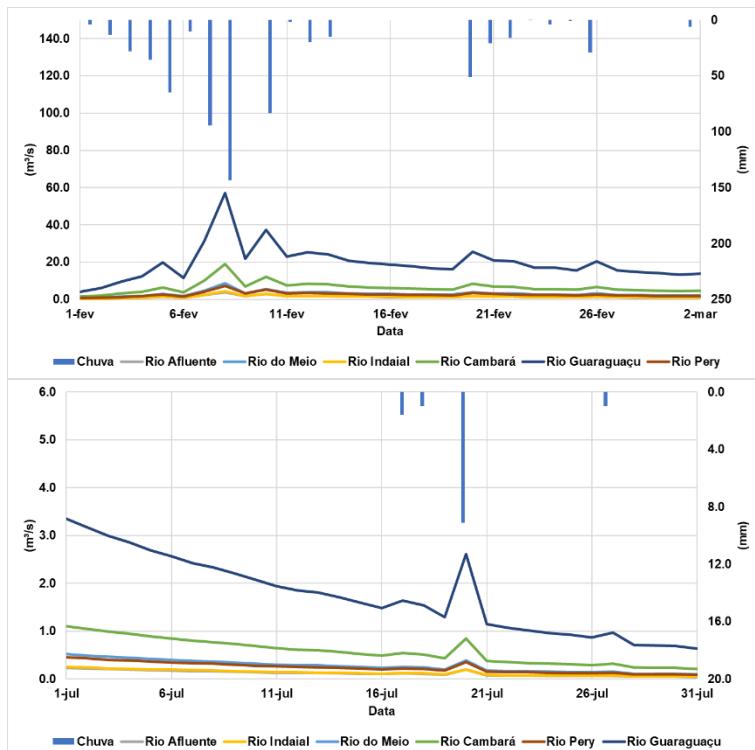


Figura 2 – Altura de chuva medida e valores diários de vazões nos rios pertencentes a bacia do rio Guaraguaçu para o cenário chuvoso (em cima) e seco (abaixo) obtidos pelo SWAT.

Fonte: Autores (2024).

A circulação hidrodinâmica do Estuário do Rio Guaraguaçu (ERG) é regida pelas marés, com regime de marés semidiurnas e amplitude máxima de 2,0 m. Na simulação da circulação hidrodinâmica, é necessário o estabelecimento de condições de contornos para o campo de velocidades e para a elevação da superfície livre. A imposição da elevação da superfície livre é prescrita ao longo dos contornos abertos, que representam os limites do domínio, a entrada do estuário. A imposição de fluxos (vazões) é usualmente associada a contornos terrestres, que são os rios ou canais que estão incluídos no domínio de modelagem. O intervalo de tempo utilizado na simulação da circulação hidrodinâmica foi igual a 5,0 segundos, o que corresponde a um número médio de Courant de 8,0. O modelo para o estuário do Guaraguaçu teve um período de aquecimento de dois ciclos de maré, para minimizar qualquer influência das condições iniciais.

O espalhamento das braquiárias foi avaliado a partir da distribuição espacial das partículas para os diferentes períodos, usando modelo Lagrangeano de transporte do SisBaHiA®. Foram selecionados dois bancos de braquiárias para análise da evolução temporal: o primeiro localizado na região de dominância de água doce, chamado de banco 1, e o segundo banco, no início da região estuarina (banco 2). A Figura 3 apresenta a localização dos bancos de braquiárias selecionados para os anos de 2009, 2019, 2021 e 2022. Em 2009 os bancos tinham proporções menores quando comparados com o ano de 2022. O banco 1 foi utilizado como a região fonte; o espalhamento das braquiárias foi simulado durante 30 dias. A Figura 4 mostra a posição inicial das partículas no banco 1. Foram liberadas 1024 partículas, distribuídas em uma grade de 1,0 x 1,0 metro.

A modelagem do transporte de sal no ERG foi desenvolvida para os mesmos períodos da circulação hidrodinâmica. Os valores de salinidade foram prescritos ao longo do contorno aberto e nos casos de entrada de fluxo. No cenário seco, os valores de salinidade variaram entre 15,0 e 21,0 ups em diferentes intervalos de tempo das marés de sizígia e quadratura, acompanhando as oscilações da elevação da superfície livre. No cenário de estação chuvosa, a salinidade estava próxima de 16,0 ups no início do período, diminuindo gradualmente nas etapas seguintes. Durante o período de sizígia, os valores oscilaram entre 13,0 e 7,0 ups, com aumento da amplitude das oscilações (SANT'ANA, 2023). A Figura 5 apresenta os valores de concentração salina utilizados como condição de contorno (Estação A). Nos rios, a salinidade foi considerada nula.

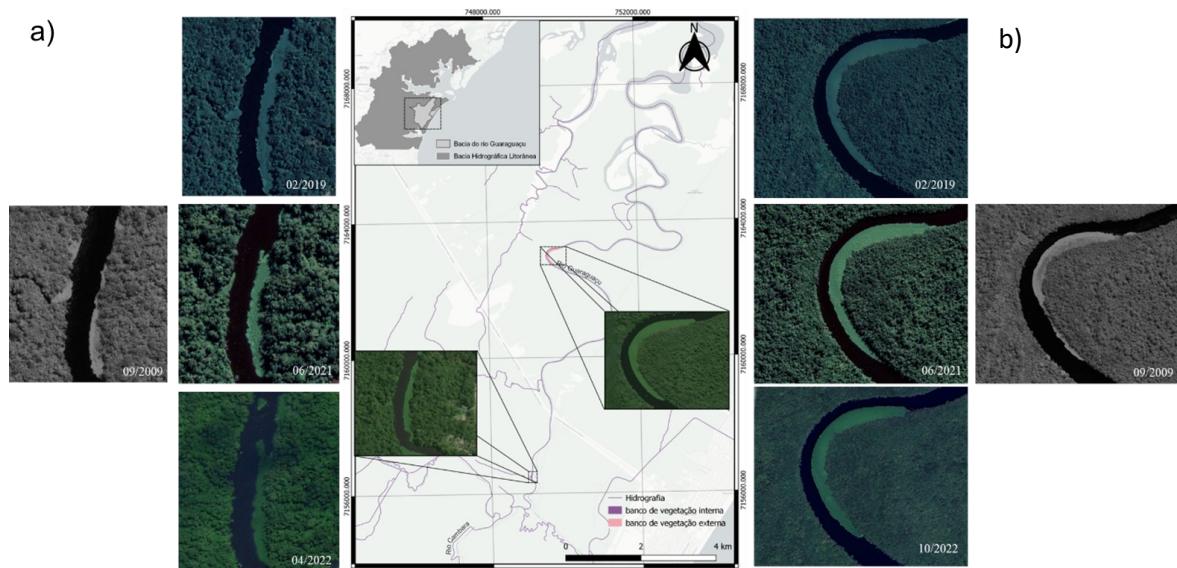


Figura 3 – Localização dos bancos de braquiárias selecionados para o estudo em diferentes anos (2009, 2019, 2021 e 2023) (a) banco 1, na região de dominância de água doce; (b) banco 2, início da região estuarina.

Fonte: Autores (2024).

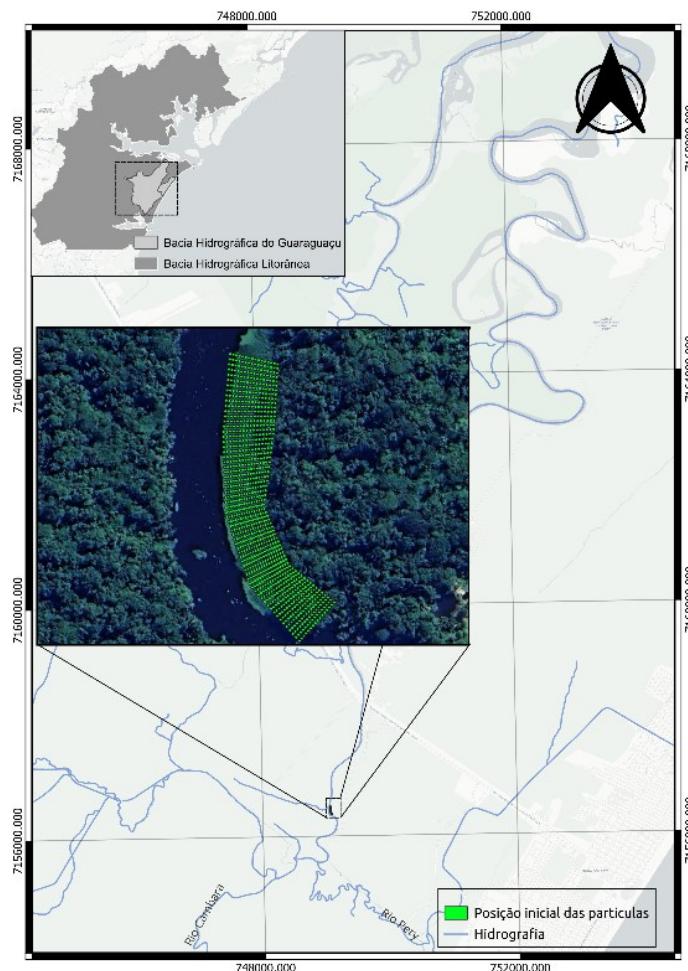


Figura 4 – Localização do banco de braquiárias selecionado na simulação e a posição inicial das partículas na modelagem de transporte lagrangeano.

Fonte: Autores (2024).

3. Resultados

Os resultados da concentração de sal são mostrados em quatro estações (Figura 5), representando zonas distintas do estuário: a zona de maré do rio (ZR), com baixa salinidade, estação D; área intermediária onde há grande mistura de águas fluviais e marinhas, estação C; a região do baixo estuário onde há grande influência marinha, estação B; e a estação A próximo à embocadura do estuário, sem influência do aporte fluvial e sob forte influência do CEP.

Os resultados obtidos mostram que o sal se desloca facilmente nos canais e como as variações na vazão do rio afetam a sua distribuição no estuário. A Figura 5 ilustra as variações da concentração de sal nos dois períodos simulados. No período seco, com vazão fluvial reduzida, percebe-se que a salinidade oscila com as marés, com as estações A, B e C apresentando um comportamento semelhante. Na estação A, os valores de salinidade ficam em torno de 20.0 ups. Na estação D, os valores de salinidade são nulos até 25/07/2022, quando ocorre uma leve oscilação da salinidade; em 30/07/2022, os valores de salinidade aumentam, ultrapassando os limites de 0.5 ups, tornando o ambiente salobro. No período chuvoso, a salinidade diminui, chegando a zero nas estações B, C e D, aproximando-se da condição de contorno imposta pelos rios. No final da estação chuvosa, a salinidade aumenta quando as vazões diminuem, com um rápido aumento na região da estação B. Nas duas estações, a zona de maré do rio (estação D) apresenta salinidade significativamente baixa, causada pela entrada de água doce dos rios.

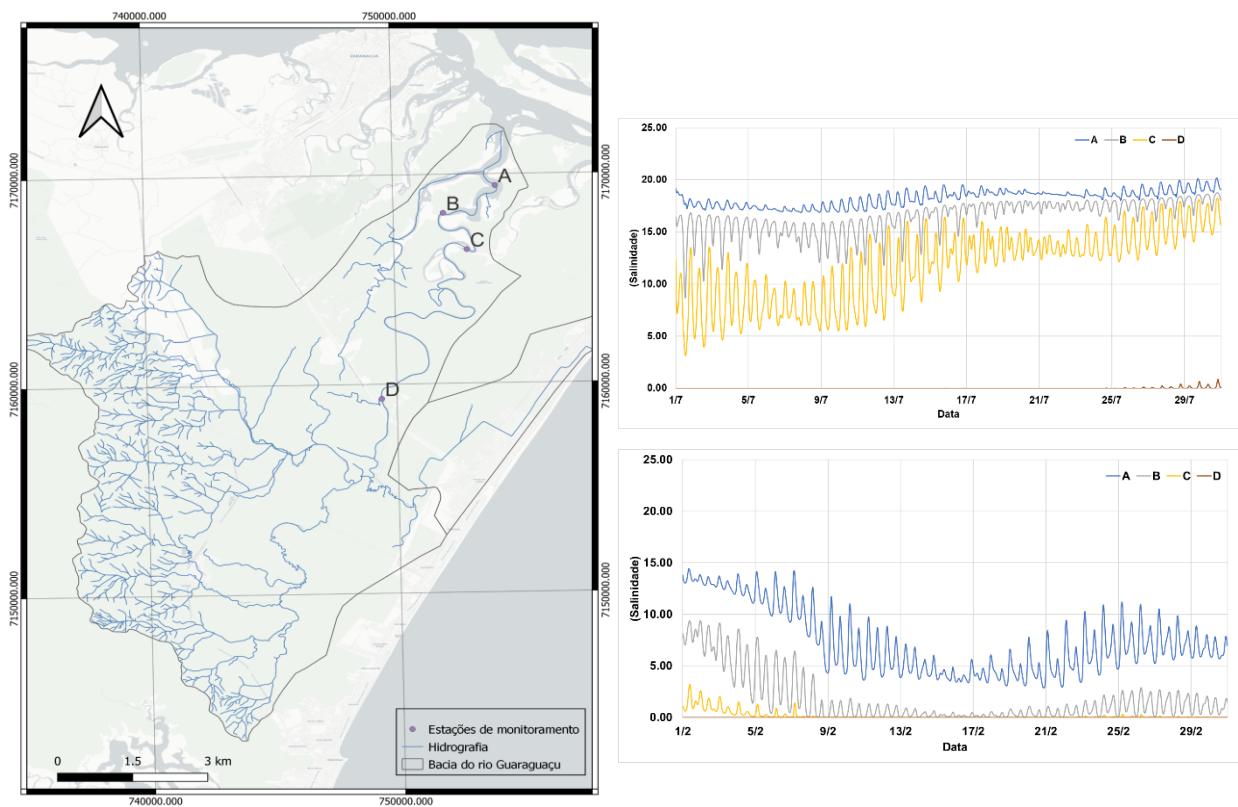


Figura 5 – Localização das estações A (fronteira aberta), B, C e D onde foram obtidos os valores da concentração de sal (ups) obtidos numericamente pelo SisBAHIA® para os períodos seco (superior) e chuvoso (inferior).

Fonte: Autores (2024).

Um dos resultados possíveis de serem extraídos do modelo é o mapa de isolinhas de ocorrência de salinidade acima 15.0 ups (Figura 6). No cenário chuvoso, o rio Guaraguaçu possui salinidade menor que 15.0 ups em praticamente todo domínio durante a simulação; na região da embocadura, com todo o domínio com valores abaixo que 10%. Por outro lado, no cenário seco os valores de salinidade maiores que 15.0 ups se estendem por aproximadamente 8,0 km a partir da embocadura, indicando que durante o período de estiagem, a área com níveis de salinidade acima de 15.0 ups é maior, com variações até a região intermediária.

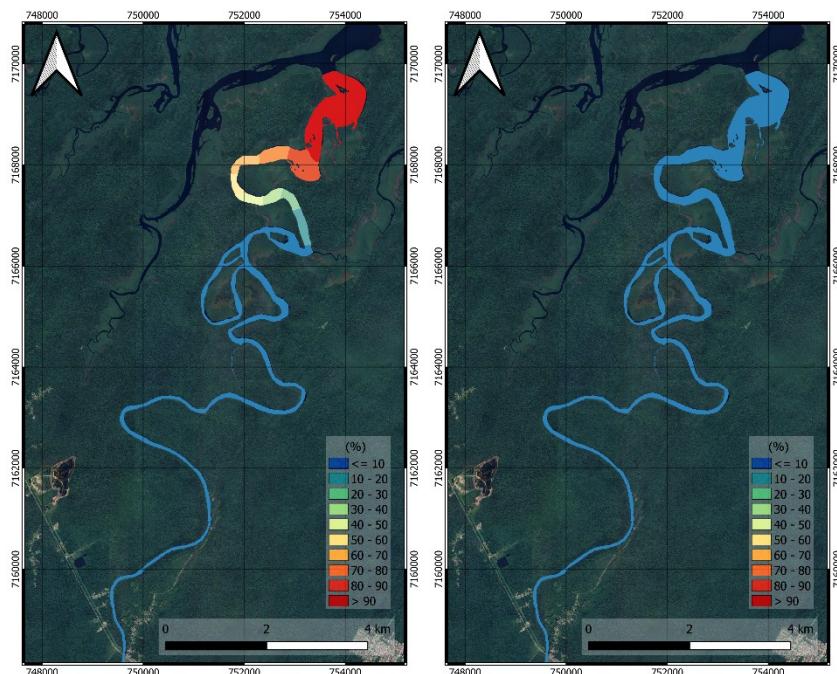


Figura 6 – Mapa de isolinhas de ocorrência de salinidade acima de 15,0 ups após 30 dias no período seco (esquerda) e chuvoso (direita).

Fonte: Autores (2024).

Os resultados do espalhamento das braquiárias são apresentados na Figura 7, para 2, 16 e 30 dias após o início da simulação para o período seco, considerando a situação em que as partículas são refletidas quando atingem as margens. Observa-se que as partículas permanecem no interior do rio Guaraguaçu, não conseguindo alcançar a embocadura do estuário, mesmo depois de 30 dias. Se as partículas forem totalmente absorvidas quando atingem as margens (Figura 7), é possível observar que rapidamente (próximo de um dia após o início da simulação) ficaram retidas nas partes mais sinuosas do rio, não atingindo a região estuarina. Nas duas simulações, as partículas migram na direção da embocadura, mostrando assim a dinâmica do espalhamento das braquiárias.

Os resultados obtidos para o período chuvoso (Figura 8) mostram que, quando as partículas são refletidas quando atingem as margens, atingem a região estuarina após 8 dias. As partículas saem por completo do domínio após 25 dias do início da simulação. Portanto, quando o aporte fluvial é maior, as braquiárias podem migrar para o Complexo Estuarino de Paranaguá. Quando se considera absorção total (Figura 8), os resultados demonstram também a fixação das braquiárias na região sinuosa do rio Guaraguaçu. Este fato possivelmente está relacionado às maiores velocidades no rio Guaraguaçu no período chuvoso que causam uma dispersão maior das partículas.

3.1 Discussão

Os resultados obtidos demonstram que a principal forçante da hidrodinâmica no estuário do rio Guaraguaçu é o aporte fluvial. Os canais estreitos do rio amortecem a onda de maré, conferindo papel secundário a este forçante na hidrodinâmica do estuário. As simulações demonstram que as substâncias dissolvidas, representadas por partículas inertes, tendem a se deslocar em direção à embocadura do rio com maior facilidade durante o período chuvoso, podendo sair do estuário em direção ao Complexo Estuarino de Paranaguá. No período seco, as partículas permanecem dentro do estuário durante todo o período, indicando uma maior probabilidade de fixação nas regiões mais internas do rio Guaraguaçu.

Considerando a capacidade de absorção das margens, torna-se possível concluir como as braquiárias se comportam para diferentes níveis de absorção. Para uma fronteira com absorção total, que representa a situação mais próxima da realidade, levando em consideração as características das margens do rio Guaraguaçu, foi possível observar a fixação nas regiões mais sinuosas do rio, corroborando com a paisagem descrita em Bora, Thomas, Padial (2020).

A salinidade tem um papel fundamental na sobrevivência das braquiárias. De acordo com os resultados de Bora (2019), a salinidade inferior a 15.0 ups favorece a permanência das braquiárias em regiões. Os resultados mostram que para o período chuvoso, o rio Guaraguaçu possui salinidade menor que 15.0 ups em praticamente toda a sua extensão; na região da embocadura, em apenas em 5% do tempo de simulação fica acima de 15.0 ups. Por outro lado, no período seco aproximadamente 8.0 km a partir da embocadura os valores de salinidade são maiores que 15.0 ups.

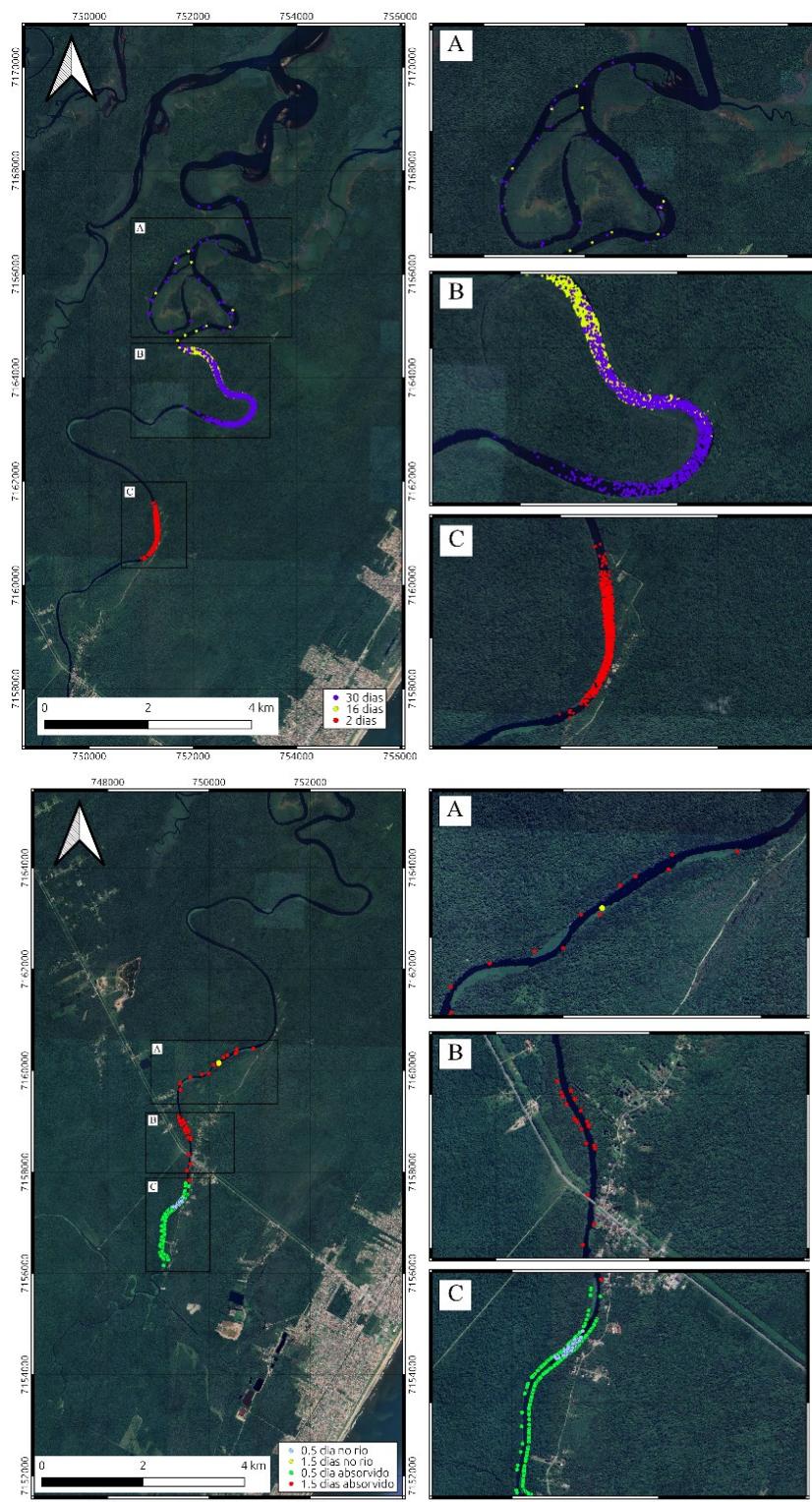


Figura 7 – Distribuição das partículas após 2, 16 e 30 dias na estação seca com absorção nula (acima) e após 0,5 e 1,5 dias na estação seca com absorção total (abaixo).

Fonte: Autores (2024).

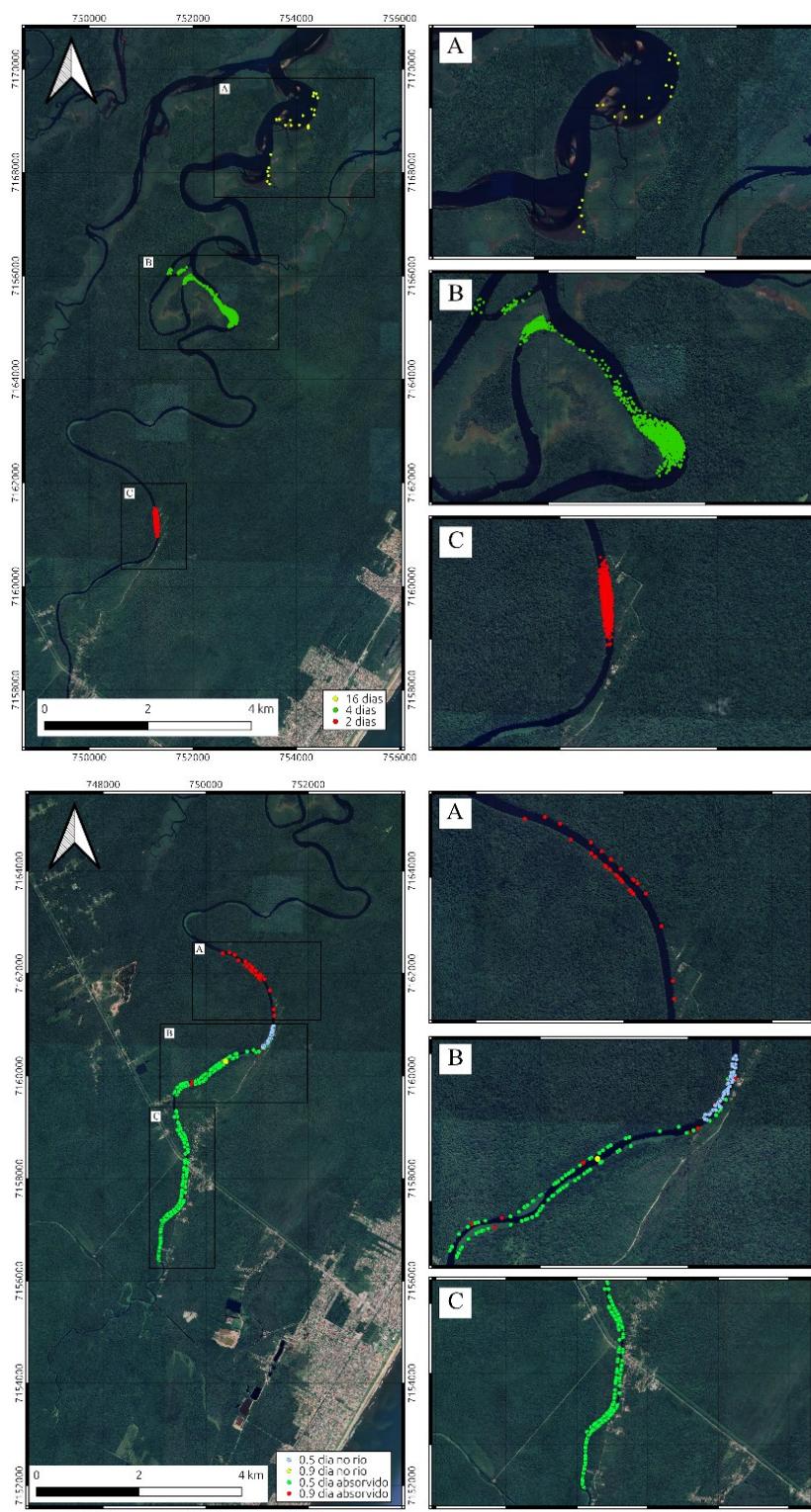


Figura 8 – Distribuição das partículas após 2, 4 e 16 dias na estação chuvosa com absorção nula (acima) e após 0,5 e 1,5 dias na estação chuvosa com absorção total (abaixo).

Fonte: Autores (2024).

No período seco, mesmo com valores de salinidade mais altos, a permanência das braquiárias é possível, considerando que a fixação nas margens é favorecida. Em contrapartida, durante o período chuvoso, a probabilidade das braquiárias saírem do estuário é maior, mas a baixa salinidade pode facilitar a sua fixação. Isso possibilita uma adaptação dessa espécie aos períodos de estiagem, onde as condições de salinidade mais elevadas nas regiões internas do rio não impedem sua permanência, enquanto a época chuvosa pode promover seu deslocamento para áreas mais afastadas. Conclui-se que no período chuvoso as braquiárias espalham-se no rio Guaraguaçu, atingindo a embocadura e a sua fixação será facilitada pela baixa salinidade.

Em relação às áreas possíveis de estagnação do estuário, que poderiam facilitar a fixação das braquiárias, os resultados mostram que as braquiárias tendem a fixar na região mais sinuosa do rio, quando as velocidades são menores. Em períodos de altas vazões, parte das braquiárias também ficam retidas na região das curvas do rio e parte saem do estuário.

Vale destacar que as braquiárias precisam de nutrientes para garantir a sua manutenção e reprodução. Certamente uma redução na carga de nutrientes que chegam ao sistema, principalmente pelo rio Pery, seria uma medida preventiva de controle da expansão das braquiárias no rio Guaraguaçu. Outras medidas corretivas, como a remoção mecânica ou lançamento de herbicidas são menos eficientes e particularmente impactantes, pois se trata de uma área de preservação ambiental e o uso de herbicidas pode ser prejudicial para a saúde do ecossistema e das comunidades ribeirinhas.

4. Conclusão

Em ambientes estuarinos, a concentração de salinidade limita a propagação e dispersão da braquiária, enquanto seu crescimento é acelerado quando há abundância de nutrientes. A vazão do rio e a capacidade de fixação da espécie influenciam esses parâmetros. Este estudo demonstra que a propagação e dispersão da braquiária variam sob diferentes cenários de aporte hídrico (seca e chuva) e de fixação (absorção total e nula).

Os resultados mostram que as partículas usadas para descrever a braquiária se deslocam mais facilmente para a foz do rio durante a estação chuvosa e, portanto, têm potencial para alcançar áreas fora do estuário. Em contraste, as partículas permanecem dentro do estuário durante a estação seca, indicando uma alta probabilidade de fixação nas regiões internas. Isso destaca como a braquiária se espalha no estuário do rio Guaraguaçu sob diferentes cenários fluviométricos.

Este trabalho também revela que variações nos níveis de salinidade influenciam sua fixação. Na estação chuvosa, na foz do estuário, a salinidade é baixa, com valores abaixo de 15,0 ups, e a braquiária pode alcançar a região, o que provavelmente favorece sua fixação nesse período. Durante a estação seca, a salinidade aumenta na foz do rio, o que pode impedir a sobrevivência da braquiária na área. No entanto, a espécie pode ter se adaptado a condições de alta salinidade.

Em relação às áreas de estagnação no estuário do rio Guaraguaçu e sua influência, desde a dispersão da braquiária até sua fixação, observa-se que, com absorção nula, as partículas permanecem dentro do estuário durante a estação seca. Em contraste, durante a estação chuvosa, as partículas rapidamente alcançam a foz do rio e deixam completamente o domínio após 25 dias, podendo alcançar o Complexo Estuarino de Paranaguá. Com absorção total, as partículas tendem a se fixar nas margens do rio em ambos os períodos, permanecendo estagnadas nas regiões mais sinuosas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro de Assessoria de Publicação Acadêmica (CAPA – <http://www.capa.ufpr.br>) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela assistência na tradução para o inglês e na edição de desenvolvimento.

Referências

- ARAÚJO, E. S.; VITULE, J. R. S.; PADIAL, A. A. A Checklist of Aquatic Macrophytes of the Guaraguaçu River Basin Reveals a Target for Conservation in the Atlantic Rainforest. *Acta Scientiarum - Biological Sciences*, v. 43, p. e50542–e50542, 19 abr. 2021.
- BIANCO, S.; CARVALHO, L. B.; BIANCO, M. S.; YAMAUCHI, A. K. F. Crescimento e nutrição mineral de *Urochloa arrecta*. *Planta Daninha*, v. 33, p. 33-40, 2015.

- BOND-LAMBERTY, B; HADDOCK, L., M.; PENNINGTON, S., C.; SEZEN, U. U; SHUE, J.; MEGONIGAL, J. P. Salinity exposure affects lower-canopy specific leaf area of upland trees in a coastal deciduous forest. *Forest Ecology and Management*, v. 548, 121404, 2023.
- BORA, L. Diferentes populações de uma Poaceae invasora respondem de uma maneira distinta ao aumento da salinidade. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2019.
- BORA, L. S.; THOMAS, S. M.; PADIAL, A. A. Evidence of rapid evolution of an invasive poaceae in response to salinity. *Aquatic Sciences*, v. 4, p. 82-76, 2020.
- CARNIATTO, N.; THOMAZ, S.M.; CUNHA, E.R.; FUGU, R.; OTA, R. R. Effects of an Invasive Alien Poaceae on Aquatic Macrophytes and Fish Communities in a Neotropical Reservoir. *Biotropica*, v. 45, p. 747–754, 2013.
- CRAIN, C. M., B. R. SILLIMAN, S. L. BERTNESS & M. D. BERTNESS, 2004. Physical and biotic drivers of plant distribution across estuarine salinity gradients. *Ecology* 85: 2539–2549.
- CONTENTE, R.F., STEFANONI, M.F. & SPACH, H.L. Fish assemblage structure in an estuary of the Atlantic Forest biodiversity hotspot (southern Brazil). *Ichthyol Res* 58, 38–50 (2011).
- CUNHA, E. J. N. S.; ROCHA, J. R. C. Avaliação da concentração do íon fosfato em recursos hídricos de algumas cidades do litoral paranaense. *Periódico Tchê Química*, v. 12, p.34-38, 2014.
- DIAMANTE, N.; FABRIN, T. M.; SILVEIRA, M. J.; OLIVEIRA, A. V.; THOMAZ, S. M.; PRIOLI, S. M. A. P.; PRIOLI, A. J. Molecular Analysis of the Invasive Populations of *Urochloa* (Poaceae) in a Large Neotropical Reservoir. *Aquatic Botany*, v. 161, p. 103183, 2020.
- ELLIOTT, M.; WHITFIELD, A. K. Challenging paradigms in estuarine ecology and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 94, n. 4, p. 306–314, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.06.016>.
- Elste, G. A. S. (2021). Estudo fisiográfico e limnológico da bacia hidrográfica do rio Guaraguaçu, Litoral do Paraná (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Paraná, Setor Litoral.
- ELSTE, G. A. S.; ZANLOURENCI, G. A.; LAUTERT, L. F. C.; NAZÁRIO, M. G. A contaminação do rio Guaraguaçu Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento Territorial Sustentável, Universidade Federal do Paraná, Matinhos, 2021.
- ENGELS, J. G. & K. JENSEN, 2010. Role of biotic interactions and physical factors in determining the distribution of marsh species along an estuarine salinity gradient. *Oikos* 119: 679–685 ano/
- FARES, A. L. B.; NONATO, A. S.; MICHELAN, T. S. New records of the invasive macrophyte, *Urochloa arrecta* extend its range to eastern Brazilian Amazon altered freshwater ecosystems. *Acta Amazonica*, v. 50, p. 133-137, 2020.
- FELTRIN, R.; MARINA, C.; STEFANONI, F.; SPACH, H. L. Fish assemblage structure in an estuary of the Atlantic Forest biodiversity hotspot (southern Brazil). *Ictiol Res*, v. 58, p. 38–50, 2011.
- FERREIRA, F. A.; POTT, A.; POTT, V. J.; LATINI, R. O.; RESENDE, D. C. Macrófitas aquáticas. In: LATINI, A. O.; RESENDE, D. C.; POMBO, V. B.; CORADIN, L. (eds.) *Espécies exóticas invasoras de águas continentais no Brasil*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2016. p. 657-726.
- GALVANESE, E. F.; COSTA, A. P. L; ARAÚJO, E. S.; FALKIEVICZ, B. C.; MELO, G. G. V.; VITULE, J. R. S.; PADIAL, A. A. Community Stability and Seasonal Biotic Homogenisation Emphasize the Effect of the Invasive Tropical Tanner Grass on Macrophytes from a Highly Dynamic Neotropical Tidal River. *Aquatic Sciences*, v. 84, n. 2, p. 30, 5 abr. 2022.

- LIMA, L. S. Acoplamento de modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para prognóstico ambiental detalhado de longo prazo. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica (COPPE). Rio de Janeiro. 2016.
- MEDEIROS, A. D. A influência da batimetria no posicionamento da intrusão salina em estuários do rio itajaí-açu. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica. (2003), Universidade Federal do Rio de Janeiro
- MICHELAN, T.; THOMAZ, S. M.; CARVALHO, P.; RODRIGUES, R. B.; SILVEIRA, M. J. Regeneration and Colonization of an Invasive Macrophyte Grass in Response to Desiccation. *Natureza & Conservação*, v. 08, n. 02, p. 133–139, 2010.
- NUNES, L.S.C., CAMARGO, A.F.M. Do interspecific competition and salinity explain plant zonation in a tropical estuary? *Hydrobiologia* 812, 67–77 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10750-016-2821-8>
- POTT, V. J.; POTT, A; LIMA, L. C. P.; MOREIRA, S. N.; OLIVEIRA, A. K. M. Aquatic Macrophyte Diversity of the Pantanal Wetland and Upper Basin. *Brazilian Journal of Biology*, v. 71, n. 1 suppl 1, p. 255–263, abr. 2011.
- ROSMAN, P.C.C. (2021) Referência técnica do SisBaHiA. Rio de Janeiro: Escola Politécnica da Área de Engenharia.
- SANT'ANA, D. O. Modelagem hidrológica e hidrodinâmica do rio Guaraguaçu e afluentes na análise da intrusão salina na taxa de renovação. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023.
- SATO, M. C.; ÂNGULO, R. Plano diretor de desenvolvimento urbano de Pontal do Paraná. 1º Caderno Impressa Municipal: Pontal do Paraná, p. 30. Disponível em:<https://www.sedest.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2020-03/caderno1_a.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2023.
- SATO, R. Y.; COSTA, A. P. L.; PADIAL, A. A. The Invasive Tropical Tanner Grass Decreases Diversity of the Native Aquatic Macrophyte Community at Two Scales in a Subtropical Tidal River. *Acta Botanica Brasilica*, v. 35, p. 140–150, 9 ago. 2021.
- SILVA, F. P., MARTINS, J. R. S., NOGUEIRA, F. F., PEREIRA, M. S., AMORIN, L. F. Impacto do desassoreamento da intrusão salina em rios estuarinos urbanos: Estudo de caso do rio Cubatão, SP. XII Encontro Nacional de águas Urbanas. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2018.
- TEIXEIRA, M. C. O sucesso da invasora *Urochloa arrecta* em diferentes contextos e seus impactos em um reservatório. Tese (Doutorado) - Curso de Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2015.
- WANG, J; ZHANG, Z. Phytoplankton, dissolved oxygen and nutrient patterns along a eutrophic river-estuary continuum: Observation and modeling. *Journal of Environmental Management*, v. 261, 2020.