

Análise da intrusão salina no rio Guaraguaçu em cenários de diferentes demandas hídricas

Danilo de Oliveira Sant'Ana¹, Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha²

Resumo: A intrusão salina em estuários é controlada principalmente pela interação entre a descarga fluvial, a maré e as retiradas de água ao longo da bacia, sendo mais intensa em condições de baixa vazão. O presente estudo avaliou a intrusão salina no rio Guaraguaçu, litoral do Paraná, sob diferentes cenários hidrológicos e de demanda hídrica. Foi empregado um modelo hidrodinâmico acoplado, com representação bidimensional horizontal no setor estuarino e unidimensional na porção mais interna do rio. As condições de contorno de nível d'água foram definidas a partir da maré astronômica e da maré meteorológica, enquanto as vazões afluentes foram obtidas de modelagem hidrológica para janeiro de 2024, período chuvoso, e da vazão de referência $Q_{7,10}$. As demandas de captação foram estabelecidas com base no Atlas do Abastecimento de Água do sistema integrado de Pontal do Paraná e Matinhos, considerando uma condição original e outra com duplicação das retiradas. A avaliação dos resultados foi realizada a partir da porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups no estuário. Os resultados indicaram que os cenários baseados na $Q_{7,10}$ apresentaram maior persistência temporal e maior avanço espacial da intrusão salina em relação ao período chuvoso, mostrando a predominância da descarga fluvial como forçante controlador da intrusão salina. O aumento das captações intensificou esse processo, com efeito mais expressivo quando combinado às condições hidrológicas críticas. Os resultados reforçam a necessidade de incorporar cenários de baixa vazão e aumento de demanda na gestão dos recursos hídricos do sistema estuarino do Guaraguaçu.

Abstract: Saline intrusion in estuaries is primarily controlled by the interaction between river discharge, tides, and water withdrawals along the basin, being more intense under low flow conditions. The present study assessed saline intrusion in the Guaraguaçu River, Paraná coast, under different hydrological and water demand scenarios. A coupled hydrodynamic model was employed, with horizontal two-dimensional representation in the estuarine sector and one-dimensional in the internal fluvial stretches. Water level boundary conditions were defined from astronomical and meteorological tides, while inflow discharges were obtained from hydrological modeling for January 2024 and the reference flow $Q_{7,10}$. Water withdrawal demands were established based on the Water Supply Atlas of the integrated system of Pontal do Paraná and Matinhos, considering an original condition and another with doubled withdrawals. The evaluation of results was performed based on the percentage of time in which salinity remained above 0.5 psu in the system. The results indicated that scenarios based on $Q_{7,10}$ showed greater temporal persistence and greater spatial advance of saline intrusion compared to scenarios with the January hydrograph, evidencing the predominance of river discharge control. The increase in withdrawals intensified this process, with a more pronounced effect when combined with critical hydrological conditions. The results reinforce the need to incorporate low flow and increased demand scenarios in the water resources management of the Guaraguaçu estuarine system.

Palavras-Chave: vazão de referência; rio Guaraguaçu; demanda hídrica.

Keywords: reference flow; Guaraguaçu River; water demand.

1) Universidade Federal do Paraná, e-mail: danilooliveira@ufpr.br;

2) Universidade Federal do Paraná, e-mail: cynaracunha@gmail.com)

INTRODUÇÃO

Nos estuários, a distribuição longitudinal da salinidade depende do balanço entre o aporte fluvial, a propagação da maré e os processos de mistura. Em condições de maior descarga fluvial, a tendência é de deslocamento da zona de mistura em direção à desembocadura; em contrapartida, em períodos de estiagem, a redução do aporte de água doce favorece o avanço da intrusão salina na direção contrária da embocadura (GEYER; MACCREADY, 2014).

A intrusão salina é um processo de grande relevância para a gestão de recursos hídricos em regiões costeiras, uma vez que pode comprometer usos múltiplos da água, sobretudo o abastecimento público, além de afetar processos ecológicos e biogeoquímicos em sistemas estuarinos. Em estudo realizado no rio São Mateus–ES, por exemplo, verificou-se que, em períodos secos, o avanço da intrusão salina comprometeu a captação de água para abastecimento, evidenciando a sensibilidade de sistemas estuarinos à redução da descarga fluvial (COTTA; JESUS, 2021). Nesse contexto, a análise da intrusão salina sob vazões de referência, como a $Q_{7,10}$, constitui uma abordagem importante para avaliar a vulnerabilidade de sistemas sujeitos à estiagem e à ampliação da demanda hídrica. No Brasil, as vazões mínimas de referência são fundamentais para a definição de limites outorgáveis e para a segurança hídrica de eventos extremos, sendo amplamente utilizadas na gestão de usos da água; MACEDO; STINGHEN; MANNICH, 2024).

No rio Guaraguaçu, localizado no litoral do Paraná, estudos recentes têm reforçado a importância da relação entre vazão fluvial e salinidade para a compreensão da dinâmica estuarina (SANT'ANA et al., 2025, SANT'ANA et al. 2024). SANT'ANA et al., 2025, em análises conduzidas no estuário do rio Guaraguaçu para cenários chuvoso e seco, considerando as variações de vazão e salinidade, observaram que, no cenário chuvoso, associado a menor salinidade, os contaminantes, representados por partículas inertes, saíram mais facilmente do domínio modelado, enquanto, no cenário seco, associado a maior salinidade, tenderam a permanecer por mais de 30 dias. Esses resultados indicam que a variabilidade hidrológica exerce papel central sobre a persistência da salinidade e sobre os processos ecológicos no sistema, reforçando a necessidade de avaliar cenários hidrológicos contrastantes no estudo da intrusão salina.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo avaliar a intrusão salina no rio Guaraguaçu sob diferentes cenários de vazão e demanda de captação de água. Foram considerados quatro cenários para janeiro de 2024: dois representando condições hidrológicas médias do mês de janeiro, mais chuvoso, e dois associados à vazão de referência $Q_{7,10}$, representando condição hidrológica crítica. Para cada condição hidrológica, foram avaliadas situação com demanda de captação baseada nos valores disponíveis no Atlas do Abastecimento de Água e outra com duplicação dessa demanda. A comparação entre os cenários permitiu analisar a resposta do sistema à redução do aporte fluvial e ao aumento das retiradas, fornecendo subsídios técnicos para o planejamento e a gestão integrada dos recursos hídricos no estuário do Guaraguaçu.

MÉTODOS

O domínio de modelagem hidrodinâmica adotado para o sistema do rio Guaraguaçu foi representado por meio de uma abordagem acoplada, com malha bidimensional horizontal no setor estuarino e modelagem unidimensional nos trechos fluviais mais internos (Figura 1). A malha de elementos finitos apresenta área aproximada de 1.188,2 km², com 3.851 elementos e 17.832 nós, abrangendo o setor estuarino e a região do rio Guaraguaçu até cerca de 30 km da embocadura. Para os trechos mais internos, foi utilizada uma representação unidimensional com 456 seções transversais, com maior detalhamento nas regiões sinuosas do rio Cambará.

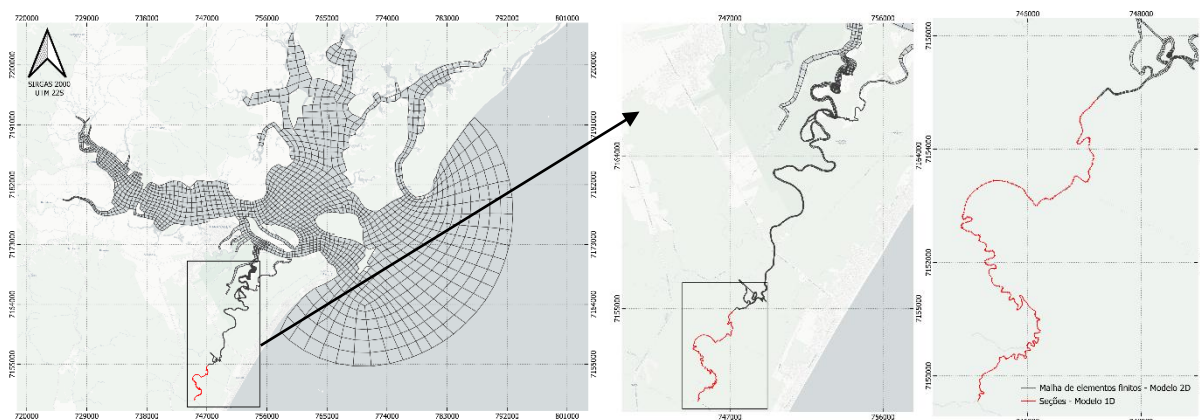


Figura 1 – Domínio de modelagem do rio Guaraguaçu, com representação da malha 2DH no setor estuarino (esquerda) e das seções do modelo 1D nos trechos fluviais internos (direita)

O sistema computacional SisBaHiA[®] foi utilizado para a simulação hidrodinâmica e do transporte de sal do rio Guaraguaçu e de sua região estuarina, por se tratar de uma ferramenta amplamente aplicada na análise de escoamentos, transporte e circulação em ambientes costeiros, estuarinos e fluviais. Neste estudo, adotou-se uma abordagem acoplada, com o uso do modelo 2DH no setor estuarino, para representar a variação espacial da elevação da superfície livre, da circulação e da salinidade, e do modelo 1D nos trechos fluviais mais internos, onde a geometria alongada do canal e a predominância do escoamento longitudinal justificam essa simplificação. Essa configuração permitiu representar de forma integrada a propagação da maré, a influência das vazões afluentes e os efeitos das captações de água sobre a intrusão salina no sistema do rio Guaraguaçu.

Os dados batimétricos utilizados no modelo foram obtidos a partir de cartas náuticas da Diretoria de Hidrografia e Navegação, complementados por levantamentos de campo realizados em novembro de 2023 e março de 2024 no trecho interno do rio Guaraguaçu, até a confluência entre os rios Pery, Guaraguaçu e Cambará. Para o trecho unidimensional do rio Cambará, foram adotadas declividades uniformes de 0,04% em aproximadamente 11,3 km e de 0,2% em cerca de 900 m.

As condições de contorno de elevação da superfície livre foram definidas a partir da combinação entre maré astronômica e maré meteorológica. A componente astronômica foi construída com base nas constantes harmônicas previamente calculadas para a região e na análise harmônica do marégrafo de Pontal do Sul (POLLI et al., 2024). Para a componente meteorológica, foram utilizados dados do modelo HyCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model). As condições de contorno de vazão foram obtidas a partir de resultados de modelagem hidrológica para janeiro de 2024 (SANT'ANA, 2023), sendo também calculada a vazão de referência $Q_{7,10}$ com base na série simulada para o período de 2005 a 2024.

A Figura 2 apresenta os hidrogramas diários simulados para janeiro de 2024, com destaque para os picos associados aos eventos de precipitação concentrados na terceira semana do mês. O rio Guaraguaçu, no mês de janeiro de 2024, apresentou média de 12,427 m³/s, máximo de 50,670 m³/s, mínimo de 4,901 m³/s e $Q_{7,10}$ de 3,22 m³/s. Entre os seus tributários, o rio Cambará apresentou média de 4,501 m³/s e $Q_{7,10}$ de 0,97 m³/s, enquanto os rios Indaial, do Meio e Pery apresentaram médias inferiores a 2,0 m³/s. As vazões médias de janeiro foram superiores às vazões de referência, justificando a avaliação comparativa entre uma condição hidrológica representativa de mês chuvoso e uma condição de estiagem severa.

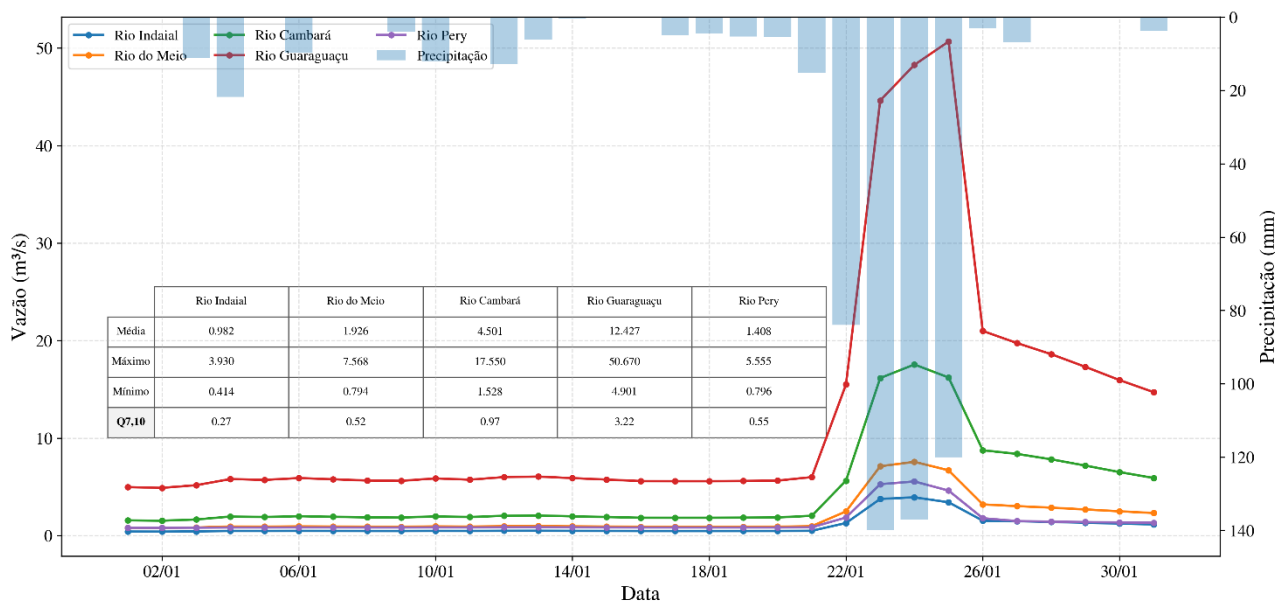


Figura 2 - Hidrogramas diários simulados para janeiro de 2024 do rio Guaraguaçu e de seus principais tributários, com precipitação diária e estatísticas descritivas das vazões.

As demandas de captação de água foram definidas com base no Atlas do Abastecimento de Água do sistema integrado de Pontal do Paraná e Matinhos (Tabela 1). A soma das captações consideradas foi de 0,9049 m³/s na condição original, valor que foi duplicado para 1,8098 m³/s nos cenários que consideraram o aumento de demanda. Foram então simulados quatro cenários (Tabela 2): (A) hidrograma de janeiro de 2024 com demanda original; (B) hidrograma de janeiro de 2024 com demanda duplicada; (C) Q_{7,10} com demanda original; e (D) Q_{7,10} com demanda duplicada.

Tabela 1 - Vazões de captação de água adotadas nos cenários de demanda hídrica.

Rio	Vazão de captação (m³/s)
Rio das Pombas	0,7680
Rio Cambará	0,1050
Rio Sertãozinho I	0,0099
Rio Indaial	0,0045
Rio Indaial	0,0045
Rio Tabuleiro	0,0120
Total	0,9049

Fonte: Elaborado a partir do Atlas do Abastecimento de Água do sistema integrado de Pontal do Paraná e Matinhos, jan./2010.

Tabela 2 - Síntese dos cenários hidrológicos e de demanda de captação simulados

Cenários	Condição de vazão afluente	Demanda de captação	Vazão total de captação (m³/s) na bacia hidrográfica
A	Hidrograma de janeiro de 2024	Atlas	0,9049
B		2 × Atlas	1,8098
C	Q _{7,10}	Atlas	0,9049
D		2 × Atlas	1,8098

Como o modelo hidrodinâmico 1D possui extensão limitada e não abrange os pontos de captação localizados na porção mais interna da bacia do rio Guaraguaçu, as demandas associadas aos rios Cambará, Sertãozinho I, Indaial e Tabuleiro foram incorporadas aos cenários por meio da subtração

de suas respectivas vazões afluentes. A maior demanda do sistema, originalmente associada ao rio das Pombas, foi representada no domínio 2DH na região de confluência entre os rios Cambará, Pery e Guaraguaçu, de modo a compatibilizar a localização das retiradas com a discretização espacial adotada no modelo.

Para a análise dos resultados, adotou-se como indicador de intrusão salina a porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups ao longo do sistema modelado, caracterizado como água salobra segundo a Resolução do Conama nº357/2005. Esse critério permitiu avaliar não apenas o alcance espacial da influência salina, mas também sua persistência temporal nos diferentes trechos do rio Guaraguaçu. Assim, os cenários foram comparados com base na distribuição espacial da frequência de ocorrência de salinidade superior a 0,5 ups, possibilitando identificar as regiões mais suscetíveis à intrusão salina sob diferentes condições de vazão e demanda hídrica.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial da porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups para os cenários A e B, ambos baseados no hidrograma de janeiro de 2024. Vale ressaltar que o modelo hidrodinâmico e o modelo de qualidade da água são provenientes da base de dados de Sant'Ana (2023), na qual os modelos foram calibrados com base em dados medidos em campanhas de campo realizadas em dois períodos distintos, seco e chuvoso, com medições de salinidade e profundidade da coluna d'água.

No cenário A, correspondente à condição de demanda original, observa-se menor persistência temporal da influência salina no sistema, com maiores frequências de ocorrência concentradas nas regiões mais próximas da embocadura. Esse comportamento indica que, sob as condições hidrológicas representativas do mês, o aporte de água doce foi suficiente para restringir a intrusão salina e limitar sua permanência nos trechos mais internos do rio Guaraguaçu. No cenário B, por sua vez, a duplicação das captações promoveu aumento da porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups, evidenciando intensificação da influência marinha mesmo sem alteração dos valores da condição de contorno para a vazão. A comparação entre esses dois cenários mostra que, em uma condição hidrológica relativamente favorável, o aumento da demanda hídrica já é capaz de ampliar a persistência temporal da salinidade no sistema, mesmo que forma pouco significativa.

Em termos espaciais, a diferença entre os cenários A e B resultou em um avanço adicional de aproximadamente 220 m da intrusão salina. Embora essa diferença seja menor do que aquelas associadas à mudança da condição hidrológica, ela confirma que o aumento das retiradas reduz a capacidade do escoamento fluvial em conter a penetração do sal no estuário.

A Figura 4 apresenta os resultados para os cenários C e D, ambos associados à vazão de referência $Q_{7,10}$, representando uma condição hidrológica crítica. No cenário C, mesmo com a demanda original, verifica-se maior persistência temporal da salinidade acima de 0,5 ups em comparação aos cenários A e B, demonstrando que a redução da descarga fluvial favorece significativamente a influência marinha no sistema. Esse resultado confirma que a baixa vazão exerce papel central no controle da intrusão salina, permitindo que a água salgada permaneça por maior fração do tempo em trechos mais internos do rio Guaraguaçu.

No cenário D, que combina a condição de $Q_{7,10}$ com a duplicação das captações, observa-se a situação mais crítica entre todas as simuladas. A porcentagem do tempo com salinidade acima de 0,5 ups torna-se ainda maior e mais espacialmente distribuída, indicando intensificação simultânea da persistência temporal e da extensão longitudinal da intrusão salina. A comparação entre os cenários C e D mostra que o aumento da demanda hídrica, quando sobreposto a uma condição de estiagem,

amplia ainda mais a vulnerabilidade do sistema. Entre esses dois cenários, o avanço adicional da intrusão foi de aproximadamente 300 m, valor superior ao observado entre A e B, o que indica que o efeito das retiradas se torna mais expressivo sob condições hidrológicas críticas. A comparação entre os quatro cenários evidencia que a redução da vazão fluvial exerceu efeito mais intenso do que o aumento isolado da demanda hídrica (Tabela 3). Embora a ampliação das captações agrave a intrusão salina, o principal fator de controle do fenômeno no sistema do Guaraguaçu continua sendo a disponibilidade hídrica dos rios. Os maiores valores de permanência temporal da salinidade e as maiores extensões da intrusão foram observados no cenário D, confirmando que a combinação entre vazão crítica e maior demanda representa a condição de maior risco para o sistema estuarino.

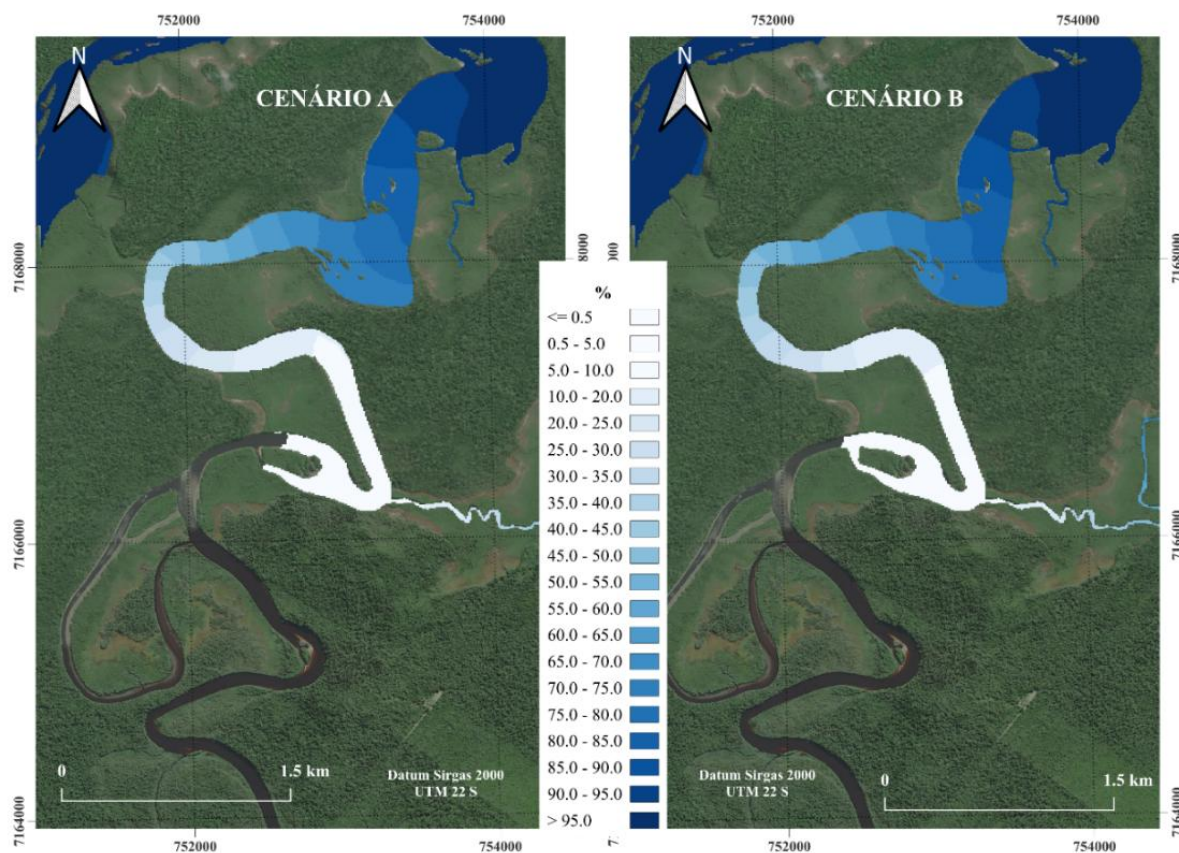


Figura 3 – Distribuição espacial da porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups no rio Guaraguaçu para os cenários A e B.

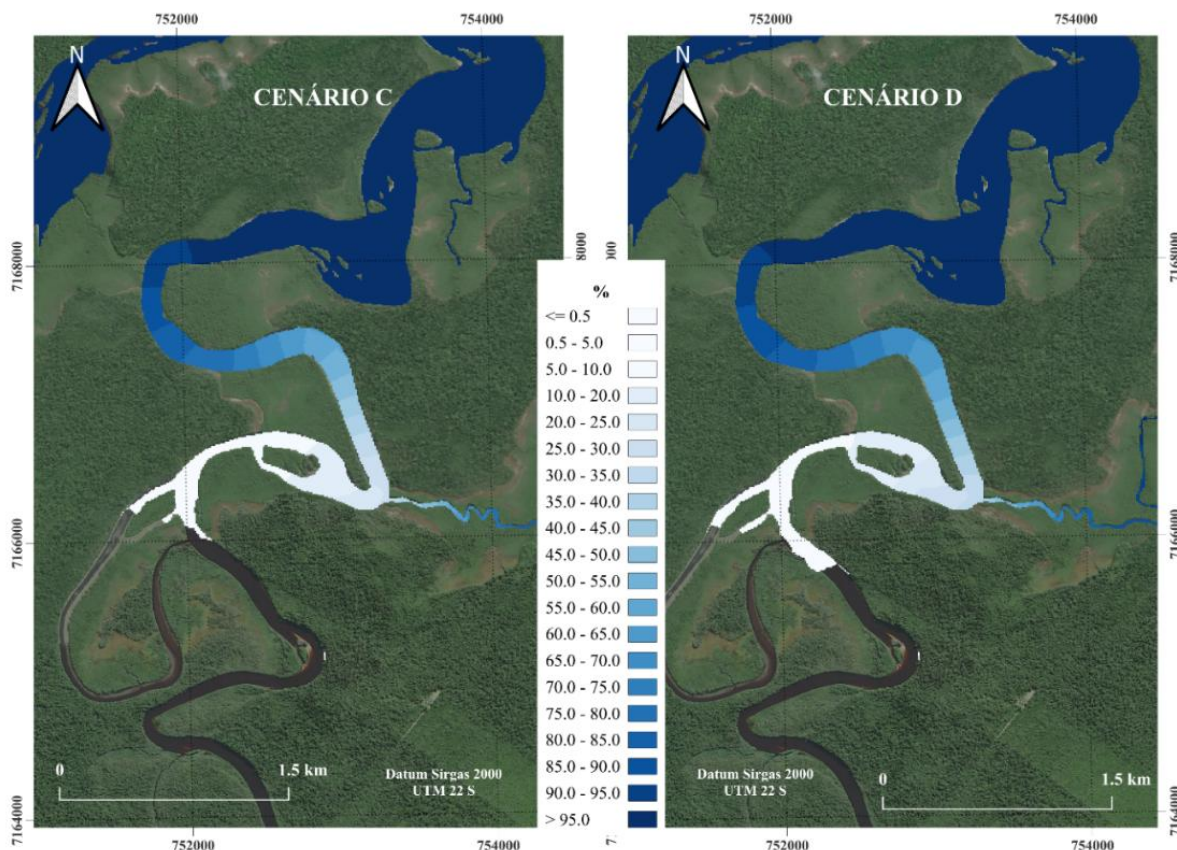


Figura 4 – Distribuição espacial da porcentagem do tempo em que a salinidade permaneceu acima de 0,5 ups no rio Guaraguaçu para os cenários C e D.

Tabela 3 – Variação do avanço da intrusão salina entre os diferentes cenários.

Cenário	B	C	D
A	220	1178	1478
B	0	958	1258
C		0	300

CONCLUSÃO

Os resultados mostraram que, nos cenários A e B, usando o hidrograma de janeiro de 2024, a intrusão salina apresentou menor persistência temporal no sistema, com a salinidade acima de 0,5 ups permanecendo por menor fração do tempo e mais restrita aos trechos próximos da embocadura. Ainda assim, a comparação entre esses dois cenários indicou que a duplicação das captações foi suficiente para intensificar a intrusão salina, aumentando tanto sua persistência temporal quanto seu avanço longitudinal. Esse comportamento demonstra que, mesmo em condições hidrológicas relativamente favoráveis, o aumento da demanda hídrica já é capaz de ampliar a vulnerabilidade do sistema estuarino do Guaraguaçu.

Nos cenários C e D, associados à vazão de referência $Q_{7,10}$, observou-se uma condição significativamente mais crítica. A redução do aporte fluvial favoreceu maior permanência da salinidade acima de 0,5 ups em trechos mais internos do rio. Entre esses dois cenários, a duplicação das captações agravou ainda mais esse comportamento, resultando na condição de maior severidade no cenário D. Assim, a combinação entre baixa vazão e aumento da demanda hídrica produziu o

quadro mais desfavorável para o sistema, tanto em termos de persistência temporal quanto de extensão espacial da intrusão salina.

A comparação geral entre os quatro cenários indica que a redução da vazão fluvial exerceu efeito mais intenso sobre a intrusão salina do que o aumento isolado da demanda hídrica. Embora a ampliação das captações tenha contribuído para agravar o fenômeno, especialmente em condições críticas, o principal fator de controle da intrusão salina no rio Guaraguaçu foi a disponibilidade de água doce no sistema. Dessa forma, conclui-se que a gestão hídrica do estuário deve considerar não apenas cenários de demanda atual e futura, mas também condições hidrológicas críticas, como a $Q_{7,10}$, incorporando indicadores de persistência temporal da salinidade como suporte à avaliação de risco e ao planejamento do uso da água.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001T

REFERÊNCIAS

ATLAS DO ABASTECIMENTO DE ÁGUA. Pontal do Paraná e Matinhos, PR, jan. 2010.

COTTA, Aloísio José Bueno; JESUS, Honerio Coutinho de. Impactos, extensão e proposta de mitigação da intrusão salina no Rio São Mateus. *Pesquisas em Geociências*, v. 48, n. 4, 2021. DOI: 10.22456/1807-9806.107238.

GEYER, W. Rockwell; MACCREADY, Parker. The estuarine circulation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, v. 46, p. 175-197, 2014. DOI: 10.1146/annurev-fluid-010313-141302.

MACEDO, Alexandre Sokoloski de Azevedo Delduque de; STINGHEN, Camila Marin; MANNICH, Michael. Vazões de referência sazonal e sua aplicação na outorga de recursos hídricos. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 21, e21, 2024. DOI: 10.21168/reg.v21e21.

POLLI, Bruna Arcie et al. Evaluation of the impacts caused by wind field and freshwater flow variations due to climate change on the circulation of the Paranaguá Estuarine Complex, Brazil. *Regional Studies in Marine Science*, v. 47, 2021. DOI: 10.1016/j.rsma.2021.101933. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248552100325X>>. Acesso em: 20 abr. 2026.

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.

SANT'ANA, Danilo; CUNHA, Cynara de Lourdes da Nobrega; FERREIRA, Aline Trog; PUCHALSKI, Beatriz Silvestre. Dispersão da espécie invasora braquiária em um estuário tropical: Dispersal of the brachiaria invasive species in a tropical estuary. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 11, n. 1, p. 988-1003, 2025. DOI: 10.21680/2447-3359.2025v11n1ID38262

SANT'ANA, D. O.; CUNHA, C. L. N. Estudo da intrusão salina no rio Guaraguaçu. In: II Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica (FLUHIDROS) e XVI ENES, 2024