

Modelagem hidrodinâmica do estuário do rio Caeté e entorno da rodovia PA-458 com vistas à implantação de infraestruturas verde-cinza

Diana Maria Cancelli¹, Cynara de Lourdes da Nóbrega Cunha², Helder Rafael Nocko³, André Luciano Malheiros⁴, Alex Alves⁵, Bruno Henriques Coutinho⁶, José Augusto Müller Neto⁷, Luis Cláudio Fernandes Barbosa⁸, Natali Isabela Pierin Piccolo⁹, Rafaela Sousa Gonçalves¹⁰ & Renan Alves Conceição¹¹

Resumo: Este trabalho apresenta simulações hidrodinâmicas do estuário do rio Caeté e entorno da rodovia PA-458, em Bragança (PA), com o intuito de avaliar a eficiência da implantação de Infraestruturas Verde-Cinza (IVCs) para fins de renaturalização de áreas de mangue impactadas pela construção da rodovia. Para tanto, utilizou-se o modelo hidrodinâmico 2DH do SisBaHiA[®]; o modelo foi calibrado, com ótima correlação ($R^2 = 0,96$), indicando uma boa representação dos fluxos de maré. Foram simulados vários cenários: o diagnóstico atual, as intervenções futuras (inserção de bueiros, dragagens e canais vegetados), e um cenário representativo de 2070, considerando a elevação de 0,50 m no nível médio do mar (conforme projeções do IPCC e NASA). Os resultados indicaram que as intervenções propostas são eficientes na recuperação dos fluxos hídricos, e são capazes de garantir a renovação hídrica e gerar condições adequadas para recuperação de áreas de mangue hoje degradadas.

Abstract: This work presents hydrodynamic models for the Caeté River estuary and the surrounding area of the PA-458 highway in Bragança (PA), with the aim of evaluating the efficiency of implementing Green and Gray Infrastructures (GGIs) for the renaturalization of mangrove areas impacted by the highway construction. To this end, the 2DH hydrodynamic model of SisBaHiA[®] was used; the model was calibrated, and R^2 correlations of up to 0.96 were obtained, indicating a good representation of tidal flows. With the calibrated model, scenarios of current diagnosis, future interventions (insertion of culverts, dredging and vegetated channels), and a representative scenario for 2070 were simulated, considering a 0.50 m rise in mean sea level (according to IPCC and NASA projections). The results indicated that the interventions are effective in restoring water flows and suggest that the proposed GGIs can generate adequate conditions for the recovery of currently degraded mangrove areas.

Palavras-Chave: Infraestruturas verde-cinza (IVC), modelagem hidrodinâmica costeira, renaturalização de mangues, PA-458

Keywords: Green and gray infrastructure (GGI), coastal hydrodynamic modeling, mangrove renaturalization, PA-458

INTRODUÇÃO

A zona costeira amazônica, incluindo a região de Bragança (PA), abriga um dos manguezais mais vastos e conservados do mundo (Ramsar, 2018). Este ecossistema é regido por uma circulação complexa, onde a propagação da maré e as variações sazonais de vazão fluvial determinam os padrões de inundação, o transporte de sedimentos e, conseqüentemente, a manutenção da biodiversidade. No

1) EnvEx Engenharia e Consultoria (diana.cancelli@envexengenharia.com.br)

2) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná (cynara@ufpr.br)

3) EnvEx Engenharia e Consultoria (helder@envexengenharia.com.br)

4) EnvEx Engenharia e Consultoria (andre@envexengenharia.com.br)

5) Conservação Internacional Brasil (aalves@conservation.org)

6) Conservação Internacional Brasil (bcoutinho@conservation.org)

7) Conservação Internacional Brasil (jneto@conservation.org)

8) Conservação Internacional Brasil (lbarbosa@conservation.org)

9) Conservação Internacional Brasil (npiccolo@conservation.org)

10) Conservação Internacional Brasil (rsousa@conservation.org)

11) Conservação Internacional Brasil (ralves@conservation.org)

entanto, a implementação de infraestruturas de transporte, como a rodovia PA-458, que liga a área urbana de Bragança à vila de Ajuruteua, pode formar barreiras físicas que alteram os fluxos hídricos naturais.

A rodovia PA-458 está localizada sobre um aterro construído em meio a uma extensa área de manguezal, impedindo, na maior parte de sua extensão, que os fluxos de água regidos pela propagação da onda de maré ocorram naturalmente, impactando a saúde do manguezal, a economia local (pesca artesanal) e a integridade da própria pista da rodovia. Diante de um cenário de mudanças climáticas e a consequente elevação do nível médio do mar, a vulnerabilidade dessa infraestrutura se torna ainda mais crítica.

A Conservação Internacional do Brasil (CI-Brasil) – organização brasileira sem fins lucrativos, que faz parte da rede *Conservation International*, por meio do seu Programa Marinho e Costeiro, com foco em Infraestrutura Verde-Cinza (IVC) e Carbono Azul, selecionou a rodovia PA-458 como um local prioritário para o desenvolvimento de projetos de IVC. A escolha se deu em função do seu caráter emblemático em termos de impacto socioambiental em manguezais, e está alinhada ao projeto ProManguezal e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6, 11, 13, 14, 15 e 17, buscando estratégias de adaptação climática e restauração de funções hidráulicas na zona costeira para reduzir vulnerabilidades locais.

Nesse contexto, a modelagem hidrodinâmica se mostra uma ferramenta fundamental para o planejamento ambiental, principalmente nas regiões costeiras, permitindo não apenas entender a situação atual, mas também simular cenários de intervenção. Assim, este trabalho tem como objetivo apresentar a implementação e a calibração de um modelo de circulação hidrodinâmica para o estuário do Rio Caeté e entorno da rodovia PA-458, utilizando o sistema de modelos SisBaHiA[®], com o objetivo de avaliar o impacto de intervenções por meio de IVCs no entorno da rodovia PA-458, visando o restabelecimento dos fluxos hídricos entre os dois lados da rodovia e, consequentemente, a recuperação de áreas de manguezal, hoje degradadas. A seguir, são apresentados a metodologia adotada, detalhes sobre a calibração, intervenções propostas, cenários simulados, e os resultados.

METODOLOGIA

A modelagem da circulação hidrodinâmica foi realizada utilizando o sistema de modelos SisBaHiA[®] (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental). O modelo utiliza equações diferenciais para águas rasas integradas na vertical, considerada uma formulação adequada para regiões estuarinas onde o comprimento horizontal é significativamente superior à profundidade.

Para a implementação do modelo, a área de estudo, que compreende o estuário do Rio Caeté e o entorno da rodovia PA-458 (Figura 1-A), foi discretizada em uma malha de elementos finitos, que permite representar a geometria complexa dos canais de maré e furos, de forma a garantir a estabilidade numérica e representatividade das trocas hidráulicas. Foram geradas duas malhas: a primeira para as simulações de calibração e diagnóstico (Figura 1-B), composta por 1.290 elementos e 6.910 nós, e a segunda, considerando as intervenções, composta por 1368 elementos e 7390 nós.

Os dados batimétricos (Figura 1-C) utilizados foram fornecidos pela CI-Brasil (2025), obtidos de levantamentos realizados na área de interesse, cartas náuticas e dados de campo. O valor da amplitude de rugosidade do fundo (ξ) adotado, considerando uma região de manguezais com predomínio de areias médias, foi de $\xi = 0,03$ m (ROSMAN, 2025). Para as condições de contorno, os dados utilizados são descritos na Tabela 1; as localizações das estações se encontram na Figura 1-A.

Para a calibração do modelo, foram ajustados os coeficientes de atrito de fundo e de viscosidade turbulenta; posteriormente foi realizada a comparação entre os resultados da simulação com dados medidos para o período de agosto a setembro de 2025, nos pontos de medição *in situ* (Figura 1). Para avaliar a qualidade da calibração foram utilizados os indicadores Erro Quadrático Médio (RMSE), Erro Médio Absoluto (MAE) e o Coeficiente de Determinação (R^2).

Condição de contorno	Dados utilizados
Fronteira aberta: variação no nível de maré	Série temporal de elevação do nível do mar obtida através do modelo global TPXO, e principais constantes harmônicas para a região
Fronteira Terrestre: vazões do Rio Caeté	Vazão média histórica do Rio Caeté, obtida da estação fluviométrica Nova Mocajuba (código ANA 17350000)
Forçantes atmosféricas: intensidade e direção do vento	Dados da estação meteorológica Bragança (código INMET A226) e dados de reanálise do MERRA-2 (NASA)

Tabela 1 – Descrição das condições de contorno utilizadas.

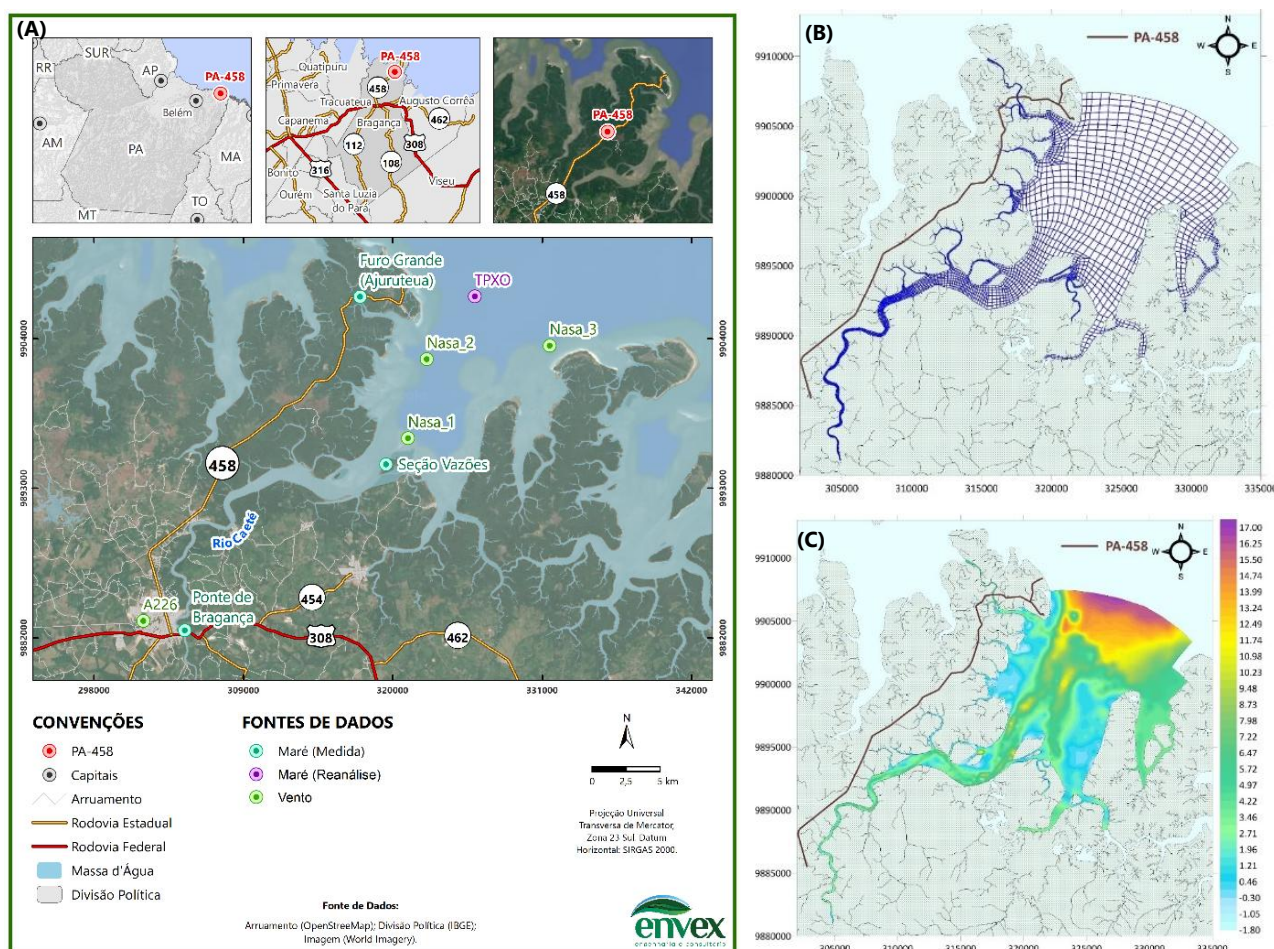


Figura 1 – Localização da área de estudo, pontos de medição (A), malha numérica usada na calibração e simulação de diagnóstico (B), batimetria utilizada nas simulações (C).

CALIBRAÇÃO DO MODELO

A calibração do modelo foi realizada para o período de agosto a setembro de 2025 – período em que havia dados medidos *in situ* (fornecidos pela CI-BRASIL). A análise focou na elevação do nível de água (maré) medida em pontos localizados no estuário do Rio Caeté, os quais foram comparados com os resultados gerados pelo SisBaHiA®.

Os resultados do modelo apresentaram uma boa correlação com os dados medidos nos 3 pontos considerados (localização na Figura 1-A), conforme mostram a Tabela 2, Figura 2 e Figura 3: 1) Furo Grande (Vila de Ajuruteua), localizado próximo à fronteira aberta, apresentou um R^2 de 0,95 e MAE de 0,35 m, indicando que o modelo reproduz adequadamente a amplitude e a fase da maré; 2) Seção Vazões, ponto intermediário, onde o modelo manteve alta correlação, com R^2 de 0,96 e

MAE de 0,36 m; 3) Ponte de Bragança: ponto mais a montante do estuário do Rio Caeté, apresentou R^2 de 0,81 e MAE de 0,61 m – neste ponto o modelo apresentou uma tendência de superestimar as baixa-mares durante períodos de sizígia, cuja divergência é atribuída à complexidade da drenagem das áreas de manguezal e às incertezas nas vazões afluentes dos rios menores, que não possuem monitoramento contínuo.

Estatística	Ponte de Bragança	Seção Vazões	Furo Grande (Ajuruteua)
RMSE (m)	0,75	0,45	0,44
MAE (m)	0,61	0,36	0,35
R^2	0,81	0,96	0,95

Tabela 2 – Estatísticas aplicadas para os valores de nível d'água simulados versus dados medidos nas seções Maré Bragança, Maré Seção e Maré Ajuruteua.

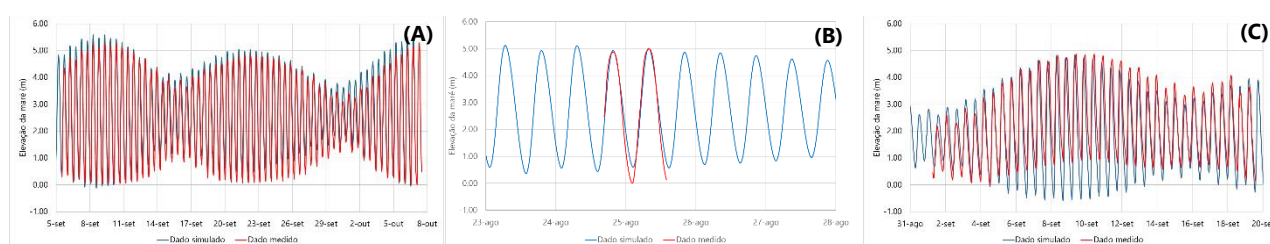


Figura 2 – Comparação entre os dados de maré medidos e resultados do modelo para os pontos Furo Grande (Vila de Ajuruteua) (A), Seção Vazões (B) e Ponte de Bragança (C).

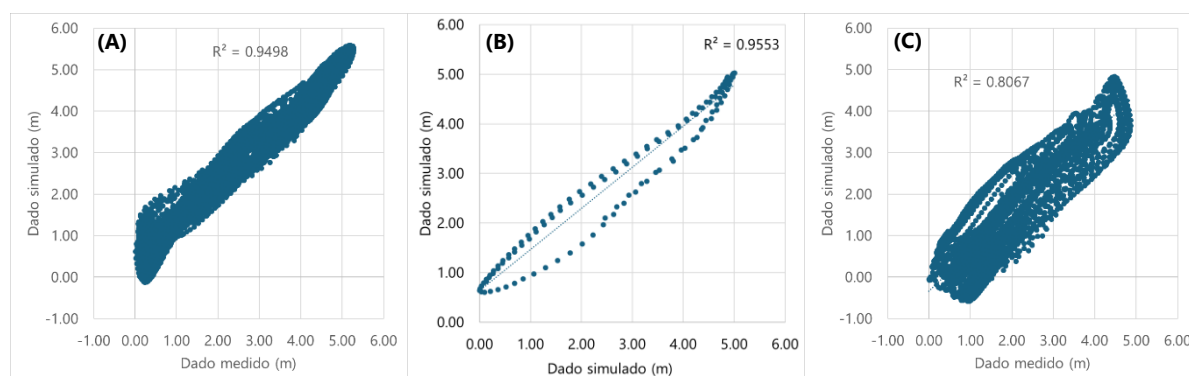


Figura 3 – Correlações entre os dados de maré medidos e resultados do modelo para os Furo Grande (Vila de Ajuruteua) (A), Seção Vazões (B) e Ponte de Bragança (C).

A análise conjunta dos gráficos de série temporal e dos indicadores estatísticos permitiu considerar o modelo calibrado e apto para a simulação dos cenários de intervenção na rodovia PA-458.

INTERVENÇÕES PROPOSTAS PARA O ENTORNO DA RODOVIA PA-458

Após a calibração, o modelo foi utilizado para avaliar o impacto na hidrodinâmica local devido à implantação de intervenções cinza (tradicional) e verde (baseadas na natureza) em pontos identificados como críticos e prioritários, e tendo como foco a restauração da conectividade hidráulica entre os dois lados da rodovia e a resiliência frente à possível elevação do nível do mar. Nesse sentido, as soluções propostas são descritas na Tabela 3, e a localização de cada uma delas, em relação à rodovia PA-458, pode ser observada na Figura 4.

O conjunto de estruturas 1, 2 e 3 (composto por intervenções verde-cinza) focou no aumento da vazão e restabelecimento de um canal de maré/drenagem sob a rodovia, utilizando *box culvert*. A proposta 4, embora localizada em local mais distante da rodovia, teve como objetivo avaliar a possibilidade de criar condições para regeneração da vegetação em uma área bastante degradada. Já o conjunto de intervenções 5.1, 5.2 e 5.3 teve como orientação criar condições para a restauração da

área de mangue localizada na região da solução 5; nesse caso, o objetivo é restabelecer os fluxos de água sob a rodovia por meio da criação de canais (formados por *box culverts* associados a canais vegetados). Os *box culverts* foram definidos como bueiros com seção transversal retangular, de concreto simples, do tipo BSCE 1,5 x 1,5, classificado como Bueiro Simples Celular de Concreto (conforme Manual de Drenagem do DNIT de 2006) com dimensões de 1,5 m de base (B) por 1,5 m de altura (H), com a vazão admissível de 5,85 m³/s – que, de acordo com as modelagens realizadas, é maior do que os máximos de vazão dos períodos de cheia e de vazante observados. Adicionalmente, para o canal que será dragado e para os canais vegetados, foram estimados os volumes de sedimento que devem ser retirados desses locais, e as novas cotas de fundo desses locais; essas cotas, assim como as configurações dos bueiros retangulares foram inseridas na malha numérica utilizada para as simulações de prognóstico.

Intervenção	Tipo	Descrição e local
1	Cinza	Box culvert no Furo do Pará
2	Verde	Microcanal vegetado no Furo do Pará
3	Cinza	Dragagem de trecho do Furo do Pará
4	Verde	Microcanal vegetado nas Salinas dos Roques
5	Verde	Restauração de mangue na porção sudoeste da PA-458
5.1	Cinza e Verde	Box culvert + microcanal vegetado, próximo ao km 17 da PA-458 (ponto mais ao sul)
5.2	Cinza e Verde	Box culvert + microcanal vegetado, próximo ao km 17 da PA-458 (Furo do Taicy)
5.3	Cinza e Verde	Box culvert + microcanal vegetado, próximo ao km 17 da PA-458 (ponto mais ao norte)

Tabela 3 – Descrição das intervenções verde-cinza propostas para o entorno da rodovia PA-458.

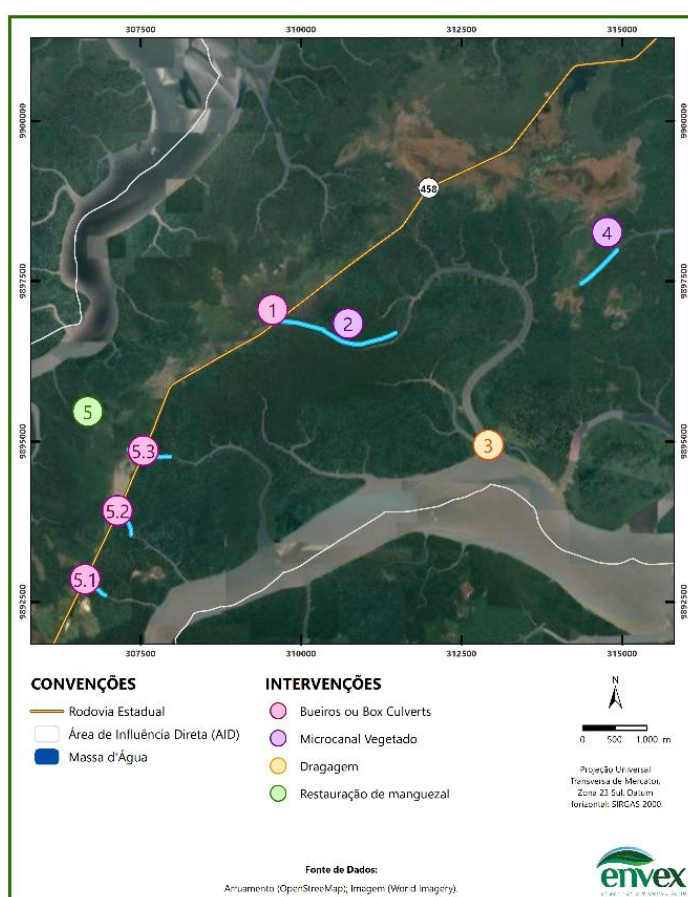


Figura 4 – Localização dos pontos definidos para implantação de infraestruturas verde-cinza, conforme descrito na Tabela 3.

CENÁRIOS DE SIMULAÇÃO

Após a calibração do modelo e inserção das intervenções na malha numérica, foram simulados três cenários: cenário Atual (diagnóstico), reproduzindo as condições atuais, sem intervenções, e dois cenários prognósticos. O cenário Futuro considera a inserção das intervenções (Tabela 3) passíveis de serem incluídas na malha numérica e simuladas, e o cenário representativo do ano de 2070 – este com a mesma configuração do cenário Futuro, mas com uma elevação do nível médio do mar da ordem de 0,50 m, projetada para o ano de 2070. O valor de 0,50 m foi definido com base no cenário de estabilização SSP2-4.5 do Sexto Relatório de Avaliação (AR6) do IPCC, cujas projeções globais

foram regionalizadas para o estuário do rio Caeté por meio da plataforma *NASA Sea Level Projection Tool*; ainda, 0,50 m é o limite superior da faixa provável de elevação em 2070 na região de estudo, o que garante uma análise conservadora e alinhada ao observado por Prandle et al. (2015).

Todos os cenários foram simulados para um ano hidrológico completo, permitindo avaliar questões de sazonalidade e comportamentos sob diferentes condições de maré.

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

As simulações hidrodinâmicas permitiram avaliar o comportamento dos fluxos hídricos, sobretudo no entorno da rodovia PA-458, para os três cenários descritos anteriormente: Atual, Futuro e 2070. Os resultados analisados incluíram elevação, velocidades de corrente, permanência de velocidades e de elevação, para períodos chuvoso e de estiagem, preamar, baixamar, sizígia, quadratura, marés enchente e vazante, para toda a região simulada e nas áreas das intervenções.

De maneira geral, os resultados (exemplos da Figura 5 até a Figura 10) indicaram que a hidrodinâmica local é predominantemente regida pelas marés, e que a sazonalidade das chuvas exerce pouca influência sobre a hidrodinâmica da região. As maiores velocidades encontram-se nos canais principais, em períodos de sizígia, enquanto as áreas de manguezais e bancos de areia apresentam velocidades reduzidas, o que as torna mais suscetíveis à degradação. Quanto às intervenções, as simulações validam a eficácia das estruturas, sendo que no Furo do Pará e no trecho sul da estrada, a inserção de *box culverts* e o aprofundamento de canais restabeleceram o fluxo de água de forma sincrônica com a maré, enquanto na região das Salinas (intervenção 4), o prolongamento do canal garantiu a renovação hídrica necessária para evitar a hipersalinização.

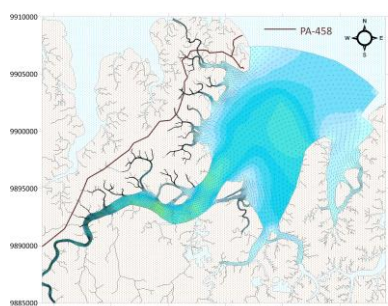


Figura 5 – Velocidades de corrente com menor vazão afluente no Rio Caeté - cenário Atual.

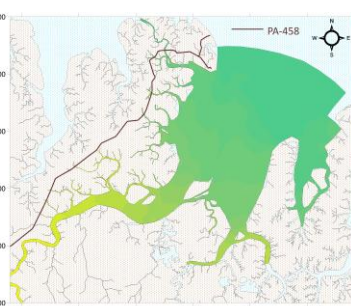


Figura 6 – Elevação com maior vazão afluente no Rio Caeté – cenário 2070.

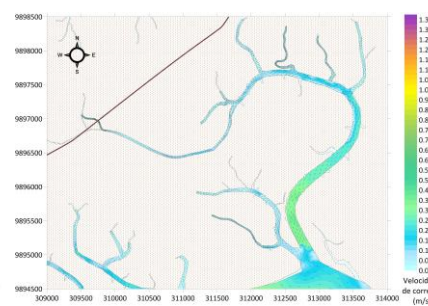


Figura 7 – Velocidades de corrente na preamar enchente, área da intervenção 1 (Furo do Pará), cenário Futuro.

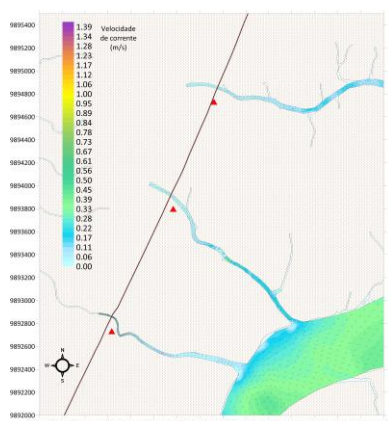


Figura 8 – Velocidades de corrente na preamar enchente, área das intervenções 5, 5.1, 5.2 e 5.3 (porção sul da rodovia) – cenário Futuro.

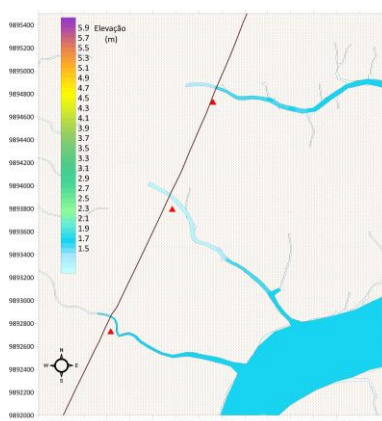


Figura 9 – Elevação na preamar enchente, área das intervenções 5, 5.1, 5.2 e 5.3 (porção sul da rodovia) – cenário Futuro.

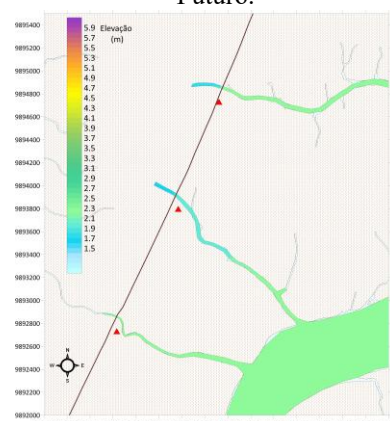


Figura 10 – Elevação na preamar enchente, área das intervenções 5, 5.1, 5.2 e 5.3 (porção sul da rodovia) – cenário 2070.

Para 2070, o aumento do nível do mar pode causar expansão das áreas inundadas e as velocidades de corrente serão maiores, podendo causar inundações permanentes de manguezais que hoje secam na maré baixa. Resumidamente, as modelagens confirmam que as intervenções propostas cumprem o papel de restabelecer o fluxo hídrico entre os dois lados da rodovia, gerando condições adequadas para a possível regeneração das áreas de manguezal.

Com os resultados das modelagens, foram determinadas as elevações máximas (preamar) para os cenários Futuro e 2070. A partir dessas elevações, foram geradas as manchas de inundação, cujas áreas se encontram na Tabela 4 e os mapas para as intervenções 1, 5.2 e 5.3 são apresentados nas Figuras 11 a 14. Com essas elevações foi possível aferir a capacidade hidráulica do canal projetado em “levar” água de um lado para o outro da rodovia, e para a planície das Salinas (Intervenção 4).

Intervenção	Área inundada após inserção das intervenções (km ²)	
	Cenário Futuro	Cenário 2070
1	1,65	2,73
4	0,056	0,070
5.1	0,001	0,0045
5.2	0,444	1,05
5.3	0,375	1,05

Tabela 4 – Áreas de inundação estimadas após a inserção das intervenções propostas.



Figura 11 – Mapa de inundação – elevação máxima – Intervenção 1 – Cenário Futuro.

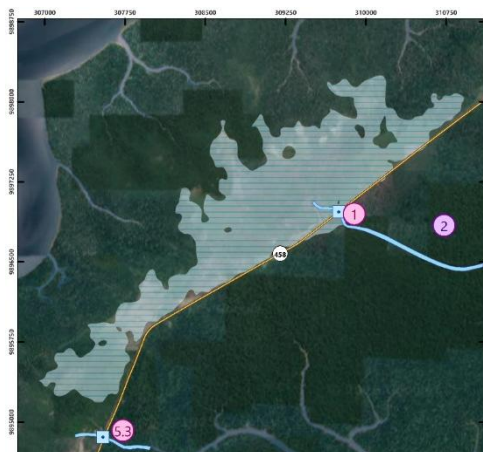


Figura 12 – Mapa de inundação – elevação máxima – Intervenção 1 – Cenário 2070.

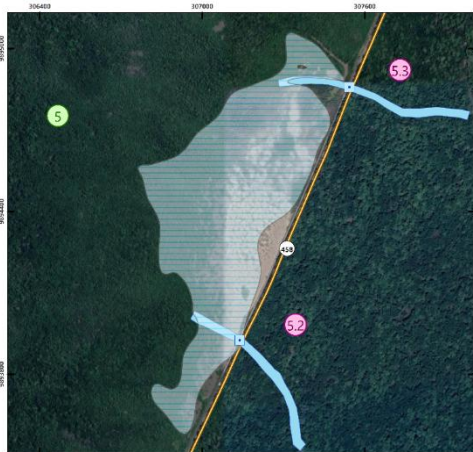


Figura 13 – Mapa de inundação – elevação máxima – Intervenção 5.2 – Cenário Futuro.



Figura 14 – Mapa de inundação – elevação máxima – Intervenção 5.3 – Cenário 2070.

Como esperado, ao considerar o aumento do NMM em 0,50 m em 2070, observou-se uma ampliação das áreas passíveis de inundação: a intervenção 1 apresenta as maiores áreas absolutas (até 2,73 km² em 2070), enquanto a intervenção 5.1 mostrou-se ser a menos eficiente. As intervenções 5.2 e 5.3 destacaram-se, com manchas que se sobrepõem e chegam a 1,05 km² no cenário de 2070; se implantadas separadamente, espera-se que tenham eficiências semelhantes, porém sugere-se a implantação de ambas, visando otimizar a renovação da água. Ressalta-se que os resultados foram obtidos utilizando dados de topografia SRTM (com resolução de 30m), sendo recomendados, para estudos futuros, levantamentos de topografia e batimetria mais detalhados nas áreas do entorno dos locais das intervenções.

Complementarmente, utilizando coeficientes de Kauffman et al. (2020), foi estimado o potencial de recuperação de biomassa e estoque de carbono: no cenário Futuro, a implementação das intervenções recuperaria 505 hectares de manguezal, representando 165 mil toneladas de biomassa e 78 mil toneladas de carbono estocado. Para o horizonte de 2070, o aumento da área inundada elevaria esses ganhos para 200 mil toneladas de biomassa e 94,5 mil toneladas de carbono.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As simulações com o SisBaHiA[®] permitiram um diagnóstico bastante adequado da hidrodinâmica no estuário do rio Caeté, uma vez que a calibração resultou em coeficientes de correlação variando entre 0,80 e 0,96, conferindo alta confiabilidade aos resultados. Os resultados das modelagens confirmaram que as intervenções propostas cumprem o papel de restabelecer o fluxo hídrico entre os dois lados da rodovia, gerando condições adequadas para a renaturalização do entorno da rodovia.

Entende-se que o sucesso dessas soluções depende da implementação integrada das IVCs propostas, uma vez que ações isoladas podem comprometer a eficiência hidráulica e ambiental. Ainda, deve-se olhar com parcimônia para os resultados de 2070, uma vez que a maior elevação do nível do mar pode ter como consequência a inundação permanente de manguezais que atualmente secam nos períodos de maré baixa.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Conservação Internacional Brasil por permitir publicar parte do “Estudo de alternativas de infraestruturas verde-cinza visando à renaturalização e ao restabelecimento da circulação hidrodinâmica nos canais de maré interceptados pela PA-458 (Bragança – Ajuruteua)” referente ao Contrato de Serviço 6011317 celebrado entre a EnvEx Engenharia e Consultoria Ltda e a Conservação Internacional do Brasil, executado entre os meses de abril e dezembro de 2025.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. *Manual de Drenagem de Rodovias*. Rio de Janeiro, IPR, 2 ed. DNIT, 2006.
- KAUFFMAN, J. B. et al. *Total ecosystem carbon stocks of mangroves across broad global environmental and physical gradients*. Ecological Monographs, v. 90, e01405, 2020. DOI: 10.1002/ecm.1405.
- PRANDLE, D., HASHEMI, M. R., & POPOVA, E. E. (2015). *Sensitivity of estuaries to sea level rise: Vulnerability indices*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 156, 106-114.
- RAMSAR. *Amazon Estuary and its Mang. Ramsar Sites Information Service*, [S.l.], 2018. Disponível em: <https://rsis.ramsar.org/ris/2337>.
- ROSMAN, P. C. C. *Referência Técnica do SisBaHiA[®]*. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2025. Disponível em: www.sisbahia.coppe.ufrj.br.