



Universidade Federal do Amapá
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais



TAÍS SILVA SOUSA

VARIABILIDADE DE SUPERFÍCIE DE ÁGUA NAS COSTAS OCEÂNICA E
ESTUARINA DO AMAPÁ

MACAPÁ – AP

2023

TAÍS SILVA SOUSA

VARIABILIDADE DE SUPERFÍCIE DE ÁGUA NAS COSTAS OCEÂNICA E
ESTUARINA DO AMAPÁ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Dr. Alan Cavalcanti da Cunha

MACAPÁ – AP

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central/UNIFAP-Macapá-AP
Elaborado por Mário das Graças Carvalho Lima Júnior – CRB-2 / 1451

S725 Sousa, Taís Silva.

Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá /
Taís Silva Sousa. - Macapá, 2023.
1 recurso eletrônico. 68 folhas.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-
graduação em Ciências Ambientais, Macapá, 2023.
Orientador: Alan Cavalcanti da Cunha.

Modo de acesso: World Wide Web.

Formato de arquivo: Portable Document Format (PDF).

1. Zona costeira. 2. Sistema de Informação Geográfica - SIG. 3. Bacias costeiras. I.
Cunha, Alan Cavalcanti da, orientador. II. Universidade Federal do Amapá. III.
Título.

CDD 23. ed. – 333.715098116

SOUSA, Taís Silva. **Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá.**
Orientador: Alan Cavalcanti da Cunha. 2023. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciências Ambientais. Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.

TAÍS SILVA SOUSA

**VARIABILIDADE DE SUPERFÍCIE DE ÁGUA NAS COSTAS OCEÂNICA E
ESTUARINA DO AMAPÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade Federal do Amapá, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Aprovada em 30 de agosto de 2023.

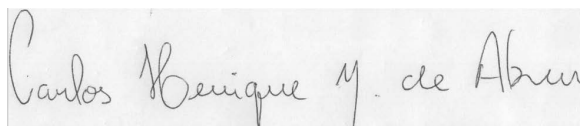
BANCA EXAMINADORA



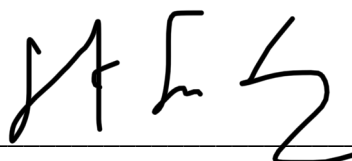
Alan Cavalcanti da Cunha – Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)



Gabriel de Oliveira - University of South Alabama (USA)



Carlos Henrique Medeiros de Abreu – Universidade do Estado do Amapá (UEAP)



Sávio Luís Carmona dos Santos - Universidade Federal do Amapá (UNIFAP)

PREFÁCIO

Esta dissertação possui uma parte introdutória seguida por um capítulo contendo o artigo intitulado “**Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil**”, submetido ao periódico *Environmental Science and Pollution Research* (Qualis A2 na área de Ciências Ambientais). O artigo está formatado segundo as normas da própria revista.

RESUMO

SOUSA, T. S. **Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá**. 68f. Dissertação – Departamento de Meio Ambiente e Desenvolvimento, Universidade Federal do Amapá, Macapá, 2023.

As zonas costeiras são constituídas por ambientes de transição entre os ecossistemas marinhos e terrestres, possuindo grande relevância ecológica e econômica. O estado do Amapá é marcado por abrigar a zona costeira mais preservada e menos povoada do Brasil. Todavia, esta possui uma dinâmica complexa, além de elevada vulnerabilidade aos processos antrópicos e hidroclimáticos. Neste contexto, o objetivo da pesquisa é analisar a variabilidade das superfícies de água tanto na costa oceânica quanto na estuarina do Amapá no período 1985-2022, e correlacioná-las com variáveis hidroclimáticas (precipitação e elevação do nível do mar) e antrópicas (soja e mineração). A metodologia abrangeu as seguintes etapas: 1) obtenção de séries temporais de superfície de água por município costeiro e de variáveis hidroclimáticas e antrópicas, bem como sua análise quantitativa e espaço-temporal usando Sistemas de Informação Geográfica-SIG; 2) análises das características ambientais e fisiográficas das bacias costeiras; e 3) integração e modelagem estatística dos dados para testar potenciais correlações que expliquem as variações de superfícies de água. Os resultados sugerem que as superfícies de água, no decorrer dos anos (1985-2022), sofreram acréscimos significativos. Tais variações ocorreram principalmente no setor costeiro oceânico ($\approx 35,57\%$) em relação ao setor costeiro estuarino ($\approx 32,63\%$). Apesar disso, o município costeiro estuarino Cutias do Araguari foi o que teve isoladamente o maior acréscimo de superfície de água no período analisado ($\approx 86,39\%$ em relação ao estágio inicial), seguido pelo município costeiro oceânico Calçoene ($\approx 73,47\%$ em relação ao estágio inicial). Em parte, essa variação nas superfícies das águas pode ter sido influenciada por variáveis antrópicas, sobretudo a superfície de plantio de soja ($p < 0,05$). Todavia, os fatores hidroclimáticos também apresentaram relativo grau de influência, principalmente a elevação do nível do mar ($p < 0,05$). Conclui-se que estão ocorrendo consideráveis mudanças hidrológicas na zona costeira do Amapá, e estas podem causar impactos e desequilíbrios em todo o ambiente. Os resultados obtidos são contribuições inéditas para o planejamento e gerenciamento costeiro do estado do Amapá, onde há notória escassez de informações sobre sua importância para os ecossistemas aquáticos.

Palavras-chave: Zona costeira, SIG, Bacias costeiras, Elevação do nível do mar, Soja, Gerenciamento costeiro.

ABSTRACT

SOUSA, T. S. **Water surface variability in oceanic and estuarine coasts of Amapá.** 68p. Master Thesis – Department of Environment and Development, Federal University of Amapá, Macapá, 2023.

Coastal zones are made up of transition environments between marine and terrestrial ecosystems, with great ecological and economic relevance. The state of Amapá is known for having the most preserved and least populated coastal zone in Brazil. However, this has a complex dynamic, in addition to high vulnerability to anthropic and hydroclimatic processes. In this context, the objective of the research is to analyze the variability of water surfaces both on the oceanic and estuarine coasts of Amapá in the period 1985-2022, and to correlate them with hydroclimatic (precipitation and sea level rise) and anthropic (soy and mining). The methodology covered the following steps: 1) obtaining time series of water surface by coastal municipality and of hydroclimatic and anthropic variables, as well as their quantitative and space-time analysis using Geographic Information Systems-GIS; 2) analyzes of environmental and physiographic characteristics of coastal basins; and 3) data integration and statistical modeling to test potential correlations that explain water surface variations. The results suggest that the water surfaces, over the years (1985-2022), suffered significant increases. Such variations occurred mainly in the oceanic coastal sector ($\approx 35.57\%$) in relation to the estuarine coastal sector ($\approx 32.63\%$). Despite this, the estuarine coastal municipality Cutias do Araguari was the one that had the highest increase in water surface in the analyzed period ($\approx 86.39\%$ in relation to the initial stage), followed by the oceanic coastal municipality Calçoene ($\approx 73.47\%$ compared to the initial stage). In part, this variation in water surfaces may have been influenced by anthropogenic variables, especially the soy planting surface ($p < 0.05$). However, hydroclimatic factors also had a relative degree of influence, mainly sea level rise ($p < 0.05$). It is concluded that considerable hydrological changes are taking place in the coastal zone of Amapá, and these can cause impacts and imbalances in the entire environment. The results obtained are unprecedented contributions to coastal planning and management in the state of Amapá, where there is a notorious lack of information about its importance for aquatic ecosystems.

Keywords: Coastal zone, GIS, Coastal basins, Sea level rise, Soy, Coastal management.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	8
2. PROBLEMA E HIPÓTESE	10
3. OBJETIVOS	10
3.1 Objetivo geral	10
3.2 Objetivos específicos	10
REFERÊNCIAS	11
ARTIGO CIENTÍFICO.....	13
Resumo	14
Abstract	15
1. Introdução	15
2. Material e métodos	17
2.1. Área de estudo	17
2.2. Modelo conceitual do estudo	19
2.3. Etapa I: Aquisição e análise de séries temporais de superfície de água	19
2.4. Etapa II: Aquisição e análise de dados hidroclimáticos e antrópicos	20
2.5. Etapa III: Aquisição e análise geospacial das bacias costeiras	22
2.6. Etapa IV: Integração e análise estatística dos dados.....	24
3. Resultados e discussão.....	25
3.1. Bacias costeiras estuarinas e oceânicas do Amapá	25
3.2. Análises geospaciais e quantitativas da superfície de água nos municípios costeiros do Amapá	28
3.3. Análises integradas da superfície de água e variáveis hidroclimáticas e antrópicas 	31
4. Conclusão	40
5. Agradecimentos	41
6. Referências	41
MATERIAL SUPLEMENTAR	47
Suplemento de figuras	47
Suplemento de tabelas	53

1. INTRODUÇÃO GERAL

As zonas costeiras são espaços geográficos de transição entre ambientes terrestres e marinhos, incluindo seus recursos ecológicos (Cabrera e Lee, 2022). São caracterizadas por sua relevância, tanto ecológica, na prestação de serviços ecossistêmicos e rica biodiversidade, quanto socioeconômica, considerando sua logística de acesso (transporte), pesca, comércio marítimo, balneabilidade e turismo (Horta et al., 2020; Cunha et al., 2021; Lakshmi, 2021; Cabrera e Lee, 2022).

As zonas costeiras abrigam cerca de $\approx 41\%$ da população mundial e constituem uma das áreas mais urbanizadas e desenvolvidas do mundo (Martínez et al., 2007; Luijendijk et al., 2018). O Brasil é um dos países com maior área de ecossistemas aquáticos, e grande parte é conectada e influenciada pelos ambientes costeiros (Martínez et al., 2007).

A costa brasileira se estende de 4° N a 34° S de latitude, com aproximadamente ≈ 8.500 km abrangendo 17 estados dos 26 existentes, a saber: Amapá, Pará, Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia, Espírito Santo, Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul (Pereira et al., 2009; IBGE, 2011). Mas também é marcada por um alto grau de impactos decorrentes, sobretudo, da ação antrópica, haja vista que 26.58% da população brasileira (de acordo com o censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE 2010) vive nessas zonas costeiras (IBGE, 2011).

Dos 8.500 km correspondentes a zona costeira do Brasil, 35% é relativo à zona costeira amazônica brasileira, que está localizada entre o rio Oiapoque no Amapá (5° N, 51° W) e a baía de São Marcos no Maranhão (2° S, 44° W), abrangendo três estados brasileiros (Amapá, Pará e Maranhão) (Pereira et al., 2009; IBGE, 2011). Esta área possui uma dinâmica complexa e única, por ser influenciada e banhada pelo maior rio do mundo (o rio Amazonas) e dependentes de marés oceânicas originadas no Atlântico. Esta zona costeira apresenta elevada precipitação (≈ 3.300 mm/ano) e temperatura ($>26^\circ$ C), além de intensa pressão antrópica (Pereira et al., 2009; Ward et al., 2013; Cunha e Sternberg, 2018; Abreu et al., 2020; Santos et al., 2022).

A zona costeira do Amapá constitui um subsistema da zona costeira amazônica brasileira, cuja extensão é de mais de 600 km, sendo considerada a mais preservada e menos densamente povoada do país (Takiyama e Silva, 2009). É possível descrever dois setores costeiros do Amapá: o estuarino, caracterizado como a região mais habitada e dinâmica economicamente; e o oceânico/atlântico, com imensas riquezas naturais e potencial ecológico, porém é considerado o setor menos conhecido e estudado da literatura (Torres e El Robrini, 2018; Rodrigues e Silva Júnior, 2021).

Esta área, assim como a maior parte das zonas costeiras do mundo, sofre com a intensa pressão antrópica e intensificação de processos hidroclimáticos, os quais causam desequilíbrios ambientais e aumentam sua vulnerabilidade (Felix Neto et al., 2021; Santos et al., 2021). Entre os principais impactos destacam-se as alterações das superfícies de água, resultando na criação de novos deltas e significativas mudanças geomorfológicas nas bacias costeiras (Pekel et al., 2016; Santos et al., 2018; Souza Jr et al., 2019; Araújo et al., 2020; Palazzoli et al., 2023).

O uso e ocupação do solo nessa região não dispõe de planejamento estratégico, elevando sua vulnerabilidade e tendência aos riscos crescentes de impactos ambientais, em especial nas desembocaduras dos rios. Por exemplo, a expansão de lavouras temporárias de culturas anuais, como a soja, e a intensa atividade mineral no Amapá, potencialmente, tem aumentado os riscos de impactos diretos e indiretos nas bacias e municípios costeiros (Araújo et al., 2020).

Dessa forma, esses processos e ameaças ratificam a importância de estudos sobre a evolução da dinâmica espaço-temporal dos ambientes costeiros da Amazônia Oriental. Não somente isso, mas também avaliar seus efeitos sobre a dinâmica e qualidade dos recursos hídricos em bacias remotas ou muito pouco conhecidas hidrologicamente no estado do Amapá. Estes fatores justificam novas investigações sobre o tema, as quais são necessárias para testar a eficiência e o desenvolvimento de novas abordagens técnicas que possam ser utilizadas na mitigação de problemas costeiros, com destaque à variação de superfície de água.

As metodologias aplicadas e integradas na presente pesquisa possibilitam quantificar alguns avanços científicos da área de ciências ambientais, principalmente aumentando a capacidade de suporte técnico que permita subsidiar e garantir a gestão e a resiliência dos corpos hídricos. Além disso, ao longo das últimas décadas, os impactos ambientais nas bacias hidrográficas estão se revelando cada vez mais relevantes frente às novas condições climáticas e hidrológicas extremas ou dependentes do uso e ocupação da terra (Giulio et al., 2019; Szlafsztein e Araújo, 2021).

Assim, a presente pesquisa é uma contribuição científica inédita e integra informações concernentes ao planejamento, monitoramento e gerenciamento dos recursos hídricos costeiros do estado do Amapá (Silva e Farias Filho, 2019). Auxiliando com informações para formulação e implementação de políticas públicas visando a conservação desses ambientes, a fim de minimizar os impactos e garantir o desenvolvimento sustentável da região (Szlafsztein e Araújo, 2021).

2. PROBLEMA E HIPÓTESE

O problema que orientou a presente pesquisa é definido da seguinte forma: as variações de superfície de água na zona costeira do Amapá estão correlacionadas com variáveis antrópicas (Superfície de plantio de soja e superfície de mineração) e hidroclimáticas (Elevação do nível do mar e precipitação total), sendo distintos os níveis de explicabilidade dessas variáveis nos setores estuarino e oceânico?

Em função da pergunta principal, foi testada a seguinte hipótese: a variabilidade da superfície de água na zona costeira do Amapá pode ser explicada pela dinâmica espaço-temporal das variáveis antrópicas e hidroclimáticas, sendo maior esta influência no setor estuarino ($p < 0,05$), em relação ao oceânico ($p > 0,05$). Isso deve ocorrer devido o setor estuarino sofrer com intensa pressão antrópica em relação ao setor oceânico, destacando-se o uso e a ocupação do solo sem planejamento sustentável.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Analisar a variabilidade espaço-temporal das superfícies de água dos municípios costeiros oceânicos e estuarinos do Amapá no período 1985 a 2022.

3.2 Objetivos específicos

- Avaliar espaço-temporalmente a variabilidade da superfície de água nos municípios costeiros do Amapá, destacando-se as áreas que sofreram maiores variações (acréscimos/decrécimos de água) no período analisado;
- Correlacionar estatisticamente a variabilidade das superfícies de água com variáveis hidroclimáticas e antrópicas, as quais foram previamente selecionadas, verificando aquelas que apresentam maior potencial explicativo;
- Identificar e analisar geoespacialmente as características ambientais e fisiográficas das bacias costeiras do estado do Amapá, como subsídio básico ao planejamento dos recursos hídricos locais.

REFERÊNCIAS

- Abreu CHM, Barros MLC, Brito DC, Teixeira MR, Cunha AC (2020) Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the Estuary of the Lower Amazon River. *Water* 12:60-30. <https://doi.org/10.3390/w12030660>
- Araújo AN, Cruz MLB, Silva CN, Rossete AN (2020) Dinâmica da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do rio Araguari (Amapá, Amazônia, Brasil). *Revista InterEspaço* 6:1-13. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.e202003>
- Cabrera JS, Lee HS (2022) Coastal Zone Environment Integrity Assessment for Sustainable Management: Part 1. Development of Adaptive Expert-Driven Coastal Zone Health Index Framework. *Journal of Marine Science and Engineering* 10:1183. <https://doi.org/10.3390/jmse10091183>
- Cunha AC, Abreu CHM, Crizanto JLP, Cunha HFA, Brito AU, Pereira N (2021) Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic areas of the Lower Amazon River. *Marine Pollution Bulletin* 168:112404. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112404>
- Cunha AC, Sternberg LSL (2018) Using stable isotopes ^{18}O and ^2H of lake water and biogeochemical analysis to identify factors affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. *Hydrological Processes* 32:1188-1201. <https://doi.org/10.1002/hyp.11462>
- Felix Neto JC, Souza LJA, Abreu CHM, Bárbara VF, Cunha HFA, Dias MT, Cunha AC (2021) Impactos hidroclimáticos de curto prazo no padrão hidrodinâmico de Rio de Estuário Amazônico, Amapá (AP), Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 12:161-179. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0014>
- Giulio GM, Torres RR, Vasconcellos MP, Braga DRGC, Mancini RM, Lemos MC (2019) Extreme events, climate change and adaptation in the State of São Paulo. *Ambiente e Sociedade* 22:e02771. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0277r1vu19L4AO>
- Horta P, Pinho PF, Gouvêa L, Grimaldi G, Destri G, Muller CM, Rocha L, Barufi JB, Rorig L, Assis J, Cunha LC (2020) Mudanças Climáticas e a zona costeira do Brasil: vulnerabilidades socioambientais e estratégias de ação. *Sustentabilidade em Debate* 11:425-444.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011) Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Editora, Rio de Janeiro 1-173.
- Lakshmi A (2021) Coastal ecosystem services & human wellbeing. *Indian J Med Res.* 153:382-387. https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_695_21
- Luijendijk A, Hagenaars G, Ranasinghe R, Baart F, Donchyts G, Aarninkhof S (2018) The State of the World's Beaches. *Sci Rep* 8:6641. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24630-6>
- Martínez ML, Intralawan A, Vázquez G, Pérez-Maqueo O, Sutton P, Landgrave R (2007) The coasts of our world: Ecological, economic and social importance. *Ecological Economics* 63:254-272. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2006.10.022>
- Palazzoli I, Montanari A, Ceola S (2023) Contribution of anthropogenic and hydroclimatic factors on the variation of surface water extent across the contiguous United States. *Environ. Res. Commun.* 5:051006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acd510>

- Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, Belward AS (2016) High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540:418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pereira LCC, Dias JA, Do Carmo JA, Polette MA (2009) Zona Costeira Amazônica Brasileira. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management* 9:3-7. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340126001>
- Rodrigues MRC, Silva Junior OMS (2021) Panorama Geral Da Zona Costeira Do Estado Do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14:1654-1674. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674>
- Santos VF, Nobre Júnior BB, Souza FM, Silva LMA (2022) Amapá: Um Estado Costeiro - Reflexões sobre Vulnerabilidades, Riscos e Adaptações a Mudanças Climáticas. In: Porto J (Org.). (ed) *Encontros e percepções geográficas: diálogos e provocações*, vol 1. Editora Uniedusul, Maringá-PR, pp 110-132. <https://doi.org/10.51324/54180221.8>
- Santos MRS, Vitorino MI, Pereira LCC, Pimentel MAS, Quintão AF (2021) Socioenvironmental Vulnerability to Climate Change: Conditions of Coastal Municipalities in Pará State. *Ambiente e Sociedade* 24:1-24. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200167r1vu2021L3AO>
- Santos ES, Lopes PPP, Nascimento OO, Pereira HHS, Collin R, Sternberg LSL, Cunha AC (2018) The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of the Total Environment* 624:887-899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>
- Silva JS, Farias Filho MS (2019) Expansão Urbana e Impactos Ambientais na Zona Costeira Norte do Município de São Luís (MA). *Raega - O Espaço Geográfico em Análise* 46:07-24. <https://revistas.ufpr.br/raega/article/view/52552>
- Souza Jr CM, Kirchoff FT, Oliveira BC, Ribeiro JG, Sales MH (2019) Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. *Water* 11: 566. <https://doi.org/10.3390/w11030566>
- Szlafsztein CF, Araújo ANB (2021) Autonomous flood adaptation measures in Amazonian cities (Belem, Brazil). *Natural Hazards* 108:1069–1087. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04720-x>
- Takiyama LR, Silva URL (2009) Experiências na Utilização de Metodologias Participativas para a Construção de Instrumentos de Gestão Costeira no Estado do Amapá, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management* 9:33-45. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340126003>
- Torres AM, El Robrini M, Costa WJP (2018) Panorama da erosão costeira - Amapá, in: Muehe D. (Ed.), *Panorama Da Erosão Costeira No Brasil*. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 1-761.
- Ward ND, Keil RG, Medeiros PM, Brito DC, Cunha AC, Dittmar T, Yager PL, Krusche AV, Richey JE (2013) Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. *Nature Geoscience (Print)* 6: 530-533.

ARTIGO CIENTÍFICO

Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil

Artigo submetido ao periódico “Environmental Science and Pollution Research”

Variabilidade de superfície de água nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil

Taís Silva Sousa^a, Elizandra Perez Araújo^b, Alan Cavalcanti da Cunha^c

^a Cientista Ambiental. Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, S/N, Jardim Marco Zero, Amapá, 66.900-000, Brasil.

^b Mestre em Biodiversidade Tropical. Doutoranda na Rede Bionorte, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, S/N, Jardim Marco Zero, Amapá, 66.900-000, Brasil.

^c PhD em Hidráulica e Saneamento. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Amapá (UNIFAP), Rodovia Josmar Chaves Pinto, km 02, S/N, Jardim Marco Zero, Amapá, 66.900-000, Brasil.

Resumo

A zona costeira do Amapá é a mais preservada e menos povoada do Brasil, onde coexistem diversos e complexos ecossistemas sensíveis às variações hidroclimáticas e pressões antrópicas. A região é também a menos estudada e conhecida, apesar de sua notável relevância hídrica e ecológica. O objetivo da pesquisa é analisar a variabilidade das superfícies de água tanto na costa oceânica quanto na estuarina no período 1985-2022, e correlacioná-las com variáveis hidroclimáticas (precipitação e elevação do nível do mar) e antrópicas (soja e mineração). A metodologia abrangeu as seguintes etapas: 1) obtenção de séries temporais de superfície de água por município costeiro e de variáveis hidroclimáticas e antrópicas, bem como sua análise espaço-temporal usando Sistemas de Informação Geográfica-SIG; 2) análises das características ambientais e fisiográficas das bacias costeiras; e 3) integração e modelagem estatística dos dados para testar potenciais correlações que expliquem as variações de superfícies de água. Os resultados indicam que as superfícies de água sofreram distintos e significativos acréscimos, influenciados principalmente pela expansão da soja e pela elevação do nível do mar ($p < 0.05$). Além disso, o setor oceânico apresentou maior influência simultânea das variáveis antrópicas e hidroclimáticas ($R^2_{aj} = 90.55\%$) em comparação com o setor estuarino ($R^2_{aj} = 62.46\%$). Conclui-se que estão ocorrendo consideráveis mudanças hidrológicas na zona costeira do Amapá, sugerindo urgência e prioridades no gerenciamento e conservação desses sensíveis ecossistemas costeiros.

Palavras-chave: Bacias costeiras; SIG; Soja; Elevação do nível do mar; Ecossistemas costeiros; Gerenciamento.

Abstract

The coastal zone of Amapá is the most preserved and least populated in Brazil, where diverse and complex ecosystems, sensitive to hydroclimatic variations and anthropogenic pressures, coexist. The region is also the least studied and known, despite its remarkable water and ecological relevance. The objective of the research is to analyze the variability of water surfaces both on the oceanic and estuarine coasts in the period 1985-2022, and to correlate them with hydroclimatic (precipitation and sea level rise) and anthropic (soy and mining) variables. The methodology covered the following steps: 1) obtaining time series of water surface by coastal municipality and of hydroclimatic and anthropic variables, as well as their space-time analysis using Geographic Information Systems-GIS; 2) analyzes of environmental and physiographic characteristics of coastal basins; and 3) data integration and statistical modeling to test potential correlations that explain water surface variations. The results indicate that the water surfaces suffered distinct and significant increases, mainly influenced by the expansion of soy and sea level rise ($p < 0.05$). Furthermore, the oceanic sector had a greater simultaneous influence of anthropic and hydroclimatic variables ($R^2_{aj} = 90.55\%$) compared to the estuarine sector ($R^2_{aj} = 62.46\%$). It is concluded that considerable hydrological changes are taking place in the coastal zone of Amapá, suggesting urgent priorities in the management and conservation of these sensitive coastal ecosystems.

Keywords: Coastal basins; GIS; Soy; Sea level rise; Coastal ecosystems; Management.

1. Introdução

A zona costeira é caracterizada pela conexão entre ambientes terrestres e marinhos (Cabrera e Lee 2022). É o ecossistema mais produtivo do planeta, tanto ecologicamente, pela mega biodiversidade e prestação de serviços ecossistêmicos, quanto economicamente, pelas logísticas de acesso a transportes e comércios marítimos (Neumann et al. 2015; Horta et al. 2020; Cunha et al. 2021; Lakshmi 2021; Cabrera e Lee 2022).

A intensa pressão antrópica e a influência das mudanças climáticas nessas áreas têm causado desequilíbrios nesses ecossistemas, tornando-os extremamente vulneráveis (Curtis 2019; Horta et al. 2020; Dube et al. 2021). Por exemplo, as superfícies de água têm sido significativamente alteradas por distúrbios no equilíbrio dinâmico de ecossistemas estuarinos ou flúvio-marinhos (Pekel et al. 2016; Souza Jr et al. 2019; Palazzoli et al. 2023), resultando na criação de novos deltas e mudanças geomorfológicas nas bacias costeiras (Santos et al. 2018; Araújo et al. 2020). Como consequência tem ocorrido uma série de impactos ambientais decorrentes dessas mudanças, como aumento da suscetibilidade à intrusão salina em zonas lacustres (Cunha e Sternberg 2018; Hong et al. 2020), redução da duração das cheias e/ou aumento da frequência e intensidade das inundações (Passeri et al. 2015; Dube

et al. 2021; Sousa et al. 2023), maior susceptibilidade aos impactos decorrentes da elevação do nível do mar e especialmente a amplificação de marés (Khojasteh et al. 2020; Tagestad et al. 2021).

Na Amazônia brasileira, especialmente na zona costeira do Amapá, esses impactos também são recorrentes, porém são menos conhecidos e estudados. A costa do Amapá é caracterizada como hiperdinâmica, complexa e única, abrigando um mosaico de ecossistemas de grande relevância ambiental e fortemente dependentes do ciclo da água (IBGE 2011; Torres e El Robrini 2018; Rodrigues e Silva Júnior 2021).

As características hidroclimáticas e oceanográficas desta zona costeira são singulares, em comparação à outras regiões costeiras do Brasil. Isto é, apresenta forte dependência da dinâmica das águas costeiras, elevada precipitação anual (\approx até 3.300mm/ano, mas frequentemente ultrapassa os 4.100 mm/ano no município de Calçoene), altas temperaturas (26°C a 38°C), regime de macromarés (com valores máximos de até 12 m), e é banhada parcialmente pelo rio Amazonas, no setor estuarino, que representa 16% da água doce descarregada nos oceanos (Pereira et al. 2009; Ward et al. 2013; Cunha e Sternberg 2018; Abreu et al. 2020; Santos et al. 2022).

A zona costeira do estado do Amapá é considerada a mais preservada do Brasil. Apesar disso, há um contingente demográfico significativo nesta área (~90% da população), em cuja extensão ocorrem atividades portuárias e hidroviárias, extrativismo mineral, vegetal e animal, pecuária, e lavouras temporárias de culturas anuais, como a soja (Takiyama e Silva 2009; Santos et al. 2018; Torres e El Robrinni 2018; Cunha et al. 2021; Araújo et al. 2022). Como esta região possui naturalmente dinâmicas complexas e é muito vulnerável aos processos hidroclimáticos e antrópicos, o uso dos recursos naturais e a ocupação insustentáveis do solo sem o devido planejamento estratégico, tende a elevar os riscos de impactos no seu frágil e dinâmico equilíbrio (Felix Neto et al. 2021; Santos et al. 2021).

Nos últimos anos, porém, houve uma expansão considerável na plantação de soja e o uso intenso das atividades minerais no Amapá (Chelala e Chelala 2019; Araújo et al. 2020). Apesar de não pertencerem totalmente a zona costeira, essas atividades impactam forte e indiretamente as bacias costeiras contíguas, alterando processos hidrológicos e a distribuição de recursos hídricos (Lima 2011; Souza et al. 2019; Savi et al. 2020).

Além disso, as bacias costeiras oceânicas e estuarinas também tem sofrido com outros impactos, como casos de vazões extremas (Cunha 2013; Cunha et al. 2014), mudanças no fluxo hidrológico e morfologia das bacias (Santos et al. 2017; Silva et al. 2018), instalações de usinas hidrelétricas e alterações da amplitude e dinâmica das marés semidiurnas, o que tem provavelmente causado a intensificação das enchentes e inundações extremas (Oliveira e Cunha 2015; Abreu e Cunha 2017; Caramello e Kruger 2022; Santos e Avelar 2023).

Neste contexto, principalmente no que concerne à faixa costeira do estado do Amapá, tem sido desafiador entender a dinâmica de variação das águas superficiais. A principal razão é a escassez de informações pretéritas e a qualidade das informações disponíveis sobre o tema, o que dificulta planejamento, gestão e à tomada de decisão para o monitoramento e gerenciamento das águas costeiras em nível de bacias hidrográficas e municípios (Nicolodi et al. 2009; Silva Júnior et al. 2021).

Dessa forma, a presente pesquisa tem como objetivo principal analisar a variabilidade das superfícies de água dos setores costeiros oceânicos e estuarinos do Amapá no período 1985 e 2022, e correlacioná-las com variáveis previamente selecionadas, tais como as hidroclimáticas (Elevação do nível do mar e precipitação total) e antrópicas (Superfícies ocupadas por mineração e por plantio de soja). Como objetivo específico, identificar e caracterizar as bacias costeiras do estado, utilizando técnicas de geoprocessamento.

Esta investigação apresenta um caráter inédito e serve como subsídio técnico e científico em áreas-chave, especialmente no planejamento, monitoramento e gestão racional de recursos hídricos da Amazônia Oriental (Rocha e Santos 2018; Silva e Farias Filho 2019; Raiol et al. 2022). Trata-se de uma contribuição científica para potencialização do gerenciamento da zona costeira por unidade municipal, de modo a subsidiar políticas públicas mais eficientes frente aos atuais impactos das mudanças climáticas e antropogênicas (Cunha et al. 2019). Além disso, promove compreensão sobre a resiliência dos ecossistemas estuarinos e oceânicos, de eminente importância regional (Giulio et al. 2019; Szlafsztein e Araújo 2021).

Assim, o principal problema da pesquisa é definido da seguinte forma: as variações de superfície de água na zona costeira do Amapá estão correlacionadas com variáveis antrópicas e hidroclimáticas, ocorrendo diferenças significativas entre os setores costeiros oceânicos e estuarinos? Para tanto, testou-se a seguinte hipótese: a variabilidade da superfície de água na zona costeira do Amapá pode ser explicada pela dinâmica espaço-temporal das variáveis antrópicas e hidroclimáticas, sendo maior esta influência no setor estuarino, devido sua intensa pressão antrópica, em relação ao setor oceânico, que é menos antropizado.

2. Material e métodos

2.1. Área de estudo

A zona costeira do Amapá (Fig. 1) constitui um subsistema da zona costeira amazônica brasileira. Sua extensão é de mais de 600 km, banhando 11 municípios e abrigando aproximadamente 90% da população total do estado (Takiyama e Silva 2009). É marcada pela presença de ecossistemas com dinâmicas complexas e muito sensíveis à variabilidade hidrológica e à pressão antrópica (Takiyama e Silva 2009; Rodrigues e Silva Junior 2021).

A zona costeira amapaense se subdivide em dois setores, legalmente constituídos: o setor estuarino e o setor oceânico ou atlântico (Torres e El Robrini 2018).

O setor estuarino está localizado entre o leste e sul do estado do Amapá (Fig. 1), possui uma extensão de aproximadamente 236 km e abriga mais de 70% da população amapaense, compreendendo seis municípios: Cutias do Araguari, Itaubal do Pírim, Macapá, Santana, Mazagão e Vitória do Jari (Amapá 2007; Takiyama e Silva 2009). É neste setor que se localizam os principais núcleos urbanos do Amapá, Macapá e Santana, que devido às suas características de uso e ocupação do solo, torna essa área vulnerável a degradação ambiental (Cunha et al. 2021; Sousa et al. 2021). Há, portanto, a característica relevante desse setor costeiro estar localizado em um ponto geográfico situado entre o rio (Rio Amazonas e sua imensa bacia hidrográfica) e o Oceano Atlântico que o influencia significativamente em seu baixo curso, tornando-se mais suscetível aos impactos decorrentes dos eventos climáticos e elevação do nível do mar. É um dos estuários mais exclusivos do mundo, cujos padrões ambientais são únicos devido suas interações rio-mar (Bernardes et al. 2012; Abreu et al. 2020; Khojasteh et al. 2020; Crizanto 2021; Yu et al. 2022).

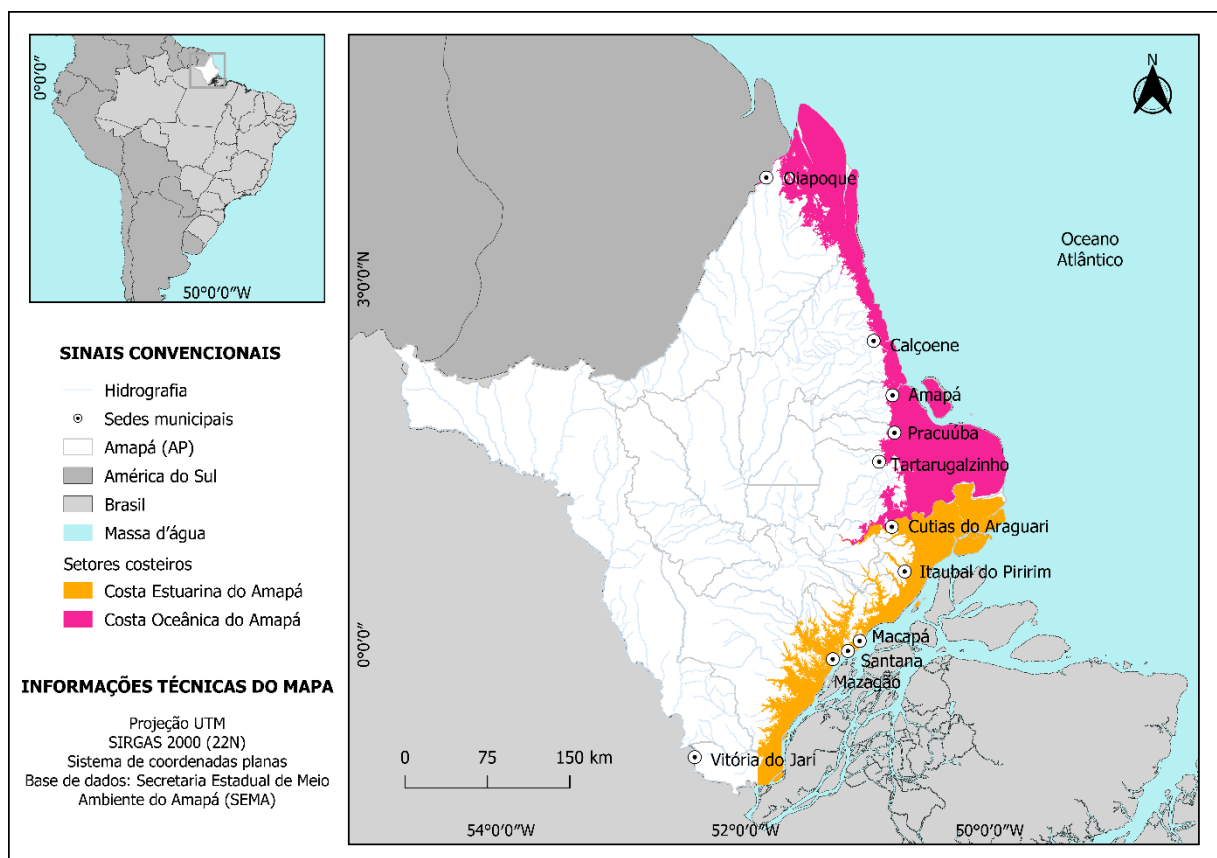


Fig.1 Área de estudo. Fonte: Autores (2023).

O setor oceânico ou Atlântico está localizado entre o norte e leste do estado do Amapá (Fig. 1) e possui cerca de 463 km de extensão. Diferentemente do setor estuarino, o setor oceânico não possui significativos contingentes populacionais. Todavia, é o setor menos estudado e, portanto, menos conhecido na literatura científica (Takiyama e Silva 2009). Mas abrange cinco municípios, sendo eles: Oiapoque, Calçoene, Amapá, Pracuúba e Tartarugalzinho (Amapá 2007). Além disso, essa região é marcada majoritariamente por riquezas ecológicas, destacando-se os manguezais. O manguezal é o principal ecossistema costeiro dessa área e berço de mega biodiversidade, embora esteja sofrendo significativas alterações nos últimos anos. Conseqüentemente, é apontado como a cobertura de manguezal mais instável do Brasil, em razão da provável influência da elevação do nível do mar além de fatores antrópicos disseminados, como o pastoreio extensivo de búfalos (Santos et al. 2018; Diniz et al. 2019; Visschers et al. 2022).

2.2. Modelo conceitual do estudo

O modelo conceitual (Fig. S1) representa simplificada um fluxograma das principais fases desta pesquisa. Este fluxograma foi estruturado a partir de quatro etapas metodológicas básicas. A primeira (I) é focada na aquisição de séries temporais de superfície de água para os municípios costeiros do Amapá (Mapbiomas - Água 2023), bem como sua tabulação, organização e análise geoespacial. A segunda etapa (II) é o processo de levantamento selecionado de dados hidroclimáticos - precipitação total (CHC 2023) e Elevação do nível do mar (NOAA 2023), além de dados antrópicos - superfície de produção de soja e mineração (Mapbiomas – LULC 2023). A terceira etapa (III) é referente à coleta de dados, identificação e análise geoespacial das características ambientais e fisiográficas das bacias costeiras do estado do Amapá (SEMA 2023). E a quarta etapa (IV), está relacionada à integração e modelagem estatística dos dados (referentes as etapas I e II).

2.3. Etapa I: Aquisição e análise de séries temporais de superfície de água

O levantamento de dados das superfícies de água foi feito usando o recorte geográfico dos municípios costeiros do Amapá. Para este propósito foi utilizada a Plataforma Mapbiomas-Água, considerada o primeiro e único conjunto brasileiro de dados de águas superficiais aplicável aos Sistemas de Informações Geográficas – SIG (Souza Jr et al. 2019).

Foram utilizadas as séries temporais de dados quantitativos disponíveis na plataforma no período entre 1985 e 2022, organizados em planilhas eletrônicas no Excel para análises estatísticas posteriores. Além disso, também se utilizou dados geoespaciais (em GeoTIFF) disponíveis de 1985 a 2020 acessados pelo plugin Mapbiomas-Água

no *Google Earth Engine* (Gorelick et al. 2017), e posteriormente analisados em SIG para a produção de mapas no software Qgis 3.22.12 (Hoffmann et al. 2018). Ressalta-se que a atualização dos dados nas plataformas Mapbiomas-água e seu plugin no *Google Earth Engine* não ocorrem no mesmo período. Por isso, há essa diferença entre o intervalo temporal dos dados geoespaciais e quantitativos.

A base de dados geral de superfície de água foi gerada a partir da análise de mais de 190 mil cenas Landsat com resolução espacial de 30 m, resultado da combinação dos sensores *Landsat Thematic Mapper* (TM), *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) e *Operational Land Imager* (OLI), a bordo do Landsat 5, Landsat 7 e Landsat 8, respectivamente (Souza Jr et al. 2020). Estas foram analisadas no *Google Earth Engine* através do modelo espectral de mistura, que estima a composição sub-pixel de pixels Landsat. Outros estudos também utilizaram essa metodologia para mapeamento em corpos d'água (Zhang et al. 2004; Halabisky et al. 2016; Souza Jr et al. 2019). Detalhes desse modelo e suas aplicações no Brasil podem ser consultadas na Plataforma Mapbiomas – Água (2023).

2.4. Etapa II: Aquisição e análise de dados hidroclimáticos e antrópicos

A variabilidade de superfícies de água é afetada pelo clima e atividades antrópicas (Pekel et al. 2016). Por isso, este estudo selecionou duas variáveis hidroclimáticas e duas antrópicas para testar essa hipótese.

As variáveis hidroclimáticas, elevação do nível do mar e precipitação total, foram escolhidas devido a predominância de estudos anteriores que atestaram sua influência na variabilidade das águas superficiais, principalmente em regiões costeiras (Langerwisch et al. 2013; Passeri et al. 2015; Bonfim et al. 2020; Hong et al. 2020; Khojasteh et al. 2020; Palazzoli et al. 2023). Apesar das marés terem comprovadamente sua importância e influência principalmente nas pequenas bacias costeiras (Cunha e Sternberg 2018; Abreu et al. 2020; Tagestad et al. 2021), não foi possível adicioná-las ao estudo devido às dificuldades de acesso e escassez de séries temporais contínuas desses dados para a região costeira do Amapá (Crizanto 2021).

A série temporal de dados de elevação do nível do mar é de 1993 a 2022 e foi adquirida no Laboratório de Altimetria por Satélite – LSA da Administração Nacional Oceânica e Atmosférica – NOAA. Esses dados são resultados de estimativas da elevação do nível do mar com base em medições de altímetros de radar de satélite, que podem ser combinados com órbitas de satélites conhecidas com precisão para medir o nível do mar em uma base global. O primeiro satélite implantado com esse objetivo foi o TOPEX/Poseidon (T/P) em 1993, seguido de Jason-1 (2001–2013), Jason-2 (2008–2019) e Jason-3 (2016–presente), os quais são responsáveis por estimar o nível médio do mar com uma incerteza de 3–4 mm (NOAA 2023). Apesar de pertencerem a uma série temporal

com início mais recente (1993) que os demais dados (1985), é a única publicamente disponível, e por esta razão foi a utilizada como variável independente para analisar sua influência na variação de superfície de água (Pekel et al. 2016).

A série temporal de dados de precipitação total do Amapá é de 1985 a 2022 e foi adquirida na *Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data* (CHIRPS), banco de dados produzido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e Centro de Riscos Climáticos (CHC) da Universidade da Califórnia - Santa Bárbara (UCSB). Esses dados foram resultados de técnicas de interpolação inteligente de alta resolução ($0,05^\circ$), com algoritmo que incorpora as informações de satélite da NOAA e NASA (Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço) para estimar a precipitação com base em observações infravermelhas de duração de nuvens frias (Funk et al. 2015). No Brasil, assim como em outros países, há escassez de registros longos de precipitação o que dificulta a análise de cientistas sobre o contexto histórico do clima (Funk et al. 2015). Uma alternativa oportuna e confiável é utilizar a precipitação por satélite quando é inviável o uso de redes pluviométricas tradicionais (Shen et al. 2020). As estimativas de precipitação utilizando o CHIRPS já foram testadas e validadas em várias regiões do mundo, como por exemplo no Nordeste do Brasil (Paredes-Trejo et al. 2017), Argentina (Rivera et al. 2018), Chile (Zambrano et al. 2017), e na China (Bai et al. 2018). Isto ratifica que as estimativas do CHIRPS corroboram com as observações terrestres das redes pluviométricas locais, apresentando um ótimo desempenho.

As variáveis antrópicas, superfície de plantio/produção de soja e superfície de mineração, foram previamente escolhidas entre outras disponíveis da mesma classe, em razão de apresentarem aparente covariação com a variável superfície de água, podendo indicar, portanto, alguma correlação estatística significativa ($p < 0.05$).

As séries temporais de superfície de soja e mineração são também de 1985 a 2022 e foram adquiridas na plataforma Mapbiomas-LULC (2023). Os dados de soja pertencem ao nível 3 - Agropecuária, classe 3.2 - Agricultura, subclasse 3.2.1 - Lavoura Temporária, caracterizada como áreas predominantemente ocupadas por culturas anuais. E os dados de mineração pertencem ao nível 4 - Área não vegetada, classe 4.3- Mineração, definidas como áreas relacionadas à grande extração mineral, com exposição clara do solo devido ao maquinário pesado. Foram consideradas apenas as áreas de atividades minerais cadastradas legalmente e pertencentes à carta do Departamento Nacional de Produção Mineral (Sistema de Informações Geográficas da Mineração - SIGMINE) (Souza Jr et al. 2020). Os dados são resultados de análises das imagens da coleção Landsat (resolução espacial de 30 m) processados em nuvem no *Google Earth Engine*. Detalhes metodológicos são explicados por Souza Jr et al. (2020).

Após a aquisição de todos os dados, hidroclimáticos e antrópicos, foi feita a organização das séries temporais em planilhas eletrônicas Excel, para posteriormente serem estatisticamente analisadas no *software* R 4.0.3 (R Development Core Team 2020). É importante destacar que apesar de existir variações espaciais distintas (por exemplo, escala e resolução) nos conjuntos de dados analisados, não houve qualquer processo de transformação ou adequação espacial destes dados, com o intuito de preservar suas características e informações originais.

2.5. Etapa III: Aquisição e análise geospacial das bacias costeiras

Os dados geoespaciais (em *Shapefile*) das bacias hidrográficas e zona costeira do estado do Amapá foram adquiridos na Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Amapá – SEMA (2023), e os de hidrografia dos rios principais e demais cursos d'água tributários foram adquiridas na Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (2023).

Foi feita a análise das bacias hidrográficas e a identificação inédita das bacias costeiras. O processo ocorreu por cruzamento de informações espaciais no Qgis 3.22.12 da extensão da zona costeira estabelecida em lei (Lei nº 1089/2007) com as bacias hidrográficas disponibilizadas pela SEMA (2023). As bacias costeiras foram definidas como todas aquelas que possuíam pelo menos uma fração de sua área inserida e conectada à faixa costeira, portanto interagindo com o seu fluxo hidrológico (água, sedimentos, matéria orgânica) (Nicolodi et al. 2009; Torres e El Robrini 2018; Cunha e Sternberg 2018).

De acordo com sua localização e área de abrangência costeira, estas bacias hidrográficas foram classificadas em 5 classes: costeiro-estuarina parcial (localizadas no setor costeiro estuarino e integram sua área apenas parcialmente na zona costeira); costeiro-estuarina total (setor costeiro estuarino e integrando sua área total dentro da zona costeira); costeiro-oceânica parcial (setor costeiro oceânico integrando apenas parcialmente a zona costeira); costeiro-oceânica total (setor costeiro oceânico com área abrangendo totalmente a zona costeira); e costeiro-estuarino-oceânica parcial (integrando os dois setores costeiros, com área integrando apenas parcialmente a zona costeira). Estas classes foram processadas e posteriormente transformadas em mapas no Qgis 3.22.12 (Hoffmann et al. 2018).

Apesar dos últimos anos serem marcados por avanços nas informações hidrográficas e delineamento de limites de bacias hidrográficas e redes fluviais, o estado do Amapá, assim como grande parte do Brasil, ainda apresenta déficits consideráveis dessas informações (Nicolodi et al. 2009). E por isso os cientistas interessados em características adicionais de bacias hidrográficas ou rios, como os índices fisiográficos, são impelidos a derivar

esses dados de fontes alternativas, principalmente envolvendo procedimentos em SIG (Linke et al. 2019; Bogale 2021).

Os índices fisiográficos são componentes essenciais para compreender a variabilidade hídrica de uma bacia (Bastos 2010; Chagas et al. 2022). Desta forma, foram ineditamente calculados para todas as bacias costeiras do Amapá, usando-se o software Qgis 3.22.12, os seguintes índices: Área da bacia (km²), perímetro (km), coeficiente de compacidade (adimensional), comprimento do rio principal (km), comprimento total dos rios (km), e densidade de drenagem (km/km²).

A área (A) e o perímetro (P) são fatores primários de uma bacia, e são de extrema importância para determinar sua potencialidade e resposta hidrológica mediante eventos climáticos (Langbein et al. 1947; Bastos 2010; Rocha e Santos 2018; Santos et al. 2019). Estes parâmetros foram calculados utilizando a ferramenta “calculadora de campo” do Qgis 3.22.12.

O coeficiente de compacidade (Kc) expressa a razão entre o perímetro da bacia hidrográfica e o de um círculo de área igual à da bacia (Horton 1932; Venzon et al. 2018). Sua importância se destaca por representar a susceptibilidade natural (sem interferências de outras variáveis) da ocorrência de enchentes, ou seja, quanto menor o coeficiente (<1.25) mais susceptível é a bacia às enchentes e eventos extremos, considerando sua característica física e geométrica de concentrar o escoamento (Venzon et al. 2018; Santos et al. 2019; Chagas et al. 2022). Assim, Kc foi calculado utilizando a equação 1:

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (1)$$

O comprimento do rio principal e o comprimento total dos rios foram calculados em ambiente Qgis 3.22.12 utilizando a ferramenta “calculadora de campo”. O comprimento total dos rios ($\sum l$) foi obtido através da soma de todos os canais tributários (identificáveis na escala de estudo) - canais menores que desaguam no rio principal, e o rio principal - canal mais longo desde a extensão superior da bacia até o seu limite (Rai et al. 2018; Savi et al. 2020).

A densidade de drenagem (Dd) é um dos parâmetros que afeta o processo hidrológico da bacia hidrográfica e é definido como a razão entre a soma de todos os canais e a área da bacia (Bogale 2021; Gao et al. 2022). A densidade de drenagem pode influenciar significativamente a frequência dos regimes de vazões e pode variar de <0.5 km/km², para bacias de drenagem pobre, a >3.5 km/km² para bacias bem drenadas (Pallard et al. 2009; Bastos 2010). Desta forma, Dd foi calculado utilizando a equação 2:

$$Dd = \frac{\sum l}{A} \quad (2)$$

2.6. Etapa IV: Integração e análise estatística dos dados

Como a etapa III do modelo conceitual (Fig. S1) foi realizada primordialmente como subsídio para as discussões dos resultados e estudos futuros na área, a integração e análises estatísticas univariadas e multivariadas ($\alpha < 0.05$) se referem somente aos dados correspondentes às etapas I e II. Estas foram analisadas no *software* R 4.0.3 para testar as hipóteses gerais predefinidas em tópicos anteriores (R Development Core Team 2020). Após uma pré-seleção, um total de 18 variáveis foram analisadas. Dentre estas, 5 são variáveis independentes e 13 variáveis dependentes (descritas na tabela 1), todas no intervalo temporal de 38 anos (1985-2022), excetuando a elevação do nível do mar, restrita a apenas 30 anos coincidentes (1993-2022).

O teste de Shapiro-Wilk foi utilizado para testar a normalidade da distribuição das séries temporais, nas quais foram verificadas algumas variáveis com distribuição não-normais. Deste modo, a análise de correlação de Spearman foi utilizada e complementada por uma análise de componentes principais (PCA). O objetivo foi testar, respectivamente, a dependência e covariações das variáveis independentes e dependentes no tempo. Análises de regressões lineares simples e múltiplas também foram apresentadas para testar a explicabilidade das variáveis independentes pré-selecionadas e sua correlação com as variáveis dependentes (Crawley 2007).

No recorte geográfico das superfícies de água foram utilizadas as áreas dos municípios costeiros (Tabela 1), sendo o único disponível e detalhadamente satisfatório para o objetivo da pesquisa. Além disso, integra características necessárias às tomadas de decisão político-administrativas municipais e ao mesmo tempo em nível de bacias costeiras.

Tabela 1: Unidades de medidas das variáveis utilizadas e suas respectivas explicações. Fonte: Autores (2023).

		Variável	Explicação	Unidade
Variáveis Dependentes	Municípios Costeiros	HydS_Oia	Superfície de água do município de Oiapoque	ha
		HydS_Cal	Superfície de água do município de Calçoene	ha
		HydS_Ama	Superfície de água do município de Amapá	ha
		HydS_Pra	Superfície de água do município de Pracuúba	ha
		HydS_Tar	Superfície de água do município de Tartarugalzinho	ha
		HydS_Cut	Superfície de água do município de Cutias do Araguari	ha
		HydS_Ita	Superfície de água do município de Itaubal do Piririm	ha
		HydS_Mac	Superfície de água do município de Macapá	ha
		HydS_San	Superfície de água do município de Santana	ha

		HydS_Maz	Superfície de água do município de Mazagão	ha
		HydS_Vit	Superfície de água do município de Vitória do Jari	ha
	Setores Costeiros	HydS_Ocean	Soma da superfície de água de todos os municípios do setor costeiro oceânico	ha
		HydS_Estuarine	Soma da superfície de água de todos os municípios do setor costeiro estuarino	ha
Variáveis Independentes	Outras	Year	Intervalo temporal correspondente a cada variável	ano
		Prec_Tot	Precipitação total do estado do Amapá	mm
		SLR	Elevação do nível do mar global	mm
		SoyS	Superfície de plantio de soja do estado do Amapá	ha
		Mining	Superfície de mineração do estado do Amapá	ha

3. Resultados e discussão

3.1. Bacias costeiras estuarinas e oceânicas do Amapá

O estado do Amapá possui 38 bacias hidrográficas e todas elas, sem exceção, foram caracterizadas como bacias costeiras. Essa incrível característica decorre do fato de que o Amapá é um estado litorâneo, portanto, tem todo o seu fluxo hidrológico e rede de drenagem conectados e influenciados pela zona costeira (Nicolodi et al. 2009; Torres e El Robrini 2018; Santos et al. 2022). Das 38 bacias costeiras identificadas, 10 são Bacias Costeiras Oceânicas Parciais, 3 são Bacias Costeiras Oceânicas Totais, 15 são Bacias Costeiras Estuarinas Parciais, 9 são Bacias Costeiras Estuarinas Totais, e 1 é Bacia Costeira Estuarino-Oceânica Parcial (Fig. 2).

O conhecimento acerca das características ambientais e fisiográficas das bacias auxilia no entendimento das modificações que ocorrem no ambiente. No presente caso, o foco é a variabilidade de superfície de água. Considerando que o déficit informativo sobre as bacias costeiras pode impedir o planejamento estratégico dessas áreas e dificultar a manutenção e prestação dos seus serviços ecossistêmicos (Rocha e Santos 2018; Raiol et al. 2022), foi feita uma análise criteriosa dos índices fisiográficos (Tabela S1) das 38 bacias costeiras do estado.

Esta pesquisa mostrou, em termos gerais, que a bacia do Rio Araguari (Bacia Costeira Estuarino-Oceânica Parcial) é a maior do Amapá (Fig. 2, bacia [38]), com 45289.46 km² de área, coeficiente de compacidade de 1.76 e densidade de drenagem de 0.57 km/km² (Tabela S1). Isto é, naturalmente ela não possui tendência a enchentes e sua rede drenagem é considerada regular. Todavia, as atividades antrópicas têm a aparente capacidade de alterar esse estado drasticamente (Mazzoleni et al. 2022). Estudos anteriores comprovaram que a Bacia do Rio Araguari

tem apresentado desequilíbrios ambientais significativos com relação aos processos hidrológicos básicos e disponibilidade hídrica, especialmente nos casos de vazões extremas (Cunha 2013; Cunha et al. 2014), mortalidade e redução de peixes devido às frequentes mudanças no fluxo hidrológico e morfologia da bacia (Santos et al. 2017; Silva et al. 2018). Além disso, a expansão da pecuária extensiva tem sido evidenciada, em combinação com a influência da elevação do nível do mar (SLR) e a instalação de grandes usinas hidrelétricas no baixo curso do rio Araguari, são provas contundentes que corroboram o sensível processo de salinização de lagos costeiros estuarinos (Cunha e Sternberg 2018).

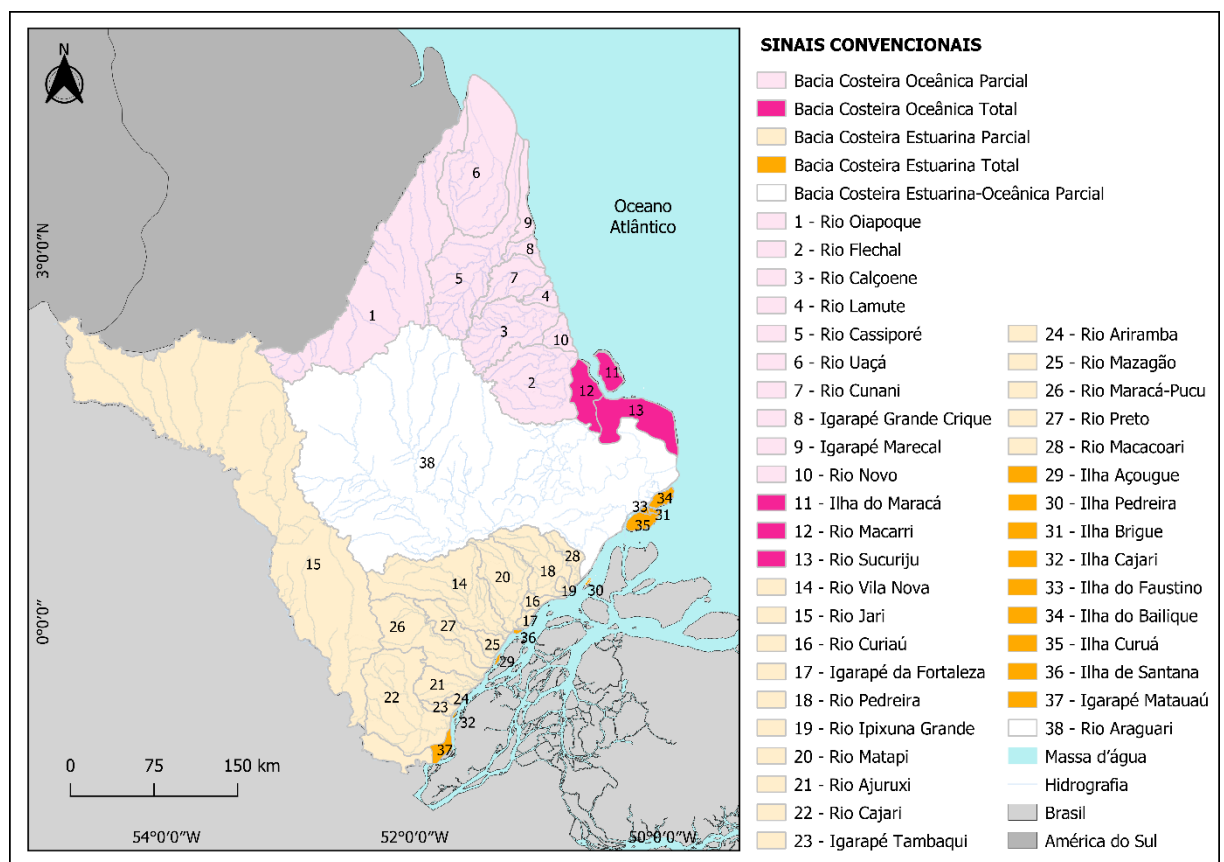


Fig.2 Identificação e classificação das bacias costeiras do Amapá. Fonte: Autores (2023). Fonte de dados geoespaciais: SEMA (2023).

A Bacia do Rio Jari (Fig. 2, bacia [15]) é a maior Bacia Costeira Estuarina Parcial, com 30471.44 km², coeficiente de compacidade de 3.00 e densidade de drenagem de 0.65 km/km² (Tabela S1). Ou seja, naturalmente, não é sujeita a enchentes e tem rede de drenagem regular. Entretanto, Abreu e Cunha (2017) evidenciam que o seu baixo trecho, próximo à confluência com o Rio Amazonas, sofre com influência de marés semidiurnas e com o impacto do uso e ocupação humana desordenada. Assim, estes fatores interferem e modificam consideravelmente

as características hidráulicas da bacia, tornando-a mais vulnerável a frequentes eventos extremos resultando em enchentes e até mesmo inundações nos centros urbanos de Laranjal do Jari e Vitória do Jari. Esta informação tem sido confirmada por Oliveira e Cunha (2015), Caramello e Kruger (2022), e Santos e Avelar (2023), os quais demonstraram que as frequentes inundações nos núcleos urbanos dessa área da bacia do Rio Jari acarretam significativos impactos antrópicos, de cunho urbano, sanitário, industrial e hidrelétrico.

Uma parte das Bacias Costeiras Estuarinas Totais fazem parte do Arquipélago do Bailique, distrito de Macapá. Entre elas, ressalta-se a Bacia Ilha Curuá (Fig. 2, bacia [35]), sendo a maior Bacia Costeira Estuarina Total, com área de 345.45 km², coeficiente de compacidade de 2.11 e densidade de drenagem de 0.28 km/km² (Tabela S1). Em outras palavras, naturalmente, não é sujeita a enchentes e sua rede de drenagem é extremamente pobre. Na Tabela S1, percebe-se que algumas bacias desta classe não foram analisadas (NA) completamente pela ausência de dados disponíveis (Fig. 2, bacias [29, 30, 32, 36]). Isso ocorre pelo fato de serem ilhas majoritariamente pequenas, longínquas e de difícil acesso. Situações como esta se estendem por todo o globo, por exemplo, os pequenos rios do ártico sofrem com a falta de conhecimento disponível atualizado e confiável para monitoramento e gestão dos recursos hídricos locais (Feng et al. 2021).

As Bacias Costeiras Oceânicas Parciais possuem seu território marcado por áreas protegidas (Unidades de Conservação e Terras Indígenas). Como destaque, ressaltou-se a Bacia do Rio Oiapoque (Fig. 2, bacia [1]), por ser a maior, com área de 12489.70 km², coeficiente de compacidade de 2.30 e densidade de drenagem de 0.53km/km² (Tabela S1). Ou seja, não possui susceptibilidade a enchentes e sua drenagem é regular. Porém, de acordo com Mancio Filho et al. (2022), a região é sujeita a fenômenos atmosféricos (El Niño e La Niña, Corrente Costeira Norte Brasileira, Zona de Convergência Intertropical, e Sistema de Dispersão do rio Amazonas), os quais podem provocar, por exemplo, alterações nas precipitações, e conseqüentemente podem influenciar e modificar seu ciclo hidrológico.

A Bacia do Rio Sucuriçu (Fig. 2, bacia [13]) é a maior Bacia Costeira Oceânica Total, com 2163.74km², com coeficiente de compacidade de 1.64 e densidade de drenagem de 0.49 km/km² (Tabela S1). Isto é, naturalmente, não possui tendência a enchentes e sua rede drenagem é considerada pobre. Contudo, esta bacia sofre influências de processos hidrodinâmicos de curtos períodos, como as marés semidiurnas, que intensificam e instabilizam seu fluxo hidrológico (Sautchuk 2011; Xavier et al. 2017). Dessa forma, ressalta-se a importância do presente estudo quanto a atualização das informações sobre as bacias costeiras do Amapá, que apresentam dinâmicas e complexidades extremamente particulares, demandando constante monitoramento (Xavier et al. 2017).

3.2. Análises geoespaciais e quantitativas da superfície de água nos municípios costeiros do Amapá

A utilização de técnicas de geoprocessamento para avaliar os recursos hídricos tem apresentado vantagens e resultados significativos, destacando sua importância no apoio a novas pesquisas e descobertas na Amazônia (Bogale 2021; Cury et al. 2021; Fassoni-Andrade et al. 2021). Um exemplo desse uso está relacionado com a variabilidade de superfície de água, que refere-se à dinâmica das águas superficiais ao longo do tempo, abrangendo os corpos hídricos naturais e antrópicos (Pekel et al. 2016; Souza Jr et al. 2019). Entretanto, no estado do Amapá ainda não há estudos relacionados a esse tema específico, sugerindo que a presente pesquisa de fato é uma contribuição científica inédita, de suma importância para o gerenciamento hídrico costeiro regional, dada sua importância estratégica, ecológica e ambiental (Takiyama e Silva 2009; Torres e El Robrini 2018; Rodrigues e Silva Júnior 2021).

Como pode ser observado na Fig.3, foram analisadas geoespacialmente a superfície de água dos 11 municípios costeiros do Amapá no período de 1985 a 2020. Constatou-se que a área em destaque dentro do quadrado vermelho, foi onde ocorreram as principais mudanças de variação de superfície de água (Fig. 3, municípios [4] [5] [6] [7]).

Na Fig. 3, e mais detalhadamente na Fig. S2, é possível analisar que essa variação ocorreu predominantemente nos municípios banhados pela bacia do rio Araguari. Na região oceânica desta bacia, entre o rio Araguari e o Oceano Atlântico, observa-se mudanças dos padrões das superfícies de água. Isto é, as regiões mais próximas das sedes municipais de Pracuúba e Tartarugalzinho (Fig.3 e Fig.S2, municípios [4] [5]), apresentaram-se de forma descontínuas e dispersas em 1985, passando, em 2020, a possuir padrões mais contínuos.

Enquanto na região central da bacia, onde fica seu rio principal (Fig S2, Rio Araguari), observa-se influência simultânea dos setores estuarino e oceânico, e é evidenciado por mudanças dos padrões hidrogeomorfológicos do baixo curso do rio Araguari. Por exemplo, em 1985 este rio desaguava diretamente no Oceano Atlântico. Todavia, atualmente, por meio de novos canais, o rio Araguari teve seu curso desviado para deságue no rio Amazonas (Fig.S2). Isto tem gerado impactos, principalmente através do processo de salinização da água na Ilha do Bailique (Fig.2, bacia [34]), o qual pode estar associado com a elevação do nível do mar, e mudanças do padrão da qualidade da água e ecossistemas aquáticos estuarinos (Cunha e Sternberg 2018).

Na região estuarina da bacia do rio Araguari houve a formação de novos canais de drenagem que interligam o rio Araguari ao rio Amazonas. Nestes locais ocorreram mudanças paisagísticas, territoriais e hidrológicas das bacias hidrográficas contíguas. Na Fig. 3b e Fig. S2b, é possível observar claramente a imensa formação/dispersão de novos corpos d'água formados pelo impacto das mudanças hidrogeomorfológicas do rio Araguari (Santos et

al., 2018; Cunha e Sternberg, 2018). O detalhamento desta análise foi reproduzido com a variação geoespacial em intervalos de 5 em 5 anos (Fig. S3, S4, S5 e S6).

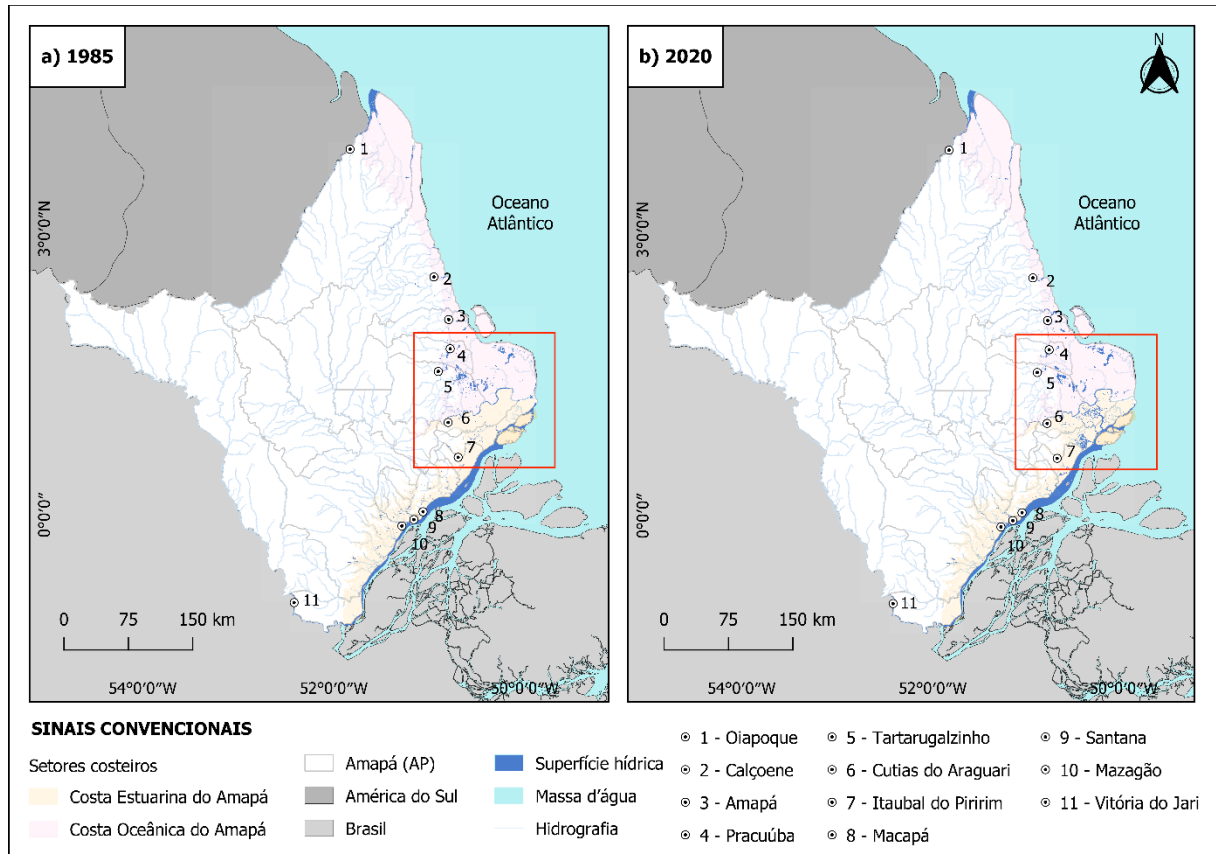


Fig.3 Variação da superfície de água por municípios em 1985 e 2020 nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil. Fonte: Autores (2023). Fonte de dados Geoespaciais: SEMA (2023) e Mapbiomas – Água (2023).

Na análise quantitativa da superfície de água dos 11 municípios costeiros do Amapá, no período entre 1985 e 2022 (Tabela S2), foi verificado que todos sofreram aumento de área de superfície de água. Por exemplo, Oiapoque (Fig.3, município [1]), em 1985, possuía 28706.54 ha teve sua superfície de água ampliada em 2022 para 39203.28 ha (um acréscimo de $\approx 26.78\%$ em relação ao estágio inicial). O mesmo ocorreu para os demais municípios.

Calçoene (Fig.3, município [2]), possuía 2883.49 ha em 1985 e aumentou para 10870.00 ha em 2022 (acréscimo de $\approx 73.47\%$ em relação ao estágio inicial). Amapá (Fig.3, município [3]), possuía 20643.58 ha em 1985 aumentou para 35084.75 ha em 2022 (acréscimo de $\approx 41.16\%$ em relação ao estágio inicial). Pracuúba (Fig.3, município [4]), possuía 5649.10 ha em 1985 e aumentou para 8178.86 ha em 2022 (acréscimo de $\approx 30.93\%$ em relação ao estágio inicial). Tartarugalzinho (Fig.3, município [5]) possuía 16673.65 ha em 1985 e aumentou para

22383.58 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 25.51\%$ em relação ao estágio inicial). Cutias do Araguari (Fig.3, município [6]) possuía 6479.21 ha em 1985 e aumentou para 47588.92 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 86.39\%$ em relação ao estágio inicial). Itaubal do Piririm (Fig.3, município [7]) possuía 42254.07 ha em 1985 e aumentou para 49092.08 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 13.93\%$ em relação ao estágio inicial). Macapá (Fig.3, município [8]) possuía 92022.81 ha em 1985 e aumentou para 122900.90 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 25.12\%$ em relação ao estágio inicial). Cabe aqui ressaltar que esses 7 municípios anteriores listados são banhados pela bacia do Rio Araguari (Fig.2, bacia [38]), que nos últimos anos vem sofrendo com constantes impactos ambientais responsáveis potencialmente pelas alterações em seu regime e fluxo hidrológico, causando desvios no curso do rio Araguari e formação de novos canais de drenagem (Santos et al. 2018; Cunha e Sternberg 2018; Araújo et al. 2020).

Os últimos municípios analisados (Fig.3, municípios [9] [10] [11]), tiveram crescimentos modestos das superfícies de água em relação aos anteriores (Fig.3, municípios [1] [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8]). Por exemplo, Santana (Fig.3, município [9]) possuía 5439.99 ha em 1985 e aumentou para 6224.89 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 12.61\%$ em relação ao estágio inicial). Mazagão (Fig.3, município [10]) possuía 29596.57 ha em 1985 e aumentou para 38847.91 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 23.81\%$ em relação ao estágio inicial). E Vitória do Jari (Fig.3, município [11]) possuía 12903.60 ha aumentou para 15421.20 ha em 2022 (acrécimo de $\approx 16.33\%$ em relação ao estágio inicial).

Em relação aos setores costeiros, a mesma análise foi aplicada (Tabela S2), verificando-se que o setor costeiro oceânico possuía superfície total de água de 74556.36 ha em 1985 e teve um aumento médio geral em 2022 para 115720.47 ha (acrécimo de $\approx 35.57\%$ em relação ao estágio inicial). Por outro lado, o setor costeiro estuarino em 1985 possuía 188696.25 ha de área total e aumentou em 2022 para 280075.90 ha (acrécimo de $\approx 32.63\%$ em relação ao estágio inicial).

Em suma, tanto as análises quantitativas em escala de municípios quanto de setores (oceânico e estuarino) demonstraram que as superfícies de água estão aumentando significativamente na zona costeira do Amapá. Este resultado difere do restante da Amazônia que, desde 2010, apresenta uma tendência geral de redução da superfície de água para a maior parte de suas áreas, devido as frequentes secas, principalmente na região sul e sudeste, acompanhadas pela interferência das atividades antrópicas (Silva et al. 2018; Chaudhari et al. 2019; Souza Jr et al. 2019). Entretanto, tal tendência é similar aos dos resultados globais, onde praticamente todos os continentes do mundo (exceto Oceania) tiveram acréscimo de superfície de água permanente nos últimos anos (Pekel et al. 2016).

Estes aumentos podem trazer benefícios para regiões que sofrem com falta de recursos hídricos. Mas no caso do estado do Amapá, que possui uma ampla gama de águas superficiais, e é marcado pela falta de planejamento

urbano e uso e ocupação desordenadas, pode agravar os impactos hidrológicos já existentes. Sousa et al. (2021) e Sousa et al. (2023) confirmaram essa hipótese ao analisar os municípios costeiros Macapá e Santana (maior contingente populacional do estado do Amapá), onde verificaram que o aumento do nível das águas superficiais causava inundações e outros transtornos à população, principalmente onde há significativo índice de aglomerados subnormais.

Os resultados aqui apresentados reforçam a importância dos estudos nas áreas costeiras, com foco na manutenção desses ecossistemas e da quantidade/qualidade dos recursos hídricos. Esta premissa é relevante para subsidiar o desenvolvimento de técnicas adaptativas e mitigadoras de impactos ambientais, que ampliem a capacidade de suporte e forneça maior resiliência dos ecossistemas diante de situações de extremos climáticos ou hidrológicos na zona costeira do Amapá (Giulio et al. 2019; Szlafsztein e Araújo 2021).

3.3. Análises integradas da superfície de água e variáveis hidroclimáticas e antrópicas

Para testar a hipótese de existência de correlação e explicabilidade entre as 13 variáveis dependentes selecionadas e as 5 variáveis independentes (Tabela 1) foram utilizadas regressões lineares simples, 13 testes para cada uma das 5 variáveis independentes, resultando em um total de 65 análises.

Inicialmente foi considerada a variável independente da natural evolução temporal dos eventos “Year” (Tabela S3). Dos 13 testes realizados, 8 foram significativos e 5 não foram significativos. No setor costeiro oceânico (HydS_Ocean) e em 3 municípios costeiros oceânicos (HydS_Ama, HydS_Pra, HydS_Tar) foram apresentados significância ($p < 0.05$), e a variável “Year” explicou respectivamente, 22.35%, 25.16%, 43.19%, e 35.89% da variação de superfície de água que ocorreu nesse período. Nos municípios de Oiapoque (HydS_Oia) e Calçoene (HydS_Cal) não houve significância.

O setor costeiro estuarino (HydS_Estuarine) e 2 municípios costeiros estuarinos (HydS_Maz, HydS_Vit) não apresentaram nenhuma significância com a variável “Year”. Todavia, os outros 4 municípios deste setor (HydS_San, HydS_Mac, HydS_Ita, HydS_Cut) apresentaram significância ($p < 0.05$), apesar de somente Itaubal do Pírim explicar razoavelmente a variação da superfície com $R^2_{aj} = 34.85\%$. Os demais municípios tiveram explicabilidade abaixo de 13% (Tabela S3).

A maior parte das variáveis dependentes apresentou significância e explicabilidade com a variável independente “Year”. Isto pode indicar uma significativa influência da evolução temporal na variação das superfícies de água. Estudos demonstram que esse aumento próximo das áreas costeiras pode estar relacionada

também com o aumento do número de inundações (Dube et al. 2021). Em Macapá, Sousa et al. (2023) sustentam essa hipótese, evidenciando o aumento da tendência e surgimento de alagamentos urbanos ao longo do tempo.

As variáveis hidroclimáticas testadas neste estudo foram Elevação do Nível do Mar (SLR) e Precipitação Total (Prec_Tot). A Tabela 2 indica as relações funcionais estabelecidas entre a SLR e variabilidade das superfícies de água nos municípios e setores costeiros do estado do Amapá.

Tabela 2: Análise de regressão simples relacionando a variação da superfície de água por município e setores costeiros versus elevação do nível do mar (SLR) nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil. Fonte: Autores (2023).

Variáveis dependentes (Y_i)	Equação – Influência das variáveis independentes (a + b_iX_i)	p-valor (p<0,05)	Coefficiente de determinação ajustado (R²_{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ocean	~ 2544751.5 – 1213.0 SLR	<0.0001(***)	76.35%	Varição significativa muito alta. F _(1,36 DF) = 13.44
HydS_Ama	~ 47286.87 – 373.64 SLR	<0.0001(***)	67.07%	Varição significativa alta. F _(1,36 DF) = 93.92
HydS_Cal	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Cut	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ita	~ 45335.19 + 19.14 SLR	< 0.0001(***)	11.7%	Varição significativa baixa. F _(1,36 DF) = 4.84
HydS_Mac	~ 110178.0 – 188.38 SLR	0.0135(*)	29.78%	Varição significativa. F _(1,36 DF) = 13.3
HydS_Maz	~ 39271.28 – 108.52 SLR	0.0099(*)	18.67%	Varição significativa baixa. F _(1,36 DF) = 7.66
HydS_Oia	~ 33557.89 - 90.06 SLR	0.067(.)	8.30%	Menor variação significativa. F _(1,36 DF) = 3.63

HydS_Pra	~ 12196.39 – 127.19 SLR	<0.0001(***)	76.54%	Variação significativa muito alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 95.64$
HydS_San	~ 7406.12 – 40.34 SLR	0.00034(**)	34.98%	Variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 16.6$
HydS_Tar	~ 31529.55 – 314.57 SLR	<0.0001(***)	67.13%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 60.24$
HydS_Vit	~ 7406.12 – 40.34 SLR	0.091(.)	6.66%	Menor variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 3.069$

Códigos de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Dentre os 13 testes realizados somente 3 não apresentaram significância (Tabela 2). No setor costeiro oceânico (HydS_Ocean), e em praticamente todos os municípios costeiros oceânicos (excetuando Calçoene – “HydS_Cal”), houve significância ($p < 0.05$), e a variável SLR explicou 76.35% de toda variação de superfície de água nesse período no setor costeiro oceânico. Nos demais municípios oceânicos (HydS_Ama, HydS_Pra, HydS_Tar) a explicabilidade foi um pouco menor, mas ainda muito significativa 67.07%, 76.54%, e 67.13%, respectivamente. Somente Oiapoque (HydS_Oia) teve uma baixa explicabilidade, com 8.30%.

O setor costeiro estuarino (HydS_Estuarine) e o município de Cutias do Araguari (HydS_Cut) não apresentaram nenhuma significância com a variável SLR. Todavia, todos os outros municípios costeiros estuarinos apresentaram significância ($p < 0.05$), mas somente os municípios de Santana (HydS_San) e Macapá (HydS_Mac) explicaram razoavelmente a variação da superfície de água com $R^2_{aj} = 34.98\%$ e 29.78% , respectivamente. Os demais (HydS_Ita, HydS_Maz, HydS_Vit) tiveram valores abaixo de 20% de explicabilidade (Tabela 2).

A maioria das variáveis dependentes apresentou significância e explicabilidade com a variável independente SLR. Este resultado mostra que a variação das superfícies de água está provavelmente relacionada com a elevação do nível do mar. Tal fato é capaz de afetar o ciclo hidrológico e, com isso, aumentar a vulnerabilidade das bacias costeiras locais. Apesar dos ambientes responderem de forma distinta à variação da elevação do nível do mar, os cientistas concordam que há uma influência significativa nas mudanças das amplitudes de marés (Khojasteh et al. 2020; Tagestad et al. 2021), aumento da salinidade e estratificação (Hong et al. 2020), aumento da profundidade média da água (Khojasteh et al. 2020) e das inundações (Passeri et al. 2015), e intensificação ou redução da

conectividade entre lagos costeiros e rios adjacentes (Cunha e Sternberg 2018). Estas pesquisas ratificam a importância da inserção da SLR nos estudos sobre recursos hídricos costeiros para o estado do Amapá.

A Precipitação Total (Prec_Tot), inesperadamente, apresentou pouca significância com as variáveis dependentes. Dentre 13 análises realizadas, somente 1 apresentou significância ($p < 0.05$) no município de Mazagão (HydS_Maz). Entretanto, sua explicabilidade foi muito baixa, somente 8.65% (Tabela S4). Este resultado é um tanto quanto inesperado porque, em estudo semelhante na literatura (Palazzoli et al. 2023) a precipitação foi associada como o fator mais influente do aumento das superfícies de água nas bacias hidrográficas dos Estados Unidos contíguos. Contudo, cada região pode responder de uma maneira distinta, considerando que as costas oceânica e estuarina do Amapá apresentam, de fato, características e especificidades próprias. Além disso, os dados disponíveis e utilizados correspondem a precipitação total abrangendo a área integral do estado, o que pode ter causado pouca/nenhuma significância quando analisada em uma área menor (por municípios - Tabela S4), mas apresentando significância quando ampliada sua área (por setor – Tabela 5).

As variáveis antrópicas selecionadas e testadas neste estudo foram: a superfície ocupada pelo plantio/produção de soja (SoyS), e áreas que sofrem com o processo de Mineração (Mining). A Tabela 3 mostra as relações estabelecidas entre a “SoyS” e variabilidade das superfícies de água nos municípios e setores costeiros do estado do Amapá.

Tabela 3: Análise de regressão simples relacionando a variação da superfície de água por município e setores costeiros versus superfície de plantio de soja (SoyS) nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil. Fonte: Autores (2023).

Variáveis dependentes (Y_i)	Equação – Influência das variáveis independentes ($a + b_i X_i$)	p-valor ($p < 0,05$)	Coefficiente de determinação ajustado (R^2_{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	$\sim 238405.29 - 2.82 \text{ SoyS}$	$< 0.0001 (***)$	56.54%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 28.32$
HydS_Ocean	$\sim 118809.5 - 4.66 \text{ SoyS}$	$< 0.0001 (***)$	74.87%	Variação significativa muito alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 63.58$
HydS_Ama	$\sim 47286.87 - 373.64 \text{ SoyS}$	$< 0.0001 (***)$	75.46%	Variação significativa muito alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 65.58$

HydS_Cal	~ 10087.92 – 0.56 SoyS	<0.0001(***)	61.59%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 34.68$
HydS_Cut	~ 26654.92 – 0.75 SoyS	0.0044(*)	30.59%	Variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 10.25$
HydS_Ita	----	NS	< 0.1%	Não significativo– NS
HydS_Mac	~ 101853.23 – 0.52 SoyS	0.0049(*)	30.00%	Variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 9.99$
HydS_Maz	~ 40105.42 – 1.14 SoyS	<0.0001(***)	74.65%	Variação significativa muito alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 7.66$
HydS_Oia	~ 33616.11 - 1.27 SoyS	<0.0001(***)	61.14%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 34.04$
HydS_Pra	~ 9270.93 – 0.39 SoyS	<0.0001(***)	57.79%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 29.75$
HydS_San	~ 6767.17 – 0.21 SoyS	<0.0001(***)	58.36%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 30.43$
HydS_Tar	~ 24695.67 – 1.128 SoyS	<0.0001(***)	59.35%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 31.66$
HydS_Vit	~ 15133.01 – 0.143 SoyS	<0.0001(***)	64.36%	Variação significativa alta. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 38.92$

Códigos de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Dos 13 testes realizados somente 1 não foi significativo (Tabela 3), indicando uma significativa influência sobre as variações de superfícies de água. No setor costeiro oceânico (HydS_Ocean) e nos municípios costeiros oceânicos (HydS_Oia, HydS_Cal, HydS_Ama, HydS_Pra, HydS_Tar) foram apresentadas significância ($p < 0.05$), e a variável “SoyS” explicou respectivamente, 74.87%, 61.14%, 61.59%, 75.46%, 57.79% e 59.35% da variação de superfície de água no período.

O setor costeiro estuarino (HydS_Estuarine) e os municípios costeiros estuarinos (HydS_Cut, HydS_Mac, HydS_San, HydS_Maz, HydS_Vit) apresentaram significância ($p < 0.05$) com relação à variável “SoyS” (exceto o município de Itaúbal do Píririm), explicando 56.54%, 30.59%, 30.00%, 58.36%, 74.65%, 64.36%, respectivamente (Tabela 3).

Deste modo, praticamente todas as variáveis dependentes (excetuando HydS_Ita) apresentaram significância e explicabilidade com a variável independente “SoyS”. Esta constatação pode indicar uma influência altamente significativa das lavouras temporárias de culturas anuais como a soja nas variações das superfícies de água. As atividades de plantio e produção de soja, nos últimos anos, tiveram sua superfície de ocupação fortemente ampliada no cerrado amapaense (Chelala e Chelala 2019). Este cenário tem a capacidade de afetar os processos hidrológicos e de distribuição dos recursos hídricos. Isso decorre do fato do cerrado contribuir com a manutenção das bacias hidrográficas e outras funções ecossistêmicas que extrapolam suas dimensões territoriais (Lima 2011; Souza et al. 2019).

A variável independente mineração, dos 13 testes realizados, 9 foram significativos e 4 não foram significativos (Tabela 4). No setor costeiro oceânico (HydS_Ocean) e nos municípios costeiros oceânicos (exceto HydS_Cal) foram apresentadas significância ($p < 0.05$). Entretanto, somente o setor oceânico e 3 municípios (HydS_Ama, HydS_Pra, HydS_Tar) explicaram razoavelmente a variação da superfície de água com $R^2_{aj} = 34.78\%$, 30.62% , 46.26% , e 40.69% , respectivamente. Oiapoque (HydS_Oia) teve abaixo de 7% de explicabilidade (Tabela 4).

Tabela 4: Análise de regressão simples relacionando a variação da superfície de água por município e setores costeiros versus processo de mineração (Mining) nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brasil. Fonte:

Autores (2023).

Variáveis dependentes (Y _i)	Equação – Influência das variáveis independentes (a + b _i X _i)	p-valor (p<0,05)	Coefficiente de determinação ajustado (R ² _{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ocean	~ 150244.03 – 10.09 Mining	<0.0001 (***)	34.78%	Variação significativa. F _(1,35 DF) = 20.2
HydS_Ama	~ 53335.51 + 0.39 Mining	0.00023 (***)	30.62%	Variação significativa. F _(1,35 DF) = 16.89
HydS_Cal	----	NS	< 0.1%	Não significativo – NS

HydS_Cut	----	NS	< 0.1%	Não significativo – NS
HydS_Ita	~ 43838.62 – 3.71 Mining	0.0016 (**)	22.88%	Varição significativa. F _(1,35 DF) = 11.68
HydS_Mac	~ 40582.93 – 1.14 Mining	0.00089 (***)	25.41%	Varição significativa. F _(1,35 DF) = 13.26
HydS_Maz	~ 50868.23 – 6.02 Mining	0.0041 (**)	8.97%	Menor variação significativa. F _(1,36 DF) = 4.55
HydS_Oia	~ 34848.64 – 1.10 Mining	0.068 (.)	6.54%	Menor variação significativa. F _(1,36 DF) = 3.52
HydS_Pra	~ 15483.97 – 1.51 Mining	<0.0001(***)	46.26%	Varição significativa. F _(1,35 DF) = 31.99
HydS_San	~ 7796.24 – 0.36 Mining	0.0167 (*)	12.89%	Varição significativa baixa. F _(1,35 DF) = 6.32
HydS_Tar	~ 38960.82 – 3.62 Mining	0.0167 (*)	40.69%	Varição significativa. F _(1,35 DF) = 35.7
HydS_Vit	----	NS	< 0.1%	Não significativo – NS

Códigos de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

O setor costeiro estuarino (HydS_Estuarine) e 2 municípios costeiros estuarinos (HydS_Cut, HydS_Vit) não apresentaram nenhuma significância com a variável “Mining”. Todavia, os outros 4 municípios deste setor (HydS_San, HydS_Mac, HydS_Ita, HydS_Maz) apresentaram significância ($p < 0.05$). Entretanto, somente Macapá e Itaúbal explicaram bem a variação da superfície de água com $R^2_{aj} = 25.41\%$ e 22.88% , respectivamente. Os demais tiveram abaixo de 13% de explicabilidade (Tabela 4).

A maior parte das variáveis dependentes apresentou significância e explicabilidade com a variável independente “Mining”. Isto sugere uma potencial influência significativa da atividade de mineração na variação

das superfícies de água. As atividades minerárias no Amapá tem uso intenso e concentrado nas áreas internas e circundantes da Bacia do Rio Araguari (Fig.2, bacia [38]), principalmente em seu médio curso (Araújo et al. 2020). Tais circunstâncias indicam que mesmo a atividade sendo realizada nessa região, o resto da bacia e vários municípios costeiros interseccionados por ela territorialmente são impactados (Savi et al. 2020).

Com o objetivo de testar simultaneamente os setores costeiros estuarino e oceânico, a partir de 2 variáveis hidroclimáticas (SLR e Prec_Tot) e 2 variáveis antrópicas (Mining e SoyS), foram utilizadas regressões múltiplas (Tabela 5). Os resultados mostraram que o setor costeiro estuarino apresenta variabilidade de sua superfície de água estatisticamente significativa, e essa variação foi explicada 62.46% pela Precipitação Total (Prec_Tot) e Superfície de Soja (SoyS). Enquanto o setor Oceânico apresenta sua variabilidade de superfície de água significativa e explicada quase completamente por apenas três variáveis independentes (90.55%): Elevação do Nível do Mar (SLR), Superfície de soja, e Precipitação Total. A superfície de mineração não teve resultados significativos neste teste multivariado específico.

Tabela 5: Análises de regressões múltiplas relacionando a variação de superfície de água por setor versus a elevação do nível do mar (SLR), precipitação total (Prec_Tot), processo de mineração (Mining), e superfície de plantio de soja (SoyS) nas costas oceânica e estuarina do Amapá/Brazil. Fonte: Autores (2023).

Variáveis dependentes (Y_i)	Equação – Influência das variáveis independentes (a + b_iX_i)	p-valor (p<0,05)	Coefficiente de determinação ajustado (R²_{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	~ 212587.76 - 9.48 Mining + 23.10 Prec_Tot + 489.13 SLR - 2.79 SoyS	0.0002(***)	62.46%	Varição significativa alta. F _(3,18 DF) = 9.73. Somente Prec_Tot (*) e SoyS (**) foram significativos.
HydS_Ocean	~ 90744.45 + 3.46 Mining + 15.80 Prec_Tot - 1194.60 SLR - 1.92 SoyS	<0.0001(***)	90.55%	Varição significativa muito alta. F _(3,18 DF) = 48.99. Somente Prec_Tot (.), SLR (**) e SoyS (**) foram significativos.

Códigos de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

Além dessas análises, foram feitas testes estatísticos adicionais e seus resultados podem ser consultados integralmente nos arquivos suplementares (Tabelas S5, S6, S7). A matriz de correlação utilizando o método de Spearman (Tabela S5) relacionou a variabilidade da superfície de água dos setores e municípios costeiros do Amapá, com todas as variáveis hidroclimáticas e antrópicas.

A maioria dos municípios costeiros oceânicos (HydS_Oia, HydS_Ama, HydS_Pra, HydS_Tar) apresentou correlações negativas com todas as variáveis independentes (Tabela S5), ou seja quanto mais a “Prec_Tot”, “SLR”, “SoyS”, “Year” e “Mining” aumentam, menos superfícies de água ficam disponíveis (redução de superfícies de água). Entretanto, Calçoene se destacou por ser o único município costeiro oceânico a apresentar correlação positiva com as variáveis “Year” e “Mining”, apesar de representar uma correlação muito baixa (0.1791 e 0.1180, respectivamente).

Quanto aos municípios costeiros estuarinos, três deles (HydS_Mac, HydS_San, HydS_Maz) indicaram correlações negativas (Tabela S5), isto é, existe uma tendência de redução da superfície de água a medida que as variáveis independentes (Prec_Tot, SLR, SoyS, Year e Mining) aumentam. Novamente, as variáveis “Year” e “Mining” se destacaram por apresentar correlação positiva, desta vez no município de Cutias do Araguari, apesar de ser uma fraca correlação (0.2949 e 0.2118, respectivamente). Vitória do Jari apresentou correlação positiva apenas com a variável “Year” (0.0454). Excepcionalmente, o município de Itaubal do Pírim apontou uma correlação positiva com todas as variáveis independentes (Tabela S5).

Em relação aos setores costeiros, tanto o setor oceânico quanto o estuarino apresentaram correlações negativas com todas as variáveis independentes. É importante ressaltar a forte correlação negativa entre a superfície de plantio de soja e a variação de superfície de água em ambos os setores (-0.9105 e -0.6303, respectivamente), indicando que quanto maior a produção de soja, menor as superfícies de água disponíveis. As análises detalhadas estão expostas na Tabela S5.

Uma Análise de Componentes Principais (PCAs) foi realizada, complementarmente, com intuito de reduzir as dimensões das variáveis originais sem perda de informação original ou transformações das variáveis. Os *loadings* das PCAs, considerando os municípios costeiros (Tabela S6), foram calculados para 16 componentes, sugerindo que os 3 primeiros componentes são capazes de explicar 89.76% da variabilidade das amostras. Enquanto nos PCAs considerando os setores costeiros (Tabela S7) foram utilizados 7 componentes, dos quais os 2 primeiros já explicam 91.62% da variabilidade das amostras.

Em síntese, as análises estatísticas de regressão linear simples, demonstraram que a variável relacionada a superfície de plantio de soja (SoyS) apresentou a melhor explicabilidade, entre todas as outras selecionadas (Tabela 3). Este resultado é também confirmado na análise de regressão múltipla (Tabela 5) e correlações - Spearman (Tabela S5), corroborando que “SoyS” é efetivamente a principal variável com potencial explicativo para a variações de superfície de água nos setores e municípios costeiros oceânico e estuarino do estado do Amapá. Apesar de estudos comprovarem que a ação antrópica afeta significativamente a variabilidade das superfícies de água em todo o mundo (Pekel et al. 2016; Souza Jr et al. 2019; Palazzoli et al. 2023), são quase inexistentes os estudos que relacionam estas mudanças com a expansão do plantio de soja, mesmo na última fronteira de desenvolvimento da Amazônia, como é o caso do estado do Amapá (Cunha et al. 2019).

Por isso, os resultados deste estudo destacam claramente como as áreas costeiras do Amapá estão sujeitas não só a variação hidroclimática, mas também se apresentam vulneráveis às pressões antrópicas. Este trabalho é uma contribuição para o desenvolvimento sustentável do setor de recursos hídricos costeiros e estratégias preditivas de adaptação diante da possibilidade de futuros eventos extremos. Os resultados apresentados também corroboram que as influências de variáveis explicativas padrão, tais como fatores hidrológicas, climáticas, e antropogênicas, de fato influenciam significativamente as variações de superfícies de água em diversas regiões do globo, incluindo o Amapá, estado ambientalmente mais preservado do Brasil (Giulio et al. 2019; Szlafsztein e Araújo 2021).

4. Conclusão

Este estudo inédito mostra as variações espaço-temporais da superfície de água em toda zona costeira do Amapá, evidenciando significativos acréscimos desde 1985 até 2022. Tais variações ocorreram principalmente no setor costeiro oceânico ($\approx 35.57\%$) em comparação ao setor costeiro estuarino ($\approx 32.63\%$). Apesar disso, o município costeiro estuarino Cutias do Araguari foi o que teve isoladamente o maior acréscimo de superfície de água no período analisado ($\approx 86.39\%$ em relação ao estágio inicial), seguido pelo município costeiro oceânico Calçoene ($\approx 73.47\%$ em relação ao estágio inicial).

Em parte, essa variação nas superfícies das águas foi influenciada por variáveis antrópicas, sobretudo a superfície de plantio de soja – “SoyS” (Tabela 3, Tabela 5, Tabela S5). Todavia, os fatores hidroclimáticos também apresentaram relativo grau de influência, principalmente a elevação do nível do mar – “SLR” (Tabela 2, Tabela 5, Tabela S5).

A hipótese da pesquisa, portanto, foi refutada. Pois, apesar de ser atestada a influência das variáveis independentes, o setor oceânico foi o que apresentou a maior variação ($\approx 35.57\%$) e explicabilidade (90.55%)

acerca da variação de superfície de água. Consequentemente ocorreu o oposto do que foi considerado na hipótese inicial.

Em estudos futuros sugere-se inserir novas variáveis independentes, desde que haja uma conexão prévia estabelecida com as variações de superfícies de água. Por exemplo, alterações de amplitudes de marés e taxas de desmatamento de florestas. Reforçamos que a utilização das técnicas de Sistemas de Informação Geográfica -SIG e análise estatística, foram essenciais para produzir e avaliar os resultados apresentados. De modo semelhante, tem sido observado na literatura que esta abordagem é uma aliada promissora para geração de novas pesquisas e descobertas em toda a Amazônia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Química, Saneamento e Modelagem de Sistemas Ambientais (LQSMSA), assim como ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio. Os autores também estendem seus agradecimentos ao PPGCA/DPq/PROPESPg/UNIFAP.

6. Referências

- Abreu CHM, Barros MLC, Brito DC, Teixeira MR, Cunha AC (2020) Hydrodynamic modeling and simulation of water residence time in the Estuary of the Lower Amazon River. *Water* 12:60-30. <https://doi.org/10.3390/w12030660>
- Abreu CHM, Cunha AC (2017) Qualidade da água e índice trófico em rio de ecossistema tropical sob impacto ambiental. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 22:45-56. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016144803>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA (2023) Hidrografia dos rios principais e demais cursos d'água tributários. <https://www.gov.br/ana/pt-br>. Accessed 9 Apr 2023
- Amapá (2007) Revisão do Plano Estadual de Gerenciamento Costeiro - Lei nº 1089, de 25 de Maio de 2007. Assembléia legislativa do estado do Amapá, Brasil. <http://www.iepa.ap.gov.br/nupaq/gerco/legislacao/lei-1089-2007.pdf> Accessed 27 Jun 2022
- Araújo EP, Abreu CHMA, Cunha HFA, Brito AU, Pereira NN, Cunha AC (2022) Vulnerability of biological resources to potential oil spills in the Lower Amazon River, Amapá, Brazil. *Environmental Science and Pollution Research* 30:35430–35449. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24592-3>
- Araújo AN, Cruz MLB, Silva CN, Rossete AN (2020) Dinâmica da cobertura e uso da terra na bacia hidrográfica do rio Araguari (Amapá, Amazônia, Brasil). *Revista InterEspaço* 6:1-13. <https://doi.org/10.18764/2446-6549.e202003>
- Bai L, Shi C, Li L, Yang Y, Wu J (2018). Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over mainland China. *Remote Sens.* 10:362. <https://doi.org/10.3390/rs10030362>
- Bastos AB (2010) Modelagem e escoamento ambiental como subsídio a gestão de ecossistemas aquáticos no baixo Igarapé da Fortaleza - AP. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical), UNIFAP/Brasil 1:1-118. <https://www2.unifap.br/ppgbio/files/2010/05/argemiro.pdf>

- Bernardes MC, Knoppers BA, Rezende CE, Souza WFL, Ovalle ARC (2012) Land-sea interface features of four estuaries on the South America Atlantic coast. *Braz. J. Biol.* 72:761-774. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400011>
- Bogale A (2021) Morphometric analysis of a drainage basin using geographical information system in Gilgel Abay watershed, Lake Tana Basin, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Applied Water Science* 11:122. <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01447-9>
- Bonfim OET, Silva DF, Kayano MT, Rocha LHS (2020) Análise dos Eventos Climáticos Extremos e de Suas Causas Climáticas para Redução de Riscos nas Bacias Hidrográficas Aguapeí e Peixe, São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 35:755-768. <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000004>
- Cabrera JS, Lee HS (2022) Coastal Zone Environment Integrity Assessment for Sustainable Management: Part 1. Development of Adaptive Expert-Driven Coastal Zone Health Index Framework. *Journal of Marine Science and Engineering* 10:1183. <https://doi.org/10.3390/jmse10091183>
- Caramello NDA, Kruger J (2022) Programa Vozes do Rio Jari: uma contribuição científica à gestão pública socioambiental de Laranjal do Jari-AP/Brasil. *Revista Brasileira de Administração Científica* 13:3.
- Chaudhari S, Pokhrel Y, Moran E, Miguez-Macho G (2019) Multi-decadal hydrologic change and variability in the Amazon River basin: understanding terrestrial water storage variations and drought characteristics. *HESS* 23: 841–2862. <https://doi.org/10.5194/hess-23-2841-2019>
- Chagas AMS, Montenegro AA, Farias CWLA, Lins FAC, Silva JRI (2022) Use of geotechnologies for morphometric analysis of experimental basin in the semiarid region to support hydrological simulation. *Revista Engenharia Na Agricultura - REVENG* 30:19–35. <https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.12629>
- Chelala C, Chelala CA (2019) Soja no Amapá: história, economia e meio ambiente. Editora Clube dos autores, Amapá, 1-106.
- Climate Hazards Center – CHC. CHIRPS - Precipitation data. <https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps> Accessed 01 Jun 2023.
- Crawley MJ (2007) *The R Book* 1° ed. Ed. John Wiley e Sons Ltd, Chichester – UK, 1-951.
- Crizanto JLP (2021) Cenários de Impactos da Elevação do Nível do Mar na Hidrodinâmica e nas Taxas de Renovação Hídrica do Estuário do Rio Amazonas. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Tropical), UNIFAP/Brasil 1:1-46.
- Cunha AC, Abreu CHM, Crizanto JLP, Cunha HFA, Brito AU, Pereira N (2021) Modeling pollutant dispersion scenarios in high vessel-traffic areas of the Lower Amazon River. *Marine Pollution Bulletin* 168:112404. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112404>
- Cunha AC, Sternberg LSL (2018) Using stable isotopes ^{18}O and ^2H of lake water and biogeochemical analysis to identify factors affecting water quality in four estuarine Amazonian shallow lakes. *Hydrological Processes* 32:1188-1201. <https://doi.org/10.1002/hyp.11462>
- Cunha AC (2013) Revisão descritiva sobre qualidade da água, parâmetros e modelagem de ecossistemas aquáticos tropicais. *Biota Amazônica* 3:124-143. <http://dx.doi.org/10.18561/2179-5746/biotaamazonia.v3n1p124-143>
- Cunha AC, Vilhena JES, Santos ES, Saraiva JMB, Kuhn PAFK, Brito DC, Souza EB, Rocha EP, Cunha HFA, Brito AU, Brasil Júnior ACP, Paca VHM, SANTOS PVCJ (2014) Evento Extremo de Chuva-Vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, Amapá, Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29:95-110. <http://dx.doi.org/10.1590/0102-778620130051>
- Cunha HFA, Souza AF, Silva JMC (2019) Public support for protected areas in new forest frontiers in the Brazilian Amazon. *Environmental Conservation* 46:278–284. <https://doi.org/10.1017/S0376892919000262>
- Curtis S (2019) Means and Long-Term Trends of Global Coastal Zone Precipitation. *Sci Rep* 9:5401. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41878-8>
- Cury MD, Ladwig NI, Menegasso JD, Sutil T, Conto D (2021) Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação como informação para o planejamento e a gestão territorial em bacia hidrográfica. *Caminhos de Geografia* 22:160–175. <http://doi.org/10.14393/RCG228356231>

- Diniz C, Cortinhas L, Nerino G, Rodrigues J, Sadeck L, Adami M, Souza-Filho PWM (2019) Brazilian Mangrove Status: Three Decades of Satellite Data Analysis. *Remote Sens.* 11:808. <https://doi.org/10.3390/rs11070808>
- Dube K, Nhamo G, Chikodzi D (2021) Flooding trends and their impacts on coastal communities of Western Cape Province, South Africa. *GeoJournal* 87:453–468. <https://doi.org/10.1007/s10708-021-10460-z>
- Fassoni-Andrade AC, Fleischmann AS, Papa F, Paiva RCDD, Wongchuig S, Melack JM, Moreira AA, Paris A, Ruhoff A, Barbosa C, Maciel DA, Novo E, Durand F, Frappart F, Aires F, Abrahão GM, Ferreira-Ferreira J, Espinoza JC, Laipelt L, Costa MH, Espinoza-Villar R, Calmant S, Pellet V (2021) Amazon hydrology from space: Scientific advances and future challenges. *Reviews of Geophysics* 59:1-97. <https://doi.org/10.1029/2020RG000728>
- Felix Neto JC, Souza LJA, Abreu CHM, Bárbara VF, Cunha HFA, Dias MT, Cunha AC (2021) Impactos hidroclimáticos de curto prazo no padrão hidrodinâmico de Rio de Estuário Amazônico, Amapá (AP), Brasil. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 12:161-179. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.001.0014>
- Feng D, Gleason CJ, Lin P, Yang X, Pan M, Ishitsuka Y (2021) Recent changes to Arctic river discharge. *Nature Communications* 12:6917. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27228-1>
- Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Diego Pedreros I, Verdin J, Shukla S, Husak G, Rowland J, Harrison L, Hoell A, Michaelsen J (2015) The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2-150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Gao H, Liu F, Yan T, Qin L, Li Z (2022) Drainage density and its controlling factors on the Eastern Margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Front, Earth Sci.* 9:755197 <https://doi.org/10.3389/feart.2021.755197>
- Giulio GM, Torres RR, Vasconcellos MP, Braga DRGC, Mancini RM, Lemos MC (2019) Extreme events, climate change and adaptation in the State of São Paulo. *Ambiente e Sociedade* 22:e02771. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0277r1vu19L4AO>
- Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R (2017) Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing Environment* 202:18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Halabisky M, Moskal LM, Gillespie A, Hannam M (2016) Reconstructing semi-arid wetland surface water dynamics through spectral mixture analysis of a time series of Landsat satellite images (1984–2011). *Remote Sensing of Environment* 177:171–183. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.040>
- Hoffmann GP, Blank MM, Amaral LCM, Nanni AS, Osako LS (2018) Adequação do Software Livre de Sistema de Informações Geográficas Qgis ao Público Brasileiro. *Revista Eletrônica. de Extensão* 15:144-153. <https://doi.org/10.5007/1807-0221.2018v15n31p144>
- Hong B, Liu Z, Shen J, Wu H, Gong W, Xu H, Wang D (2020) Potential physical impacts of sea-level rise on the Pearl River Estuary, China. *Journal of Marine Systems* 201:103245. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2019.103245>
- Horta P, Pinho PF, Gouvêa L, Grimaldi G, Destri G, Muller CM, Rocha L, Barufi JB, Rorig L, Assis J, Cunha LC (2020) Mudanças Climáticas e a zona costeira do Brasil: vulnerabilidades socioambientais e estratégias de ação. *Sustentabilidade em Debate* 11:425-444.
- Horton RE (1932) Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union.* <https://doi.org/10.1029/TR013i001p00350>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2011) Atlas geográfico das zonas costeiras e oceânicas do Brasil. Editora, Rio de Janeiro 1-173.
- Khojasteh D, Hottinger S, Felder S, De Cesare G, Heimhuber V, Hanslow DJ, Glamore W (2020) Estuarine tidal response to sea level rise: The significance of entrance restriction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 244:106941. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106941>
- Lakshmi A (2021) Coastal ecosystem services & human wellbeing. *Indian J Med Res.* 153:382-387. https://doi.org/10.4103/ijmr.IJMR_695_21
- Langbein, WB (1947) Topographic characteristics of drainage basins. *US Geological Survey Water-Supply Paper* 968-C:125-158. <https://doi.org/10.3133/wsp968C>

- Langerwisch F, Rost S, Gerten D, Poulter B, Rammig A, Cramer W (2013) Potential effects of climate change on inundation patterns in the Amazon Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17:2247–2262. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2247-2013>
- Lima JEFW (2011) Situação e perspectivas sobre as águas do cerrado. *Ciência e Cultura* 63:1-3. <http://dx.doi.org/10.21800/S0009-67252011000300011>
- Linke S, Lehner B, Dallaire CQ, Ariwi J, Grill G, Anand M, Beames P, Burchard-Levine V, Maxwell S, Moidu H, Tan F, Thieme M (2019) Global hydro-environmental subbasin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Sci Data* 6:283. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0300-6>
- Mancio Filho SP, Palhares JM, Santos VF (2022) Análise da Precipitação e Regime Hidrológico na Bacia Hidrográfica do Rio Oiapoque, 1998/2019, Amapá/Brasil. *Ciência Geográfica* 26:1-19. <https://doi.org/10.57243/26755122.XXVI4025>
- Mapbiomas – Água (2023) Séries temporais de superfície de água. <https://plataforma.brasil.mapbiomas.org/agua> Accessed 17 Jan 2023
- Mapbiomas – LULC (2023) Séries temporais de superfícies de soja e mineração. <https://mapbiomas.org/> Accessed 17 Jan 2023
- Mazzoleni M, Dottori F, Cloke HL, Di Baldassarre G (2022). Deciphering human influence on annual maximum flood extent at the global level. *Commun Earth Environ* 3:262. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00598-0>
- National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA (2023) Sea Level Rise data. <https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/lisa/> Accessed 21 Dec 2023.
- Neumann B, Vafeidis AT, Zimmermann J, Nicholls RJ (2015) Future Coastal Population Growth and Exposure to Sea-Level Rise and Coastal Flooding - A Global Assessment. *Plos One* 10: e0118571. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118571>
- Nicolodi JL, Zamboni A, Barroso GF (2009) Gestão Integrada de Bacias Hidrográficas e Zonas Costeiras no Brasil: Implicações para a Região Hidrográfica Amazônica. *Revista da Gestão Costeira Integrada* 9:9-32. <http://repositorio.furg.br/handle/1/2105>
- Oliveira AM, Cunha AC (2015) Análise de risco como medida preventiva de inundações na Amazônia: estudo de caso de enchente de 2000 em Laranjal do Jari-AP, Brasil. *Ciência e Natura* 37:110-118. <https://www.redalyc.org/pdf/4675/467547641018.pdf>
- Pallard B, Castellarin A, and Montanari A (2009) A look at the links between drainage density and flood statistics, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13:1019–1029. <https://doi.org/10.5194/hess-13-1019-2009>
- Palazzoli I, Montanari A, Ceola S (2023) Contribution of anthropogenic and hydroclimatic factors on the variation of surface water extent across the contiguous United States. *Environ. Res. Commun.* 5:051006. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/acd510>
- Paredes-Trejo FJ, Barbosa HA, Lakshmi Kumar TV (2017) Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil. *J. Arid. Environ* 139:26–40. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>
- Passeri DL, Hagen SC, Medeiros SC, Bilskie MV, Alizad K, Wang D (2015) The dynamic effects of sea level rise on low-gradient coastal landscapes: A review. *Earth’s Future* 3:1-23. <https://doi.org/10.1002/2015EF000298>
- Pekel JF, Cottam A, Gorelick N, Belward AS (2016) High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540:418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Pereira LCC, Dias JA, Do Carmo JA, Polette MA (2009) Zona Costeira Amazônica Brasileira. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management* 9:3-7. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340126001>
- R Development Core Team (2020) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.R-project.org> Accessed 12 Jul 2023

- Rai PK, Chandel RS, Mishra VNM, Singh P (2018) Hydrological inferences through morphometric analysis of lower Kosi river basin of India for water resource management based on remote sensing data. *Appl Water Sci* 8:15. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0660-7>
- Raiol LL, Ferreira MT, Santos DCR, Hayashi SN (2022) Caracterização Morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Caripi, Zona Costeira Amazônica. *Revista Brasileira de Geografia Física* 15:2354-2370. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2354-2370>
- Rivera JA, Marianetti G, Hinrichs S (2018) Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmos. Res.* 213:437–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- Rocha PC, Santos AA (2018) Hydrological Analysis in Water Basins. *Mercator Fortaleza* 17: e17025. <https://doi.org/10.4215/rm2018.e17025>
- Rodrigues MRC, Silva Junior OMS (2021) Panorama Geral Da Zona Costeira Do Estado Do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física* 14:1654-1674. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674>
- Santos CM, Avelar VG (2023) Aspectos Geo-Históricos da Expansão Urbana de Laranjal do Jari – Amapá. *Caminhos de Geografia* 24:77–91. <https://doi.org/10.14393/RCG249365484>
- Santos ES, Lopes PPP, Nascimento OO, Pereira HHS, Collin R, Sternberg LSL, Cunha AC (2018) The impact of channel capture on estuarine hydro-morphodynamics and water quality in the Amazon delta. *Science of the Total Environment* 624:887-899. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.211>
- Santos MRS, Vitorino MI, Pereira LCC, Pimentel MAS, Quintão AF (2021) Socioenvironmental Vulnerability to Climate Change: Conditions of Coastal Municipalities in Pará State. *Ambiente e Sociedade* 24:1-24. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200167r1vu2021L3AO>
- Santos ES, Cunha AC, Cunha HFA (2017) Hydroelectric power plant in the amazon and socioeconomic impacts on fishermen in Ferreira Gomes county – Amapá state. *Ambiente & Sociedade* 20:1-18. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc0088r2v2042017>
- Santos LL, Ribeiro VO, Diodato JO (2019) Morphometry of Hydrographic Basins Placed in the Urban Area of Dourados – MS – Brazil. *R. Ra'e Ga* 46:75 – 87.
- Santos VF, Nobre Júnior BB, Souza FM, Silva LMA (2022) Amapá: Um Estado Costeiro - Reflexões sobre Vulnerabilidades, Riscos e Adaptações a Mudanças Climáticas. In: Porto J (Org.). (ed) *Encontros e percepções geográficas: diálogos e provocações*, vol 1. Editora Uniedusul, Maringá-PR, pp 110-132. <https://doi.org/10.51324/54180221.8>
- Sautchuk CE (2011) Gestos, águas e palavras na pesca amazônica. *Anuário Antropológico* 36:1-24. <https://journals.openedition.org/aa/1104>
- Savi S, Tofelde S, Wickert AD, Bufe A, Schildgen TF, Strecker MR (2020) Interactions between main channels and tributary alluvial fans: channel adjustments and sediment-signal propagation. *Earth Surf. Dynam* 8:303–322. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-303-2020>
- Secretaria Estadual de Meio Ambiente do Amapá – SEMA (2023) Dados geoespaciais de bacias hidrográficas. <https://sema.portal.ap.gov.br/> Accessed 10 Jun 2022
- Shen Z, Yong B, Gourley JJ, Qi W, Lu D, Liu J, Ren L, Hong Y, Zhang J (2020) Recent global performance of the Climate Hazards group Infrared Precipitation (CHIRP) with Stations (CHIRPS). *Journal of Hydrology* 591:125284. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125284>
- Silva CN, Lima R, Ângelo P, Marinho VNM (2018) Desestrutuação Territorial na Atividade Pesqueira: A Instalação de Usinas Hidroelétricas na Bacia do Araguari (Ferreira Gomes-Amazônia-Brasil). *Revista NERA* 42: 186–201. <https://doi.org/10.47946/nera.v0i42.5692>
- Silva Júnior OM; Fuckner MA; Baia M.M; Santos LS; Pinheiro CSS (2021) Comitê da bacia Hidrográfica do rio Araguari como instrumento de gestão dos Recursos Hídricos no Estado do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física* v:14 - 2771-2789. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/246326>
- Silva JS, Farias Filho MS (2019) Expansão Urbana e Impactos Ambientais na Zona Costeira Norte do Município de São Luís (MA). *Raega - O Espaço Geográfico em Análise* 46:07-24.

- Silva MV, Paris A, Calmant S, Cândido LA, Silva JS (2018) Relationships between pacific and atlantic ocean sea surface temperatures and water levels from satellite altimetry data in the Amazon rivers. *RBRH* 23:1-16. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820170148>
- Sousa TS, Cunha HFA, Cunha AC (2021) Risco de alagamentos influenciados por fatores ambientais em zonas urbanas de Macapá e Santana/AP. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais* 12:245-259. <https://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0021>
- Sousa T S, Viegas CJT, Cunha HFA, da Cunha AC (2023) Drainage and Preliminary Risk of Flooding in an Urban Zone of Eastern Amazon. *Journal of Geoscience and Environment Protection* 11: 1-16. <https://doi.org/10.4236/gep.2023.115001>
- Souza Jr CM, Kirchhoff FT, Oliveira BC, Ribeiro JG, Sales MH (2019) Long-Term Annual Surface Water Change in the Brazilian Amazon Biome: Potential Links with Deforestation, Infrastructure Development and Climate Change. *Water* 11: 566. <https://doi.org/10.3390/w11030566>
- Souza Jr CM, Shimbo JZ, Rosa MR, Parente LL, Alencar AA, Rudor BFT, Hasenack H, Matsumoto M, Ferreira LG, Souza-Filho PWM, De Oliveira SW, Rocha WF, Fonseca AV, Marques CB, Diniz CG, Costa D, Monteiro D, Rosa ER, Vélez-Martin E, Weber EJ, Lenti FEB, Paternost FF, Pareyn FGC, Siqueira JV, Viera JL, Ferreira Neto LC, Saraiva MM, Sales MH, Salgado MPG, Vasconcelos R, Galano S, Mesquita VV, Azevedo T (2020) Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sensing* 12:2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- Szlafsztein CF, Araújo ANB (2021) Autonomous flood adaptation measures in Amazonian cities (Belem, Brazil). *Natural Hazards* 108:1069–1087. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04720-x>
- Tagestad J, Ward ND, Butman D, Stegen J (2021) Small streams dominate US tidal reaches and will be disproportionately impacted by sea-level rise. *Science of the Total Environment*, 753:141944. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141944>
- Takiyama LR, Silva URL (2009) Experiências na Utilização de Metodologias Participativas para a Construção de Instrumentos de Gestão Costeira no Estado do Amapá, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada - Journal of Integrated Coastal Zone Management* 9:33-45. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=388340126003>
- Torres AM, El Robrini M, Costa WJP (2018) Panorama da erosão costeira - Amapá, in: Muehe D. (Ed.), *Panorama Da Erosão Costeira No Brasil*. Ministério do Meio Ambiente, Brasil, 1-761.
- Venzon PT, Pinheiro A, Kaufmann V (2018) Hydrological simulation uncertainties in small basins through the SWAT model. *Brazilian Journal of Water Resources* 23:1-13. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.231820180014>
- Visschers LLB, Santos CD, Franco AMA (2022) Accelerated migration of mangroves indicate large-scale saltwater intrusion in Amazon coastal wetlands. *Science of the Total Environment* 836:155679. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155679>
- Ward ND, Keil RG, Medeiros PM, Brito DC, Cunha AC, Dittmar T, Yager PL, Krusche AV, Richey JE (2013) Degradation of terrestrially derived macromolecules in the Amazon River. *Nature Geoscience (Print)* 6: 530-533.
- Xavier D, Reis CD, Silva JF (2017) Aspectos sedimentológicos e geoquímicos de um estuário amazônico: estuário do rio Sucuriçu, Amapá, Brasil. *Boletim Do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais* 12:411-422. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v12i3.380>
- Yu D, Liu S, Li G, Zhong Y, Liang J, Shi J, Liu X, Wang X (2022) The River–Sea Interaction off the Amazon Estuary. *Remote Sens.* 14:1022. <https://doi.org/10.3390/rs14041022>
- Zhang HG, Lin QZ, Liu SH, Shi JC (2004) Sub-pixel lake mapping in Tibetan Plateau. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium - IGARSS, Anchorage, AK, USA*, 5:3073-3076. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2004.1370347>
- Zambrano F, Wardlow B, Tadesse T, Lillo-Saavedra M, Lagos O (2017) Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmos. Res.* 186:26–42. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.11.006>

MATERIAL SUPLEMENTAR

Suplemento de figuras

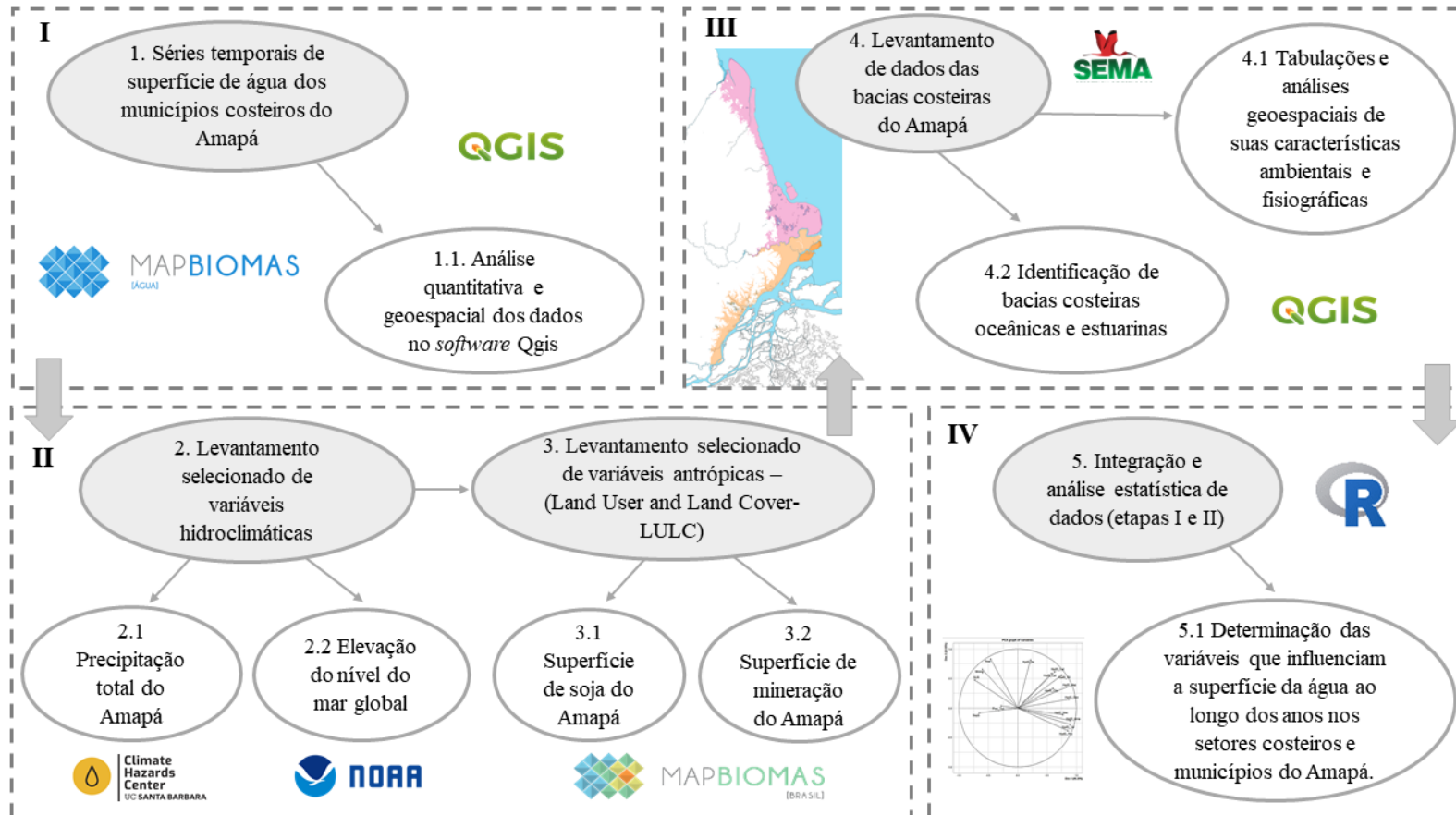


Fig. S1 Etapas do modelo conceitual representando as principais etapas metodológicas da pesquisa. I) aquisição das séries temporais de superfície de água para municípios costeiros do Amapá (Fig.1); II) aquisição da base de dados hidroclimática e LULC (Land Use and Land Cover); III) coleta de dados das bacias costeiras do Amapá; IV) análise e integração de dados. Legenda: as setas indicam a integração entre os itens; As elipses cinzas representam as etapas gerais e as elipses brancas as sub-etapas com detalhes mais específicos. Fonte: Autores (2023).

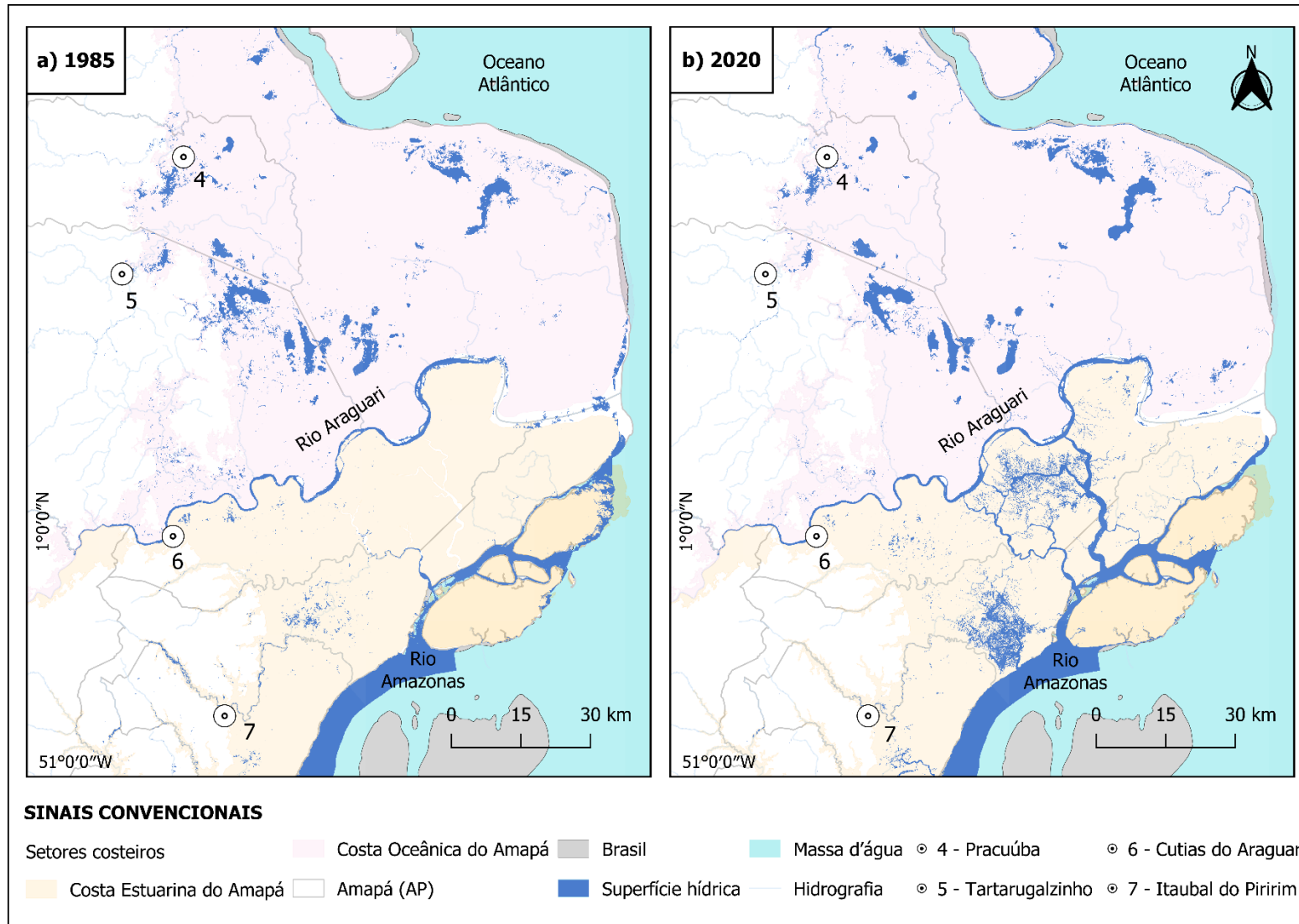


Fig. S2 Variação da superfície de água por município em 1985 e 2020 no território selecionado no quadrado vermelho da Fig. 3. Esta área abrange quatro sedes municipais e indica onde ocorreram as principais mudanças na superfície de água no período analisado. Fonte: Autores (2023).

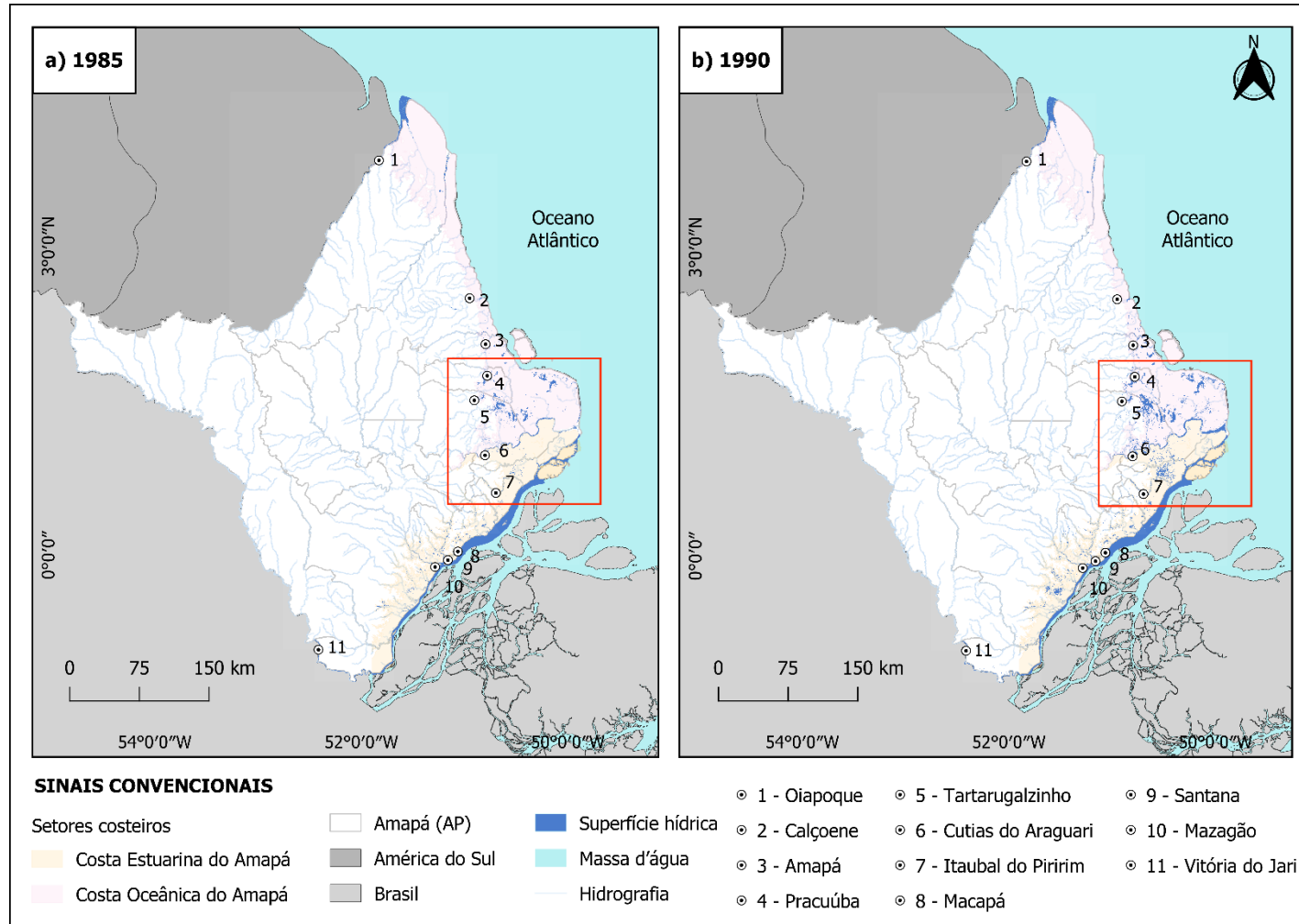


Fig. S3 Variação da superfície da água por município em 1985 e 1990 nos setores oceânico e estuarino do Amapá/Brasil. Legenda: Os quatro municípios (4, 5, 6, 7) inseridos no quadrado vermelho são os que apresentam mudanças mais significativas na superfície de água. Em 1985 esses municípios possuíam o equivalente a 71.056,03 ha de águas superficiais e em 1990 passou para 107.600,42 ha. Isso significa que nesse intervalo de tempo a região destacada teve um aumento de aproximadamente 33,96%.

Fonte: Autores (2023).

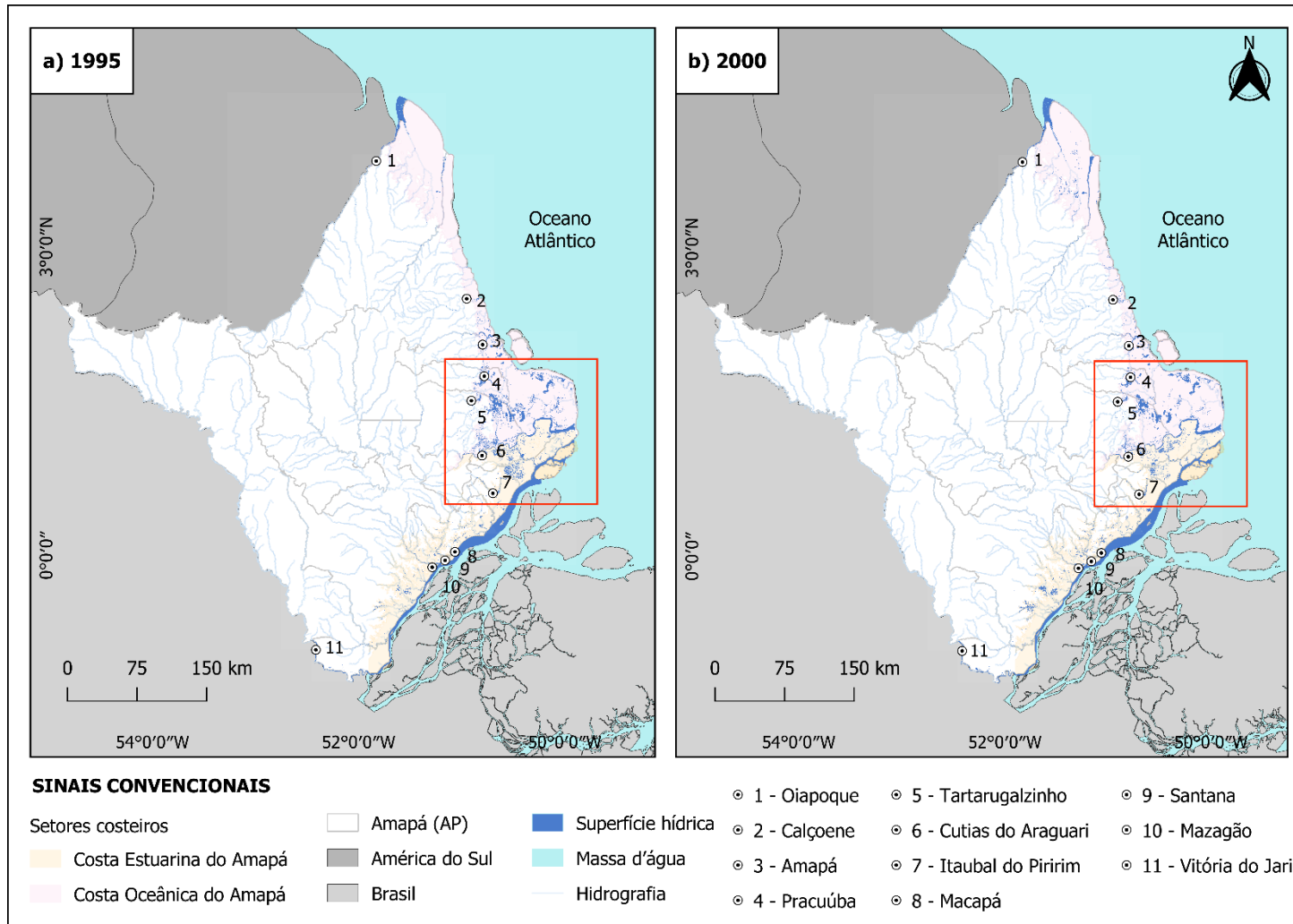


Fig. S4 Variação da superfície da água por município em 1995 e 2000 nos setores costeiros oceânico e estuarino do Amapá/Brasil. Legenda: Os quatro municípios (4, 5, 6, 7) inseridos no quadrado vermelho são os que apresentam mudanças mais significativas na superfície de água. Em 1995 esses municípios tinham o equivalente a 122.828,76 ha de águas superficiais e em 1990 diminuíram para 111.509,66 ha. Isso significa que nesse intervalo de tempo a região destacada teve um decréscimo de aproximadamente 9,22%. Fonte: Autores (2023).

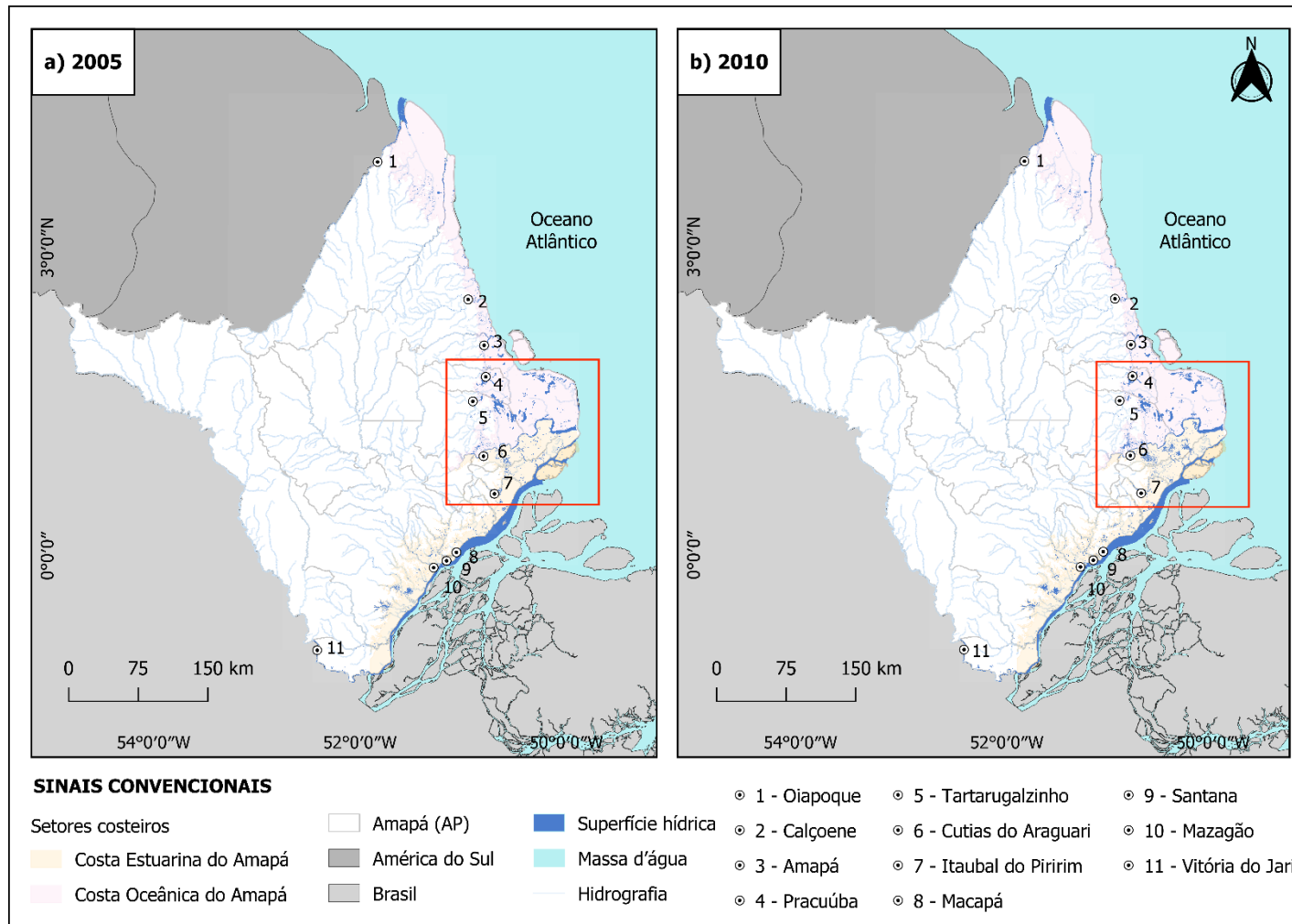


Fig. S5 Variação da superfície da água por município em 2005 e 2010 nos setores costeiros oceânico e estuarino do Amapá/Brasil. Legenda: Os quatro municípios (4, 5, 6, 7) inseridos no quadrado vermelho são os que apresentam mudanças mais significativas na superfície de água. Em 2005 esses municípios possuíam o equivalente a 96.713,67 ha de águas superficiais e em 2010 passou para 116.119,78 ha. Isso significa que nesse intervalo de tempo a região destacada teve um aumento de aproximadamente 16,71%. Fonte: Autores (2023).

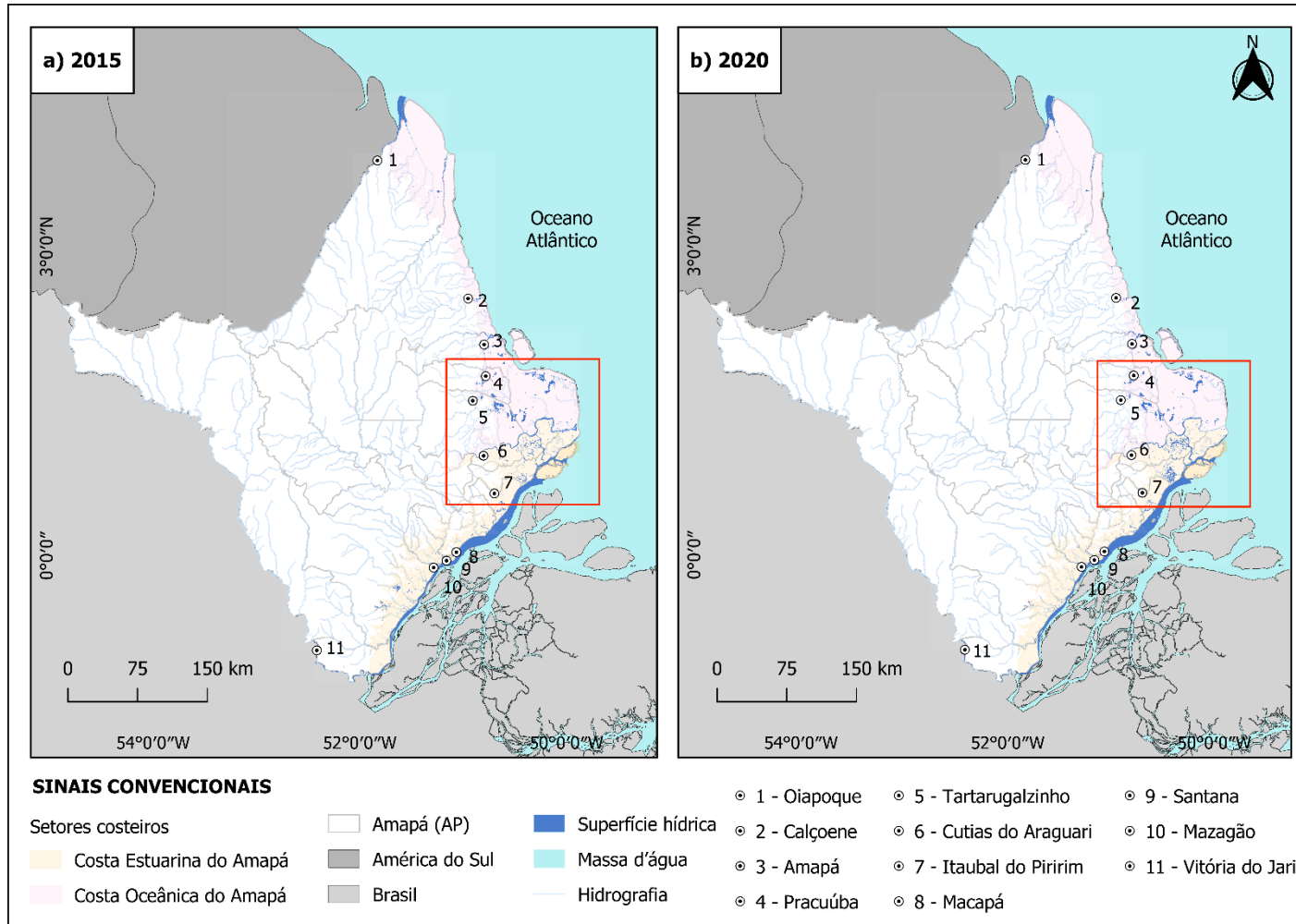


Fig. S6 Variação da superfície da água por município em 2015 e 2020 nos setores costeiros oceânico e estuarino do Amapá/Brasil. Legenda: Os quatro municípios (4, 5, 6, 7) inseridos no quadrado vermelho são os que apresentam mudanças mais significativas na superfície de água. Em 2015 esses municípios tinham o equivalente a 82.571,87 ha de águas superficiais e em 2020 passou para 84.546,55 ha. Isso significa que nesse intervalo de tempo a região destacada teve um aumento de aproximadamente 2,34%.

Fonte: Autores (2023).

Suplemento de tabelas

Nome da bacia	Área (km ²)	Perímetro (km)	Coefficiente de compacidade (adimensional)	Comprimento do rio principal (km)	Comprimento total do rios (km)	Densidade de drenagem (km- km ²)
Rio Ajuruxi	1256.36	181.80	1.44	66.92	675.79	0.54
Rio Araguari	45289.46	1334.74	1.76	680.18	25799.98	0.57
Ilha Faustino	35.41	30.82	1.45	7.21	22.73	0.64
Ilha Curuá	345.45	139.74	2.11	9.49	97.89	0.28
Ilha Bailique	231.46	96.14	1.77	4.71	55.19	0.24
Ilha Santana	20.29	19.95	1.24	Não Analisado	Não Analisado	Não Analisado
Rio Curiaú	300.97	110.43	1.78	22.75	202.83	0.67
Ilha Maracá	521.01	111.35	1.37	34.69	96.70	0.19
Igarapé Fortaleza	190.82	66.06	1.34	27.52	158.06	0.83
Rio Pedreira	2217.35	299.33	1.78	141.91	1270.15	0.57
Rio Flechal	4618.83	337.58	1.39	147.69	2348.93	0.51
Rio Calçoene	3465.52	329.22	1.57	142.91	1190.93	0.34
Rio Lamute	442.56	112.04	1.49	44.51	134.05	0.30
Rio Cassiporé	5464.41	567.34	2.15	258.94	2129.04	0.39
Rio Uaçá	6490.76	386.05	1.34	187.26	1828.95	0.28

Rio Cunani	1749.80	260.13	1.74	110.28	626.78	0.36
Igarapé Grande Crique	521.61	133.79	1.64	40.03	167.07	0.32
Igarapé Marecal	810.82	219.13	2.15	33.94	102.64	0.13
Rio Ipixuna Grande	139.86	49.71	1.18	22.58	75.33	0.54
Rio Macarri	1164.73	186.91	1.53	48.64	806.27	0.69
Rio Matapi	2540.95	281.26	1.56	126.74	1591.87	0.63
Rio Cajari	4921.88	367.41	1.47	195.00	2542.19	0.52
Igarapé Matauaú	283.03	98.86	1.65	10.80	28.34	0.10
Igarapé Tambaqui	253.89	91.38	1.61	40.37	116.26	0.46
Rio Ariramba	101.70	42.74	1.19	15.83	38.98	0.38
Rio Mazagão	399.75	88.36	1.24	30.60	187.21	0.47
Rio Maraca-Pucú	3394.85	397.74	1.91	219.40	1979.28	0.58
Rio Preto	1384.84	266.90	2.01	123.68	841.33	0.61
Rio Vila Nova	5063.80	457.20	1.80	186.41	3533.52	0.70
Rio Macacoari	629.89	160.36	1.79	84.49	231.74	0.37
Rio Sucuriju	2163.74	272.14	1.64	44.27	1066.38	0.49
Rio Novo	586.93	114.15	1.32	34.60	203.32	0.35
Rio Oiapoque	12489.70	919.90	2.30	182.26	6582.82	0.53
Rio Jari	30471.44	1869.24	3.00	245.79	19754.28	0.65

Ilha Brigue	23.98	23.10	1.32	4.08	12.39	0.52
Ilha Pedreira	16.54	41.58	2.86	Não Analisado	Não Analisado	Não Analisado
Ilha Cajari	7.80	16.17	1.62	Não Analisado	Não Analisado	Não Analisado
Ilha Açougue	25.12	37.63	2.10	Não Analisado	Não Analisado	Não Analisado

Tabela S1: Índices fisiográficos das bacias costeiras oceânicas e estuarinas do estado do Amapá. Fonte: Autores (2023).

Ano	Municípios costeiros							Setores costeiros					
	HydS_ Oia	HydS_ Cal	HydS_ Ama	HydS_ Pra	HydS_ Tar	HydS_ Cut	HydS_ Ita	HydS_ Mac	HydS_ San	HydS_ Maz	HydS_ Vit	HydS_ Ocean	HydS_ Estuarine
1985	28706.54	2883.49	20643.58	5649.10	16673.65	6479.21	42254.07	92022.81	5439.99	29596.57	12903.60	74556.36	188696.25
1986	28706.33	3037.77	28975.02	8770.33	22291.41	9244.79	42576.43	98246.84	5486.93	31504.54	13045.66	91780.86	200105.19
1987	28688.60	4040.55	37839.54	10398.43	25816.86	12165.46	43799.58	107615.16	5868.46	35634.28	14204.97	106783.98	219287.91
1988	28689.45	4159.50	42594.68	12136.45	28742.90	13581.11	43950.16	110419.00	5854.50	33290.31	14090.35	116322.98	221185.43
1989	28689.45	4412.68	44334.15	12883.48	29970.01	14547.28	44172.51	112612.52	5821.99	34044.48	14358.40	120289.77	225557.18
1990	28684.64	4184.04	43900.27	12811.26	32877.64	17091.30	44820.22	112692.95	6346.88	37565.47	13928.10	122457.85	232444.92
1991	28683.52	4447.72	49952.13	13647.87	34162.57	19014.82	44331.84	114302.62	5950.37	36451.43	14352.04	130893.81	234403.12
1992	28675.43	4965.27	53190.60	15116.21	36304.92	23598.07	45317.63	122585.83	7307.48	37472.35	14696.83	138252.43	250978.19
1993	28647.51	4605.66	47271.48	12575.58	30916.75	18990.65	44198.57	112635.26	6318.97	33113.73	14261.14	124016.98	229518.32

1994	28647.51	4849.20	48435.11	13066.32	32079.87	18288.09	44289.15	109719.77	6324.42	33634.21	13008.59	127078.01	225264.23
1995	28647.51	5241.75	55002.23	14941.34	39169.09	24306.93	44411.40	114267.11	5894.27	32720.07	14357.28	143001.92	235957.06
1996	28647.51	5991.04	62028.76	17613.80	44887.24	44561.97	46457.67	125939.29	10200.22	35686.83	15410.41	159168.35	278256.39
1997	31088.33	9674.10	58835.25	16356.12	42033.96	37059.03	45525.84	120457.21	9955.75	47129.66	15892.98	157987.76	276020.47
1998	28645.01	4851.26	53291.60	14449.39	37122.22	30342.43	45619.25	114852.14	7834.15	40236.30	14395.27	138359.48	253279.54
1999	42308.29	13413.63	63304.96	16255.27	44637.13	43258.41	46176.90	123841.17	10938.19	47698.73	16503.13	179919.28	288416.53
2000	42630.23	12647.31	46322.25	11970.37	28499.55	26506.46	44533.28	107706.98	6528.22	39773.98	15510.09	142069.71	240559.01
2001	39968.36	13151.63	42165.07	12039.13	30302.24	28556.72	43938.89	106376.28	5944.56	39892.92	14805.68	137626.43	239515.05
2002	32106.59	12734.34	43817.47	10984.78	22538.77	22247.87	44828.03	105285.56	6561.45	36155.46	15008.13	122181.95	230086.50
2003	38643.16	11410.62	39259.54	8726.10	22557.34	19946.69	45066.20	104452.26	7429.06	40828.71	15528.85	120596.76	233251.77
2004	37270.16	11069.41	37670.76	8454.42	22356.69	24235.66	45057.47	104633.10	6904.87	43202.66	14590.90	116821.44	238624.66
2005	32688.58	10258.54	40535.75	8912.95	22272.30	20386.68	45141.74	101525.35	6136.58	39801.40	14733.30	114668.12	227725.05
2006	40310.31	11760.74	39615.38	8959.97	26346.51	26574.31	46278.08	104719.05	6874.09	42868.65	15425.09	126992.91	242739.27
2007	39257.14	11206.92	41763.10	10533.52	31834.27	33346.34	46254.35	107344.60	8362.41	45002.80	15796.55	134594.95	256107.05
2008	35876.09	10389.01	40485.65	10043.59	30013.11	29377.44	46884.45	103726.42	7517.28	44186.65	16317.62	126807.45	248009.86
2009	30301.14	8583.77	37462.88	8631.71	26087.72	33338.07	45154.33	100442.37	7733.00	41814.11	15354.90	111067.22	243836.78
2010	33273.96	9120.26	39385.67	9069.84	27149.82	32960.74	46939.38	104552.89	6443.04	40700.84	15088.80	117999.55	246685.69
2011	33585.44	8144.51	38277.27	9834.96	26299.48	33847.93	48891.36	107421.87	7497.09	41606.48	14947.73	116141.66	254212.46
2012	31207.69	7812.75	35741.46	8200.07	23280.87	29474.11	46954.13	103421.10	6647.74	37862.84	14712.42	106242.84	239072.34

2013	29664.87	7944.89	33628.66	6360.02	15686.28	21754.43	46975.98	101602.02	6364.33	34284.26	15070.38	93284.72	226051.40
2014	28493.62	5931.63	32568.57	7143.19	16085.47	22374.76	46716.23	100617.99	5234.66	33152.20	14274.35	90222.48	222370.19
2015	28355.14	5298.81	29921.62	5287.63	14588.94	17764.21	44931.09	95969.95	4405.91	32065.73	13885.34	83452.14	209022.23
2016	27017.26	4292.58	27130.99	5989.88	13920.93	18213.70	45338.23	95338.31	4896.98	29307.79	13824.54	78351.64	206919.55
2017	27080.34	4138.24	26969.20	5711.89	13757.96	19141.28	45395.36	96559.78	5116.11	29230.53	13824.26	77657.63	209267.32
2018	27362.71	3901.34	23994.59	4742.21	12776.08	15153.63	44541.15	95902.89	4420.22	28434.37	13638.17	72776.93	202090.43
2019	27347.96	3914.31	24449.27	4894.92	13001.35	16137.24	44678.61	95510.60	4284.27	28317.98	13643.34	73607.81	202572.04
2020	27347.96	4024.14	27256.43	5170.79	13807.58	20569.77	44998.41	101556.77	4604.30	28241.38	13611.34	77606.90	213581.97
2021	7977.83	5990.41	26483.70	5752.39	13898.24	23519.37	46084.31	104918.86	4789.19	28312.33	13697.15	60102.57	221321.21
2022	39203.28	10870.00	35084.75	8178.86	22383.58	47588.92	49092.08	122900.90	6224.89	38847.91	15421.20	115720.47	280075.90

Tabela S2: Variabilidade de superfície de água nos municípios e setores costeiros ao longo do anos analisados. A tabela foi preparada pelos autores. Fontes de dados: Mapbiomas – Água (2023).

Variáveis dependentes (Y_i)	Equação – Influência das variáveis independentes (a + b_iX_i)	p-valor (p<0,05)	Coefficiente de determinação ajustado (R²_{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS

HydS_Ocean	~ 2544751.5 – 1213.0 year	0.000179(***)	22.35%	Varição significativa. $F_{(1,36)}$ DF) = 13.44
HydS_Ama	~ 1043941.1 – 501.1 year	0.0016(**)	25.16%	Varição significativa. $F_{(1,36)}$ DF) = 11.65
HydS_Cal	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Cut	~ - 469482.6 + 246.4 year	0.077(.)	5.90%	Menor variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 3.32$
HydS_Ita	~ - 109962.2 + 77.51 year	< 0.0001(***)	34.85%	Varição significativa. $F_{(1,36)}$ DF) = 20.79
HydS_Mac	~ 705338.4 – 298.7 year	0.0135(*)	12.44%	Varição significativa baixa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 6.26$
HydS_Maz	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Oia	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Pra	~ 442735.7 – 215.96 year	<0.0001(***)	43.19%	Varição significativa. $F_{(1,36)}$ DF) = 29.13
HydS_San	~ 86361.71 – 39.87 year	0.078(.)	5.81%	Menor variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 3.28$
HydS_Tar	~ 1035055.4 – 503.7 year	<0.0001(***)	35.89%	Varição significativa. $F_{(1,36)}$ DF) = 21.71

HydS_Vit	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
----------	------	----	--------	------------------------

Códigos de significância: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Tabela S3: Análise de regressão simples relacionando a superfície de água por município e setores ao longo dos anos analisados nas costas oceânicas e estuarina do Amapá/Brasil. Fonte: Autores (2023).

Variáveis dependentes (Y_i)	Equação – Influência das variáveis independentes (a + b_iX_i)	p-valor (p<0,05)	Coefficiente de determinação ajustado (R²_{aj})	Comentários
HydS_Estuarine	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ocean	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ama	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Cal	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Cut	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Ita	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Mac	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS

HydS_Maz	~ 50868.23 – 6.02 Prec_Tot	0.00405 (*)	8.65%	Menor variação significativa. $F_{(1,36 \text{ DF})} = 4.503$
HydS_Oia	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Pra	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_San	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Tar	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS
HydS_Vit	----	NS	< 0.1%	Não significativo - NS

Códigos de significância: 0 '****' 0.001 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1

Tabela S4: Análise de regressão simples relacionando a superfície de água por município e setores versus precipitação total nas costas oceânicas e estuarina do Amapá/Brasil.
Fonte: Autores (2023).

	HydS_Ama	HydS_Cal	HydS_Cut	HydS_Estuarine	HydS_Ita	HydS_Mac	HydS_Maz	HydS_Ocean	HydS_Oia
HydS_Ama	1.0000	0.3761	0.3864	0.6525	-0.0419	0.8534	0.5183	0.9457	0.3043
HydS_Cal	0.3761	1.0000	0.7374	0.7208	0.4778	0.2890	0.7733	0.5253	0.7682
HydS_Cut	0.3764	0.7374	1.0000	0.9015	0.7348	0.4369	0.6855	0.5240	0.4807
HydS_Estuarine	0.6525	0.7208	0.9015	1.0000	0.5700	0.6840	0.8348	0.7599	0.6060
HydS_Ita	-0.0419	0.4778	0.7348	0.5700	1.0000	0.0688	0.4146	0.0465	0.1984

HydS_Mac	0.8534	0.2890	0.4369	0.6840	0.0688	1.0000	0.4126	0.8019	0.2418
HydS_Maz	0.5183	0.7733	0.6855	0.8348	0.4146	0.4126	1.0000	0.6477	0.8166
HydS_Ocean	0.9457	0.5253	0.5240	0.7599	0.0465	0.8019	0.6477	1.0000	0.4703
HydS_Oia	0.3043	0.7682	0.4807	0.6060	0.1984	0.2418	0.8166	0.4703	1.0000
HydS_Pra	0.9691	0.2656	0.3209	0.6061	-0.1060	0.8630	0.4741	0.9127	0.2672
HydS_San	0.6437	0.6560	0.7280	0.8720	0.4588	0.5457	0.8698	0.7365	0.6266
HydS_Tar	0.9361	0.3082	0.4345	0.7057	-0.0073	0.8409	0.5663	0.9317	0.3319
HydS_Vit	0.4918	0.8602	0.7777	0.8510	0.5575	0.4183	0.8588	0.6275	0.7645
Prec_Tot	-0.2124	-0.2227	-0.0476	-0.1853	0.0553	-0.1601	-0.3238	-0.2367	-0.1720
SLR	-0.9275	-0.3344	-0.2432	-0.4434	0.3464	-0.6601	-0.4505	-0.8727	-0.3925
SoyS	-0.9240	-0.9348	-0.4208	-0.6303	0.1875	-0.6332	-0.7173	-0.9105	-0.8785
Mining	-0.5895	0.1180	0.2118	-0.1432	0.5563	-0.5882	-0.2012	-0.5229	-0.2603
Year	-0.5916	0.1791	0.2949	-0.0437	0.6083	-0.4638	-0.1426	-0.5131	-0.1672
	HydS_Pra	HydS_San	HydS_Tar	HydS_Vit	Prec_Tot	SLR	SoyS	Mining	Year
HydS_Ama	0.9691	0.6437	0.9361	0.4918	-0.2124	-0.9275	-0.9240	-0.5895	-0.5916
HydS_Cal	0.2656	0.6560	0.3082	0.8602	-0.2227	-0.3344	-0.9348	0.1180	0.1791
HydS_Cut	0.3209	0.7280	0.4345	0.7777	-0.0476	-0.2432	-0.4208	0.2118	0.2949
HydS_Estuarine	0.6061	0.8720	0.7057	0.8510	-0.1853	-0.4434	-0.6303	-0.1432	-0.0437
HydS_Ita	-0.1060	0.4588	-0.0073	0.5575	0.0553	0.3464	0.1875	0.5563	0.6083

HydS_Mac	0.8630	0.5457	0.9409	0.4183	-0.1601	-0.6601	-0.6332	-0.5882	-0.4638
HydS_Maz	0.4741	0.8698	0.5663	0.8588	-0.3238	-0.4505	-0.7113	-0.2012	-0.1426
HydS_Ocean	0.9127	0.7365	0.9317	0.6275	-0.2367	-0.8727	-0.9105	-0.5229	-0.5131
HydS_Oia	0.2672	0.6266	0.3319	0.7645	-0.1720	-0.3925	-0.8785	-0.2603	-0.1672
HydS_Pra	1.0000	0.6129	0.9569	0.4124	-0.2074	-0.9092	-0.8625	-0.6982	-0.6965
HydS_San	0.6129	1.0000	0.6899	0.8107	-0.1890	-0.5773	-0.6309	-0.2606	-0.2367
HydS_Tar	0.9569	0.6899	1.0000	0.4802	-0.1857	-0.8465	-0.7535	-0.6434	-0.6328
HydS_Vit	0.4124	0.8107	0.4802	1.0000	-0.1850	-0.3424	-0.7365	-0.0274	0.0454
Prec_Tot	-0.2074	-0.1890	-0.1857	-0.1850	1.0000	0.2080	0.5671	0.1879	0.1684
SLR	-0.9092	-0.5773	-0.8465	-0.3424	0.2080	1.0000	0.9850	0.9908	1.0000
SoyS	-0.8625	-0.6309	-0.7565	-0.7365	0.5671	0.9850	1.0000	0.9726	0.9850
Mining	-0.6982	-0.2606	-0.6434	-0.0274	0.1879	0.9908	0.9726	1.0000	0.9956
Year	-0.6965	-0.2367	-0.6328	0.0454	0.1684	1.0000	0.9850	0.9956	1.0000

Tabela S5: Análise da matriz de correlação relacionando superfície de água dos setores e municípios costeiros, e as variáveis antrópicas e hidroclimáticas (Correlação de Spearman). Fonte: Autores (2023).

<i>Loadings</i> dos componentes	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5	Componente6	Componente7	Componente8
HydS_Oia	0.2392	0.1640	0.1937	0.4627	0.1670	0.6304	0.3931	0.1401

HydS_Cal	0.2814	0.1113	-0.1961	-0.1097	-0.1833	-0.1142	0.03422	0.0338
HydS_Ama	0.2896	0.0278	-0.0735	-0.0671	-0.1042	0.0722	-0.3266	0.0430
HydS_Pra	0.2801	0.0133	-0.1901	-0.1729	0.1314	0.2108	-0.3343	0.2832
HydS_Tar	0.2779	-0.1226	-0.0687	0.0087	0.4219	0.0630	-0.0568	0.1431
HydS_Cut	0.2054	-0.4030	0.0149	-0.2354	0.5698	-0.0132	-0.1129	-0.2460
HydS_Ita	0.0419	-0.5841	0.3936	-0.1455	-0.4613	0.2712	-0.505	0.1192
HydS_Mac	0.2354	-0.1876	-0.3673	-0.4392	-0.2190	0.2292	0.4609	0.0058
HydS_San	0.2574	-0.2273	0.0989	0.1694	-0.0199	-0.4905	0.3783	0.0552
HydS_Maz	0.2782	-0.1229	0.1232	0.1612	0.0926	-0.1843	0.2250	-0.3837
HydS_Vit	0.2648	-0.1574	0.0264	0.3249	-0.1047	-0.3148	-0.1590	0.5725
Year	-0.2762	-0.2246	0.0744	-0.0299	0.1274	-0.0014	0.0878	0.0813
SoyS	-0.2648	-0.0163	-0.3899	-0.1051	0.1747	-0.0946	0.3537	0.4356
Prec_Tot	-0.1183	-0.4018	-0.6197	0.5422	-0.1426	0.0138	-0.1673	-0.2619
Mining	-0.2732	-0.2179	0.1217	0.0465	0.2271	0.0867	-0.0812	0.2315
SLR	-0.2747	-0.2333	0.0731	-0.0355	0.0897	0.0116	0.0902	0.0709
	Componente9	Componente10	Componente11	Componente12	Componente13	Componente14	Componente15	Componente16
HydS_Oia	0.0121	0.1131	0.1325	0.1098	0.1098	0.0928	0.0205	0.0292
HydS_Cal	0.2093	-0.2518	0.5555	-0.1520	0.5397	0.0132	-0.2735	0.0587
HydS_Ama	0.0425	0.1480	-0.4287	0.6277	0.3858	-0.0241	-0.1722	-0.0094

Desvio padrão	3.3795	1.4720	0.8801	0.7555	0.6016	0.4999	0.3895	0.3396
Proporção da variância	0.7138	0.1354	0.0484	0.0356	0.0226	0.0156	0.0094	0.0072
Proporção cumulativa	0.7138	0.8492	0.8976	0.9333	0.9559	0.9716	0.9810	0.9882
Importância dos componentes	Componente9	Componente10	Componente11	Componente12	Componente13	Componente14	Componente15	Componente16
Desvio padrão	0.2781	0.2540	0.1344	0.1211	0.0946	0.0481	0.0342	0.0112
Proporção da variância	0.0048	0.0040	0.0011	0.0009	0.0005	0.0001	0.00007	0.000007
Proporção cumulativa	0.9931	0.9971	0.9982	0.9992	0.9997	0.9999	0.9999	1.0000

Tabela S6: Análise dos Componentes principais (PCA) – superfície de água dos municípios costeiros e variáveis antrópicas e hidroclimáticas. Fonte: Autores (2023).

<i>Loadings</i> dos componentes	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5	Componente6	Componente7
HydS_Ocean	0.4127	0.1791	0.0011	0.1028	0.7962	0.3892	0.0373
HydS_Estuarine	0.3359	0.5082	-0.5179	0.5075	-0.2630	-0.1825	-0.0214
Year	-0.4157	0.0540	-0.3425	0.0226	0.0129	0.3095	0.7813
SoyS	-0.3882	-0.0411	0.4396	0.7990	0.1201	-0.0248	-0.0262

Prec_Tot	-0.2293	0.8357	0.4067	-0.2873	-0.0309	-0.0041	0.0089
Mining	-0.4109	0.0466	-0.3622	-0.1012	0.5277	-0.6240	-0.1393
SLR	-0.4143	0.0661	-0.3528	0.0018	-0.0518	0.5737	-0.6062
	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5	Componente6	Componente7
Variância dos componentes	5.5044	0.9095	0.3817	0.1473	0.0473	0.0092	0.0003
Importância dos componentes	Componente1	Componente2	Componente3	Componente4	Componente5	Componente6	Componente7
Desvio padrão	2.3461	0.9536	0.6178	0.3838	0.2176	0.0963	0.0186
Proporção da variância	0.7863	0.1299	0.0545	0.0210	0.0067	0.0013	0.00004
Proporção cumulativa	0.7863	0.9162	0.9708	0.9918	0.9986	0.9999	1.0000

Tabela S7: Análise dos Componentes principais (PCA) – superfície de água dos setores costeiros estuarinos e oceânicos, e variáveis antrópicas e hidroclimáticas. Fonte: Autores (2023).

Comprovante de Submissão

Environmental Science and Pollution Research

Water surface variability in oceanic and estuarine coasts of Amapá/Brazil –Manuscript Draft–

Manuscript Number:							
Full Title:	Water surface variability in oceanic and estuarine coasts of Amapá/Brazil						
Article Type:	Research Article						
Keywords:	Coastal basins; GIS; Soy; Sea level rise; Coastal ecosystems; Management						
Corresponding Author:	Alan Cavalcanti da Cunha, POST DOCTORAL Federal University of Amapá: Universidade Federal do Amapa BRAZIL						
Corresponding Author Secondary Information:							
Corresponding Author's Institution:	Federal University of Amapá: Universidade Federal do Amapa						
Corresponding Author's Secondary Institution:							
First Author:	Taís Silva Sousa, Master degree						
First Author Secondary Information:							
Order of Authors:	Taís Silva Sousa, Master degree Elizandra Perez Araújo, Master degree Alan Cavalcanti da Cunha, POST DOCTORAL						
Order of Authors Secondary Information:							
Funding Information:	<table border="1" style="width: 100%;"> <tr> <td>CAPES/PPGCA-UNIFAP (88887.636736/2021-00)</td> <td>MSc Taís Silva Sousa</td> </tr> <tr> <td>CNPq (314830/2021-9)</td> <td>PhD Alan Cavalcanti da Cunha</td> </tr> <tr> <td>FUNASA TEDPLAN (06/2018)</td> <td>PhD Alan Cavalcanti da Cunha</td> </tr> </table>	CAPES/PPGCA-UNIFAP (88887.636736/2021-00)	MSc Taís Silva Sousa	CNPq (314830/2021-9)	PhD Alan Cavalcanti da Cunha	FUNASA TEDPLAN (06/2018)	PhD Alan Cavalcanti da Cunha
CAPES/PPGCA-UNIFAP (88887.636736/2021-00)	MSc Taís Silva Sousa						
CNPq (314830/2021-9)	PhD Alan Cavalcanti da Cunha						
FUNASA TEDPLAN (06/2018)	PhD Alan Cavalcanti da Cunha						
Abstract:	<p>The coastal region of the state of Amapá is Brazil's most preserved and least populated, characterized by a variety of complex ecosystems sensitive to hydroclimatic variations and anthropogenic pressures. Despite its significant hydrological and ecological importance, the area is also the least studied and understood. This study aims to analyze the water surface variability of both oceanic and estuarine coasts from 1985–2022, correlating them with hydroclimatic (precipitation and sea level rise) and anthropogenic (soy and mining) variables. The methodology included the following steps: 1) obtaining water surface time-series data analyzed by coastal municipality and hydroclimatic and anthropogenic variables, as well as spatiotemporal analysis using Geographic Information Systems (GIS); 2) conducting analyses of the environmental and physiographic features of the coastal basins; and 3) performing statistical integration and data modeling to test for potential correlations that explain water surface variations. The results indicate that the water surfaces experienced distinct and significant increases, mainly influenced by the expansion of soy cultivation and sea level rise ($p < 0.05$). Furthermore, the oceanic area exhibited a greater simultaneous impact from anthropogenic and hydroclimatic variables ($R^2_{aj} = 90.55\%$) than the estuarine area ($R^2_{aj} = 62.46\%$). We conclude that considerable hydrological changes are occurring in the coastal region of Amapá, suggesting it be made an urgent priority in terms of management and conservation of these sensitive coastal ecosystems.</p>						
Suggested Reviewers:	<p>Claudio José Cavalcante Blanco, Doctor Professor, Federal University of Para: Universidade Federal do Para claudiojcbianco@gmail.com</p> <p>He has already coordinated or participated in more than 20 research, extension or development projects. He has experience in the area of Water Resources, with emphasis on Hydrology and Fluvial Hydraulics; has experience in projects of Small</p>						

	<p>Hydroelectric Plants (PCHs) and Hydrokinetic Plants.</p> <p>Carlos Moreira de Souza Junior, Doctor Senior Researcher, Amazon Institute of People and the Environment - AMAZON/Brazil souzajr@amazon.org.br Experience and research in spatial analysis for the conservation and sustainable development of the Amazon, mapping and modeling of carbon stocks in forests, and monitoring of deforestation and forest degradation. Technical-scientific coordinator MapBiomass Project.</p> <p>Serena Ceola, Doctor Associate Professor, University of Bologna Department of Civil Chemical Environmental and Materials Engineering: Università degli Studi di Bologna Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica Ambientale e dei Materiali irene.palazzoli@unibo.it Experiences and studies in the area analysis of remote sensing data for water resources sustainability and water-related risks, flood risk assessment, analysis of anthropogenic and hydrologic interactions. She also has a strong experience in stochastic analysis of hydrologic and hydraulic variables, ecohydrological experimental activity and stream ecology.</p>
Opposed Reviewers:	
Additional Information:	
Question	Response
§Are you submitting to a Special Issue?	No