

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

EVOLUÇÃO MULTITEMPORAL (2010-2024) DO CANAL DE ACESSO DO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS (CANAL NORTE - BAÍA DE MACAPÁ - MARGEM OCIDENTAL)

Dissertação apresentada por:

EDUARDO PANTOJA DA SILVA

Orientador: Dr. Maâmar El-Robrini (UFPA)

BELÉM – PARÁ

2025

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

S586e Silva, Eduardo Pantoja da.

Evolução multitemporal (2010-2024) do canal de acesso do estuário do rio Amazonas (canal Norte - baía de Macapá - margem ocidental) / Eduardo Pantoja da Silva. — 2025.

ix, 71 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Mamaâr El Robrini

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Belém, 2025.

1. Geomorfologia. 2. Navegação. 3. Morfodinâmica. 4. Sensoriamento remoto. I. Título.

CDD 551.41



Universidade Federal Do Pará Instituto De Geociências Programa De Pós-Graduação Em Oceanografia

EVOLUÇÃO MULTITEMPORAL (2010-2024) DO CANAL DE ACESSO DO ESTUÁRIO DO RIO AMAZONAS (CANAL NORTE - BAÍA DE MACAPÁ - MARGEM OCIDENTAL)

Dissertação Apresentada Por

EDUARDO PANTOJA DA SILVA

Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Oceanografia na Área de concentração: Linha 1 – Processos em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Aprovado: 27/02/2025

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Maâmar El Robrini (Orientador-UFPA) Documento assinado digitalmente MARIA DE LOURDES SOUZA SANTOS Data: 23/04/2025 19:13:11-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dra. Maria de Lourdes Souza Santos (Membro - UFRA) Documento assinado digitalmente

ANA PAULA LINHARES PEREIRA Data: 24/04/2025 08:26:29-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dra. Ana Paula Linhares Pereira (Membro - UFPA)



Documento assinado digitalmente **RENAN PEIXOTO ROSARIO** Data: 22/04/2025 14:16:31-0300 Verifique em https://validar.iti.gov.br

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

Dedico este trabalho a todos que acreditaram em mim em especial a minha família que sempre me apoia e me incentiva a alcançar novos objetivos.

RESUMO

O Rio Amazonas, o maior do mundo em volume de água, apresenta uma vazão média de $\pm 209.000 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma maré semidiurna que varia entre 4 m e 0,3 m durante a maré de sizígia. Sua bacia hidrográfica influencia profundamente a geomorfologia da Amazônia, moldando processos sedimentares e impactando diretamente a navegabilidade. A importância econômica da navegação em seu estuário contrasta com os desafios impostos pelas mudanças naturais e antrópicas, que afetam a estabilidade do canal ao longo do tempo. Neste contexto, esta dissertação analisa a evolução geomorfológica do canal norte do Rio Amazonas e da Baía de Macapá entre 2010 e 2024, avaliando os impactos da dinâmica sedimentar sobre a navegabilidade e a gestão portuária. A pesquisa foi conduzida por meio da análise de dados batimétricos, imagens de radar Sentinel-1 (38 cenas entre 2016 e 2024) processadas no Google Earth Engine e séries hidrológicas históricas. O processamento batimétrico (krigagem) foi realizado no SURFER, enquanto os dados espaciais foram tratados com ferramentas geoestatísticas em Python e QGIS (delimitação de bancos de areia e cálculo de áreas de modificação) para identificar padrões de erosão e deposição. A região de estudo, altamente dinâmica, sofre a influência combinada das marés, da descarga fluvial e da sedimentação, resultando na formação e migração de bancos arenosos e canais instáveis, que impactam diretamente a profundidade do leito e a segurança da navegação. Os resultados indicaram uma redução da profundidade média do canal norte de 26 m para 22 m, acompanhada por uma migração para leste-nordeste, evidenciada pela erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. A análise tridimensional revelou que, enquanto em 2011 a morfologia do leito era relativamente homogênea, em 2024 observou-se uma compartimentação mais acentuada, refletindo uma taxa de mudança de 0,307 m/ano. O estudo também apontou variações significativas na extensão das áreas emersas na Baía de Macapá. Durante anos de El Niño (2016, 2018, 2023), a acreção média foi de 8.326,93 km², enquanto anos de La Niña (2017, 2020, 2021, 2022) registraram erosão média de -13.941,27 km². A regressão linear apresentou um R² ajustado de 0,163, sugerindo que tanto a variabilidade hidrológica quanto intervenções humanas influenciam a dinâmica sedimentar da região. As transformações geomorfológicas observadas impactam diretamente a gestão da hidrovia e do complexo portuário de Santana, exigindo estratégias eficazes para garantir a navegabilidade. O sensoriamento remoto revelou-se uma ferramenta essencial para monitorar essas mudanças, fornecendo subsídios estratégicos para otimizar a infraestrutura portuária e garantir a sustentabilidade da navegação na região. A pesquisa destaca a necessidade de monitoramento contínuo e de um planejamento hidrodinâmico eficiente para garantir a segurança da navegação e a eficiência logística na Amazônia. A integração de técnicas de geoprocessamento e batimetria contribui para um planejamento mais preciso, permitindo a adoção de medidas que mitiguem os impactos da sedimentação e garantam a viabilidade do transporte hidroviário na região. Assim, os resultados deste estudo oferecem subsídios fundamentais para a navegação da hidrovia, promovendo maior eficiência e segurança na navegação no canal norte do rio Amazonas.

Palavra-Chave: geomorfologia; navegação; morfodinâmica; sensoriamento remoto

ABSTRACT

The Amazon River, the world's largest by water volume, has an average discharge of approximately 209,000 m³/s and exhibits a semidiurnal tidal range that varies from 0.3 m to 4 m during spring tides. Its vast watershed profoundly shapes the geomorphology of the Amazon Basin, driving sedimentary processes and directly affecting navigability. The economic importance of navigation within its estuary contrasts sharply with the challenges posed by both natural and anthropogenic alterations, which compromise the long-term stability of the channel. This dissertation analyzes the geomorphological evolution of the Amazon River's northern channel and Macapá Bay from 2010 to 2024. It assesses the impacts of sedimentary dynamics on navigability and port management. The research methodology encompassed the analysis of bathymetric data, 38 Sentinel-1 radar scenes (captured between 2016 and 2024) processed via the Google Earth Engine platform, and historical hydrological records. Bathymetric processing was carried out in SURFER using the kriging method, while spatial analyses were performed with geostatistical tools in Python and QGIS. This included the delineation of sandbanks and the calculation of modification areas to identify erosion and deposition patterns. The study area is highly dynamic, influenced by tidal forces, river discharge, and sedimentation. These interacting processes drive the formation and migration of sandbanks and unstable channels, which directly affect bed depth and navigational safety. The findings indicate a reduction in the northern channel's average depth from 26 m to 22 m, along with a noticeable east-northeastward migration. This shift is evidenced by erosion along the left bank and simultaneous deposition on the right bank. Three-dimensional analysis revealed that while the bed morphology was relatively homogeneous in 2011, by 2024 it had become more compartmentalized, reflecting a rate of change of 0.307 m per year. The study also highlights significant variations in the spatial extent of emerged areas within Macapá Bay. During El Niño years (2016, 2018, 2023), average accretion reached 8,326.93 km², whereas La Niña years (2017, 2020, 2021, 2022) experienced average erosion of -13,941.27 km². Linear regression analysis produced an adjusted R² value of 0.163, indicating that hydrological variability and human activity influence the region's sedimentary dynamics. The observed geomorphological changes directly affect waterway management and the Santana port complex, underscoring the need for effective strategies to ensure ongoing navigability. Remote sensing has proven invaluable for monitoring these dynamic transformations, offering strategic insights to enhance port infrastructure planning and ensure the long-term sustainability of navigation in the region. This research reinforces the necessity of continuous monitoring and integrated hydrodynamic planning to maintain navigational safety and logistical efficiency. The combined use of geoprocessing and bathymetric techniques enables more accurate planning and the implementation of measures to mitigate sedimentation impacts, thereby preserving the viability of inland waterway transport. Ultimately, the results provide essential support for managing navigation in the Amazon River's northern channel, promoting enhanced efficiency and safety.

Keywords: geomorphology; navigation; morphodynamics; remote sensing

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Unidades geomorfológicas em uma bacia hidrográfica. Fonte: (Pinheiro & Cardoso
2019)
Figura 2 - Representação esquemática dos processos na formação de uma bacia de drenagem.
Fonte: (Encyclopædia Britannica 2020)5
Figura 3 - Perfil transversal de um rio. Fonte: Ferraz (2019)
Figura 4 - Imagem de satélite mostrando o delta do Missisipi/USA. Fonte: (NASA 2004)7
Figura 5 - Imagem de satélite mostrando o rio São Francisco/BR. Fonte: (INPE 2017)7
Figura 6 - Imagem de satélite mostrando o estuário do rio Amazonas/BR. Fonte (Melfi et al.
2006)
Figura 7 - Imagem de satélite mostrando o delta do rio Paraná/BR. Fonte: (Lindsey 2012)8
Figura 8 - Mapa da localização da área de estudo na margem do estado do Amapá17
Figura 9 - Área da bacia hidrográfica do rio Amazonas desde a nascente até a foz. Fonte:
Adaptado de Castello et al. (2013)
Figura 10 - Mapa de precipitação do estado do Amapá. Fonte: Nascimento et al. (2021)22
Figura 11 - Mapa da baía de Macapá, situada no canal norte na foz do rio amazonas. Fonte:
Barros et al. (2017)
Figura 12 - Perfil transversal realizado na baía de Macapá caracterizando as unidades
geomorfológicas. Fonte: Barros et al. (2017)25
Figura 13 - Áreas de limite de movimentação da navegação interna, que caracteriza o
transporte interno de pessoas e mercadorias. Fonte: Capitania dos Portos do Amapá
(2021)

DEDICATÓRIA	iv
RESUMO	V
ABSTRACT	vi
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	vii
1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
2 INTRODUÇÃO	2
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 GEOMORFOLOGIA FLUVIAL	5
3.2 HISTÓRICO DA NAVEGAÇÃO NO RIO AMAZONAS	10
3.3 NORMAS DE ACESSO	11
3.4 MOVIMENTAÇÃO PORTUÁRIA	12
4 OBJETIVOS	16
4.1 OBJETIVO GERAL	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5 ÁREA DE ESTUDO	17
6 MATERIAIS E MÉTODOS	
6.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO	18
6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	18
6.3 PROCESSAMENTO DE DADOS	18
6.4 DADOS BATIMÉTRICOS E HIDROGRÁFICOS	19
6.5 DADOS DE SATÉLITE	19
7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	20
7.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO AMAZONAS	20
7.1.1 Aspectos Hidrológicos	21
7.2 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS	21
7.2.1 Indice de chuva	21
7.2.2 Padrão de Ventos	23
7.2.3 Eventos extremos	23
7.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS	24
7.3.1 Dinâmica dos fundos	24
7.4 ASPECTOS DA NAVEGAÇÃO NA FOZ DO RIO AMAZONAS	26
8 RESULTADOS	

SUMÁRIO

9 CONSIDERAÇÕES GERAIS	
REFERÊNCIAS	
ANEXO A – Artigo 1	
ANEXO B – Artigo 2	

1 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação de mestrado está apresentada da seguinte forma: 1 Organização da Dissertação; 2 Introdução; 3 Referencial Teórico; 4 Objetivos; 5 Localização da área de Estudo; 6 Materiais e Métodos; 7 Caracterização da área de estudo; 8 Resultados; 9 Considerações gerais e Referências. Em seguida os resultados foram subdivididos em artigos para publicação: Apêndice A: Artigo 1- Observações da evolução (2016–2024) de bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais na baía de Macapá (margem ocidental do rio amazonas); Apêndice B: Artigo 2 - Evolução geomorfológica do canal norte: desafios e oportunidades para a navegação na Amazônia ocidental.

2 INTRODUÇÃO

Um sistema fluvial desempenha um papel significativo na modulação da topografia terrestre, operando como um complexo modelador através da intricada rede de drenagem associada a uma bacia hidrográfica. A dinâmica dos processos fluviais é uma consequência da interação complexa entre diversos elementos. Estes incluem variações na descarga de água, transporte de diferentes tipos de sedimentos, a configuração geométrica do canal fluvial e do terreno circundante, bem como a cobertura e uso da terra (Fontes 2010).

A confluência destes fatores culmina na dinâmica dos processos erosivos e deposicionais, cuja interação é intrinsecamente conectada às características internas da bacia hidrográfica (Nittrouer *et al.* 2021). Além disso, tais processos são sensíveis a influências externas que operam em escalas regionais e continentais, influenciando assim a dinâmica da região como um todo. Os canais fluviais exibem uma ampla gama de características geomorfológicas que refletem os complexos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos ao longo do tempo (Bastos *et al.* 2019).

Estas características incluem meandros, que são curvas sinuosas que se desenvolvem naturalmente à medida que o fluxo de água se desloca ao redor de obstáculos geológicos e devido à variação da velocidade da água. Além disso, barras de areia frequentemente se formam no leito dos canais, resultando em áreas de acúmulo de sedimentos que podem afetar a hidrodinâmica local (Fricke *et al.* 2019). Essas transformações alteram o fluxo de saída de energia e introduzem novos aportes de matéria, demandando adaptações por parte do sistema para recuperar um perfil dinâmico de equilíbrio que se estabelecem em feições geomorfológicas como apresentadas na **Figura 1**.



Figura 1 - Unidades geomorfológicas em uma bacia hidrográfica. Fonte: (Pinheiro & Cardoso 2019).

O transporte de sedimentos e materiais solúveis desempenha um papel preponderante no balanço hidrossedimentológico do sistema fluvial. Materiais transportados pela rede de drenagem podem assumir diferentes formas, incluindo carga sedimentar de fundo, suspensão no fluxo da água e dissolução de nutrientes na água. Mudanças naturais, tais como variações climáticas e reajustes morfológicos do canal, aliadas a influências antrópicas, podem provocar desequilíbrios no sistema, intensificando processos erosivos e deposicionais, como o assoreamento (Frizola & Guyot 2011).

Além disso, os canais fluviais desempenham um papel vital no transporte de sedimentos e nutrientes para os ambientes costeiros, afetando a dinâmica das zonas costeiras e a formação de deltas (Syvitski *et al.* 2005). A Marinha do Brasil através da NORMAM (Normas da Autoridade Marítima para Auxílios à Navegação) N° 17, define canal de navegação como sendo a passagem marítima desimpedida, entre obstáculos ou restrições à navegação. Em caso de a passagem se direcionar a um porto ou terminal, determina-se como um canal de acesso (Marinha do Brasil 2021).

O estuário do rio Amazonas, despeja anualmente mais de um bilhão de toneladas de sedimentos em suspensão na plataforma continental do Amazonas (Kuehl *et al.* 1986). Este estuário, um dos maiores e mais relevantes rios do mundo, com extensão superior a 6.400 km e uma vasta bacia hidrográfica de cerca de 7 milhões de km² (Parsons & Schultz 2018), tem sua dinâmica fluvial profundamente influenciada por fatores tectônicos, climáticos e antropogênicos, que conjuntamente afetam a morfodinâmica e evolução do canal do rio (Gallo & Vinzon 2015).

O canal norte do estuário do rio Amazonas, estendendo-se da foz do rio até a cidade de Manaus, é uma via fluvial primordial na região amazônica. Segundo Baltazar (2013), a morfologia dessa área é marcada por canais secundários, bancos de areia, depósitos lamosos, ilhas fluviais e áreas de sedimentação distribuídas ao longo da foz do rio Amazonas. A evolução constante do canal norte ao longo dos anos é resultado da interação de diversos fatores, incluindo a geologia regional, processos sedimentares e hidrodinâmicos. A influência das variações de maré semidiurnas, conforme observado por Gallo & Vinzon (2005), exerce controle sobre o fluxo de água no estuário e impacta a distribuição de sedimentos ao longo do canal, inclusive atingindo áreas mais interiores, como a cidade de Óbidos/PA.

Os sedimentos transportados pelo rio Amazonas têm um papel crucial na formação de ilhas fluviais e bancos de areia e lama, processo intensamente influenciado pela topografia, variações sazonais do rio e mudanças climáticas na região (Barros *et al.* 2017). A compreensão

desses depósitos de lama e areia é de importância multifacetada, especialmente em termos de navegação e impacto na hidrodinâmica, afetando a maré e a dispersão de nutrientes e materiais em suspensão, essenciais para o transporte continental que ocorre desde as nascentes até o oceano (Vilela 2011).

A intervenção humana desempenha um papel significativo na evolução dos canais, por meio da construção de barragens e instalações portuárias, influenciando diretamente o complexo regime de transporte de sedimentos na região Amazônica. As mudanças logísticas decorrentes de avanços e revoluções na área afetam a navegação interna da hidrovia amazônica, encurtando tempos de viagem e aumentando a capacidade de carga e passageiros, ao mesmo tempo em que impulsionam mudanças na produção e estratégias de acumulação no setor de transporte (Neto & Nogueira 2019). Contudo, a viabilidade limitada para a execução de projetos de engenharia em larga escala restringe a circulação interna, destacando a importância contínua das embarcações tradicionais e modernas para promover uma navegação espacial eficaz na região.

O canal norte do estuário do rio Amazonas apresenta profundidades naturais de 15 m, entretanto, nas proximidades da Barra Norte, caracteriza-se por uma área crítica para a navegação devido ao aumento na migração de bancos arenosos, influenciada pelo regime de macromaré (Capitania dos Portos do Amapá 2021). Esses bancos alongados, alinhados com o fluxo hidrodinâmico, são encontrados ao longo dos canais de enchente e vazante, exibindo um padrão cíclico de migração (Arentz 2009). A interação complexa entre correntes marítimas e fluxos fluviais dificulta a navegação na foz do Amazonas, demandando expertise para garantir uma navegação segura (Confederação Nacional dos Transportes 2019).

Assim, a evolução contínua do canal norte do rio Amazonas é resultante de uma complexa interação entre fatores variados, como variações de maré, processos sedimentares e hidrodinâmicos, influências climáticas e ações humanas. É fundamental que os estudos de monitoramento das áreas de navegação sejam mantidos para uma compreensão abrangente dos processos ocorrentes na região e para desenvolver estratégias de gerenciamento sustentável dessa vital via fluvial na Amazônia. Portanto, enquanto a navegação na região da foz do rio Amazonas traz consigo oportunidades econômicas significativas, requer uma abordagem cuidadosa e adaptativa para enfrentar os desafios impostos pelo ambiente aquático singular e diverso.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 GEOMORFOLOGIA FLUVIAL

A Geomorfologia de canais é o ramo da Geomorfologia que estuda as formas e os processos relacionados aos cursos de água. Os canais são estruturas dinâmicas que se ajustam às variações do clima, da vegetação, da geologia e da ação humana. A Geomorfologia de canais utiliza conceitos e métodos da hidrologia, da hidráulica, da sedimentologia e da ecologia para compreender e gerenciar os sistemas fluviais.

Um dos aspectos mais importantes da geomorfologia de canais é a análise das bacias de drenagem, que são as áreas delimitadas pelos divisores de água que alimentam um determinado canal. As bacias de drenagem apresentam características como área, forma, relevo, solo, vegetação e uso da terra que influenciam o regime hidrológico e sedimentológico dos canais (**Figura 2**). A bacia de drenagem é considerada a unidade básica de estudo em geomorfologia fluvial (Stevaux & Latrubesse 2017).



Figura 2 - Representação esquemática dos processos na formação de uma bacia de drenagem. Fonte: (Encyclopædia Britannica 2020)

A Geomorfologia de canais também se ocupa das transformações que ocorrem nos sistemas fluviais ao longo do tempo. Essas transformações podem ser naturais ou induzidas pelo homem, e podem afetar a forma, a função e a qualidade dos rios (Charlton 2008). As metamorfoses fluviais podem ser causadas por mudanças climáticas, tectônicas, vulcânicas, biológicas ou antrópicas. Algumas das intervenções humanas que alteram os sistemas fluviais são: o

desmatamento, a agricultura, a urbanização, a mineração, a construção de barragens, canais, pontes e diques, a retirada de água e areia, o lançamento de esgotos e resíduos sólidos, entre outras. Essas intervenções podem provocar alterações no regime hidrológico, na qualidade da água, na erosão e deposição de sedimentos, na estabilidade do leito e das margens, na biodiversidade e nos serviços ecossistêmicos dos rios (Conceição 2008).

Vale destacar o papel fundamental das características físicas do ambiente na formação dos canais, seja de maré, fluvial, pluvial ou artificial. Ao longo do tempo conforme as características do ambiente de formação os canais sofrem alterações. Os canais de escoamento podem ser naturais ou artificiais, e apresentam diferentes formas, dimensões, padrões e dinâmicas. A morfologia dos canais depende de fatores como o volume e a velocidade da água, a quantidade e o tamanho dos sedimentos, a resistência do leito e das margens, e as perturbações antrópicas (Silva & Rodrigues 2016). A morfologia dos canais determina a capacidade de transporte e armazenamento de água e sedimentos, bem como a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos associados aos rios (Charlton 2008).

Dentro dos estudos sobre canais fluviais, de acordo com o ambiente, é possível encontrar diversos tipos de canais e diferentes tipos de leito de um rio, de acordo com a variação do nível e da vazão das águas. A Figura *3* apresenta o leito de vazante é o mais estreito e sinuoso, que acompanha o fundo do rio nas épocas de seca. O leito menor é o mais regular e definido, que apresenta alternância de profundidade e largura ao longo do curso. O leito maior periódico ou sazonal é o que se alarga e se inunda nas épocas de chuva, podendo abrigar vegetação rasteira. O leito maior excepcional (foodplain) é o que se expande nas ocasiões de enchentes extremas, que podem ocorrer em intervalos irregulares e longos (Spinelli 2015).



Figura 3 - Perfil transversal de um rio. Fonte: Ferraz (2019).

Em relação aos canais fluviais eles podem ser classificados em quatro tipos principais, de acordo com a sua morfologia e dinâmica: retilíneos, meandrantes, anastomosados e entrelaçados. Cada tipo de canal apresenta características distintas quanto à sinuosidade, ao grau de entrelaçamento, à relação entre largura e profundidade, à erosão e à deposição de sedimentos (Cassiano & Girão 2020).

Os canais retilíneos: são aqueles que apresentam um traçado quase reto, com pouca sinuosidade (menor que 1,5). São raros na natureza e geralmente associados a áreas com controle tectônico ou a tributários deltaicos. Um exemplo é o delta do Mississipi (Figura 4).



Figura 4 - Imagem de satélite mostrando o delta do Missisipi/USA. Fonte: (NASA 2004) Já os meandrantes: são aqueles que apresentam curvas sinuosas, largas e regulares, formadas pelo processo de erosão na margem côncava e deposição na margem convexa. Possuem sinuosidade maior que 1,3 e planícies de inundação bem desenvolvidas (Stevaux & Latrubesse 2017). São comuns em áreas úmidas com vegetação ciliar e sedimentos coesivos. Um exemplo é o rio São Francisco (Figura 5)



Figura 5 - Imagem de satélite mostrando o rio São Francisco/BR. Fonte: (INPE 2017)

Os anastomosados: são aqueles que apresentam dois ou mais canais separados por ilhas aluviais alongadas e estáveis, formadas por sedimentos finos e vegetação densa. Possuem sinuosidade variável e planícies de inundação amplas (Charlton 2008). São comuns em áreas úmidas com baixa declividade e alta carga sedimentar. Um exemplo é o rio Amazonas (Figura 6).



Figura 6 - Imagem de satélite mostrando o estuário do rio Amazonas/BR. Fonte (Melfi et al. 2006)

Por fim, os canais entrelaçados ou ramificados: são aqueles que apresentam vários canais separados por bancos de areia ou cascalho, formados por sedimentos grossos e instáveis. Possuem sinuosidade baixa e planícies de inundação estreitas (Fontes 2010). São comuns em áreas áridas ou semiáridas com alta declividade e alta variabilidade hidrológica. Um exemplo é o rio Paraná (Figura 7).



Figura 7 - Imagem de satélite mostrando o delta do rio Paraná/BR. Fonte: (Lindsey 2012)

Esses padrões podem se alterar ao longo do tempo, em resposta a eventos naturais ou antrópicos que modificam o balanço entre erosão e deposição nos canais. Essas mudanças são chamadas de metamorfoses fluviais e podem ter consequências ambientais e socioeconômicas significativas (Conceição 2008, Schumm 1968). De modo, que os canais fluviais estão em constante evolução ao longo do tempo, respondendo às mudanças climáticas, tectônicas, hidrológicas e antrópicas que afetam a sua bacia hidrográfica.

A evolução dos canais fluviais ao longo do tempo depende de diversos fatores, como o clima, a litologia, a tectônica, a vegetação, a ocupação humana e os eventos hidrológicos (Bastos *et al.* 2019). De modo, que para compreender os processos de evolução dos canais fluviais ao longo do tempo, é necessário recorrer a diferentes fontes de informação, como dados históricos, mapas, imagens de satélite, levantamentos topográficos e batimétricos, análises sedimentológicas e geoquímicas, modelagem numérica e experimentação em laboratório (Moraes & Lorandi 2016). Além disso, é preciso considerar os fatores que controlam a dinâmica fluvial em diferentes escalas espaciais e temporais, desde os processos globais até os locais, e desde os eventos episódicos como El, Ninõ e La ninã, assim como, eventos históricos.

Os canais fluviais são formas resultantes da ação erosiva, transportadora e deposicional das águas correntes sobre a superfície terrestre. Um dos processos físicos mais importantes na evolução dos canais fluviais é o ajuste dinâmico, que consiste na capacidade dos rios de se adaptarem às mudanças ambientais, mantendo o equilíbrio entre a energia disponível e a resistência do leito (Leopold *et al.* 1995). O ajuste dinâmico pode ocorrer em diferentes escalas de tempo e espaço, e envolve alterações na forma, na dimensão e no padrão dos canais (Schumm 1968).

A forma dos canais fluviais é determinada pela interação entre o fluxo de água e o material do leito e das margens. A forma pode ser descrita por meio de parâmetros geométricos, como a largura, a profundidade, a área da seção transversal, o perímetro molhado, o raio hidráulico e a declividade (Collischonn 2013).

A dimensão dos canais fluviais é definida pelo tamanho relativo dos elementos que compõem a forma, como a largura média, a profundidade média e o raio de curvatura dos meandros (Cristofoletti 1981). A dimensão dos canais está relacionada à quantidade de energia disponível para realizar o trabalho geomórfico de erosão e deposição. De acordo com Collischonn (2013) a dimensão dos canais pode ser estimada por meio de relações empíricas entre os parâmetros geométricos e hidrológicos, como a vazão média ou máxima, a velocidade média ou máxima e o número de Froude.

O padrão dos canais fluviais é definido pela disposição espacial da forma em planta dos rios na superfície do terreno. O padrão dos canais está associado à variação da energia específica ao longo do curso do rio, que depende da declividade do canal e da rugosidade do leito. O padrão dos canais também pode ser influenciado pela compartimentação litológica, pela estrutura geológica e pela vegetação. O padrão dos canais pode ser analisado por meio de índices geométricos, como a sinuosidade, a densidade de drenagem, a hierarquia fluvial e o coeficiente de ramificação (Spinelli 2015, Syvitski *et al.* 2009).

Para estudar os processos físicos da evolução dos canais fluviais ao longo do tempo, é necessário utilizar fontes de informação que permitam reconstruir as condições hidrológicas, sedimentológicas e morfológicas pretéritas (Cristofoletti 1981). Algumas dessas fontes são: registros históricos, mapas antigos, fotografias aéreas, imagens de satélite, dados topográficos, testemunhos de sondagem, datações radiométricas e análises isotópicas. Além disso, é possível utilizar modelos matemáticos ou físicos que simulam os processos fluviais em diferentes cenários ambientais (Horton 1945).

3.2 HISTÓRICO DA NAVEGAÇÃO NO RIO AMAZONAS

A navegação a vapor na Amazônia também foi favorecida pela abertura dos rios brasileiros à navegação estrangeira, em 1866, e pela expansão da economia da borracha, que atraiu imigrantes e investidores para a região. A Companhia de Navegação e Comércio do Amazonas enfrentou a concorrência de outras empresas nacionais e estrangeiras, como a Amazon Steam Navigation Company, fundada em 1870 pelos ingleses.

A história da navegação na baía de Macapá e no cabo norte do rio Amazonas também envolveu episódios de conflitos armados, como a Cabanagem (1835-1840), a Revolta da Armada (1893-1894) e a Questão do Amapá (1895-1900). Nesses eventos, a Marinha do Brasil teve um papel importante na defesa da soberania nacional e da ordem pública. Um exemplo foi a atuação do navio Almirante Barroso, que participou da repressão à Cabanagem e da Questão do Amapá. Segundo um artigo publicado na Revista Marítima Brasileira

A história da navegação na baía de Macapá e no cabo norte do rio Amazonas é, portanto, uma história de desafios, conquistas, transformações e resistências. Ela revela a importância estratégica, econômica e cultural dessa região para o Brasil e para o mundo. Ela também mostra o papel fundamental da Marinha do Brasil na proteção das nossas riquezas e no cuidado com a nossa gente.

A navegação é uma atividade humana muito antiga, que remonta aos tempos da antiguidade, quando os povos utilizavam os rios e os mares para se deslocar, comerciar e

explorar novos territórios (Queiroz & Souza 2017). No Brasil, a navegação interior teve um papel importante na expansão territorial e na ocupação das regiões menos povoadas, especialmente na região norte, onde o transporte hidroviário é o principal modal de transporte (Agência Nacional dos Transportes Aquaviários 2013).

De acordo, com a Agência Nacional dos Transportes Aquaviários (2020), a região norte possui uma grande extensão de rios navegáveis, que formam as principais hidrovias da região: a hidrovia do Amazonas, a hidrovia do Tocantins-Araguaia e a hidrovia do Madeira. Essas hidrovias permitem o escoamento da produção agrícola, mineral e industrial da região, bem como o abastecimento das populações ribeirinhas. Além disso, a navegação fluvial também é uma fonte de turismo e de integração cultural na região.

A navegação fluvial na região norte enfrenta alguns desafios, como a falta de infraestrutura portuária, a sazonalidade das chuvas, que afeta o nível dos rios, e os impactos ambientais causados pela dragagem e pela poluição (Oliveira Neto & Nogueira 2019). Para superar esses desafios, é necessário investir em obras de melhoria das vias navegáveis, em tecnologias de monitoramento e controle do tráfego fluvial e em políticas de preservação dos recursos hídricos e da biodiversidade (Queiroz & Souza 2017).

A evolução e a importância da navegação na região norte são temas relevantes para compreender a história, a economia e a cultura dessa região tão diversa e rica em potencialidades. A navegação fluvial é uma atividade que contribui para o desenvolvimento sustentável da região, desde que seja realizada com planejamento e responsabilidade.

3.3 NORMAS DE ACESSO

As normas de acesso fluvial estabelecidas pela Marinha do Brasil têm como objetivo garantir a segurança da navegação, a salvaguarda da vida humana e a prevenção da poluição hídrica nas águas interiores do país. Essas normas são elaboradas e atualizadas pela Diretoria de Portos e Costas (DPC) e pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), em conjunto com as Capitanias Fluviais, e estão organizadas em séries distintas, conforme o assunto abordado.

A série 200 das Normas da Autoridade Marítima (NORMAM) trata especificamente das embarcações empregadas na navegação interior, definindo os requisitos técnicos, operacionais e administrativos para o seu registro, inspeção, certificação e fiscalização. A NORMAM-201, por exemplo, estabelece as regras para o tráfego e permanência de embarcações estrangeiras nas hidrovias brasileiras, bem como as condições para o exercício da atividade de praticagem nessas águas. Além das NORMAM, a Marinha do Brasil também emite portarias e orientações de navegação para regulamentar o acesso fluvial em trechos críticos ou de interesse especial, como é o caso da Portaria nº 158/CFAOC, de 18 de agosto de 2023, que dispõe sobre as medidas de segurança a serem adotadas pelas embarcações durante a passagem pelo canal do Quilombo, no rio Amazonas.

As normas de acesso fluvial são fundamentais para orientar os navegantes e os usuários das hidrovias sobre os direitos e deveres relacionados à navegação interior, bem como para promover o desenvolvimento sustentável dessa modalidade de transporte no Brasil.

As normas de acesso fluvial estabelecidas pela Marinha do Brasil para o Cabo norte do Rio Amazonas são regulamentadas pela NORMAM-17/DHN, que dispõe sobre as atividades de hidrografia e navegação na Amazônia Legal. Essa norma tem como objetivo garantir a segurança da navegação, a preservação do meio ambiente e o respeito às comunidades ribeirinhas, bem como orientar os navegantes sobre os procedimentos e requisitos para a realização de levantamentos hidrográficos, batimétricos, geodésicos e cartográficos na região.

De acordo com a NORMAM-17/DHN, o acesso fluvial ao Cabo norte do Rio Amazonas que dá acesso a baia de Macapá é restrito aos navegantes que possuam autorização prévia da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) e que cumpram as normas internacionais e nacionais de navegação, tais como a Convenção sobre o Regulamento Internacional para Evitar Abalroamentos no Mar (RIPEAM) e a NORMAM-01/DPC, que estabelecem as regras de governo, luzes, marcas, sinais sonoros e manobras para evitar colisões entre embarcações.

Além disso, os navegantes devem observar as informações náuticas disponibilizadas pela DHN, tais como as cartas náuticas, os avisos aos navegantes, as publicações náuticas e os boletins meteorológicos, que fornecem dados sobre as condições hidrográficas, meteorológicas e geográficas da área de navegação. Os navegantes devem ainda utilizar os equipamentos e instrumentos de navegação adequados e manter uma comunicação constante com os órgãos de controle do tráfego marítimo.

3.4 MOVIMENTAÇÃO PORTUÁRIA

A movimentação portuária na região da barra norte do rio Amazonas e na baía de Macapá é de grande importância para a economia e o desenvolvimento da região norte do Brasil. Essa região abrange os estados do Pará, Amapá e Amazonas, que possuem diversos terminais portuários que atendem às demandas de transporte de cargas de diferentes setores, como o agronegócio, a indústria, o comércio e o abastecimento. Neste texto, será apresentada a evolução dessa movimentação portuária nos últimos anos, utilizando dados da Agência Nacional de Transportes Aquaviários (ANTAQ), e os principais desafios e oportunidades para o seu aprimoramento.

O rio Amazonas é a principal via fluvial utilizada para o transporte de cargas na região norte, tendo sido responsável por mais de 34 milhões de toneladas em 2022, segundo dados da ANTAQ (2023). O rio possui uma extensão de cerca de 6.400 km, sendo o maior do mundo em volume de água e o segundo em comprimento. Ele atravessa diversos países da América do Sul, como Peru, Colômbia, Venezuela e Brasil, e deságua no Oceano Atlântico, formando um amplo estuário que abrange as regiões da barra norte e da baía de Macapá.

A barra norte do rio Amazonas é um trecho raso e lamacento de 24 milhas na foz do rio, que delimita o calado (parte submersa) de todas as embarcações que navegam pela Bacia Hidrografica do Rio Amazonas (BHRA). O calado é um fator determinante para a capacidade de carga dos navios, pois quanto maior ele for, maior será o volume que eles podem transportar. Por isso, a barra norte representa um gargalo para a movimentação portuária na região, pois impõe restrições à navegação de embarcações de grande porte, especialmente nos períodos de seca do rio.

A seca do rio Amazonas tem se agravado nos últimos anos, registrando recorde em 2022, de acordo com dados da Agência Nacional de Água e Saneamento Básico (ANA), o que impactou substancialmente a navegação na região. Como consequência, entre outubro e novembro do ano passado, houve uma restrição de 40% a 50% na capacidade de navegação pela via. Além disso, a Marinha restringiu a navegação noturna em pontos críticos do rio por meio da Portaria Nº 158, publicada em agosto no Diário Oficial da União (DOU), pela Capitania Fluvial da Amazônia Ocidental (CFAOC), o que reforça a gravidade da situação na região.

Diante desse cenário, diversas iniciativas têm sido desenvolvidas para superar os desafios impostos pela barra norte e ampliar a eficiência das operações portuárias na região. Uma delas é a implantação de um sistema de calado dinâmico na barra norte do rio Amazonas, que visa calcular o quanto um navio pode aumentar o seu volume submerso, sem risco de encalhe, considerando informações como os intervalos de maré, entre outras. Esse sistema integrado de coleta e processamento de dados é fruto de uma parceria entre a Cooperativa de Apoio e Logística aos Práticos da Zona de Praticagem 1 (Unipilot) e o Comando do 4º Distrito Naval, assinada em fevereiro de 2022.

O sistema conta com o apoio técnico da Argonáutica, empresa que nasceu na USP e desenvolveu o calado dinâmico no Porto de Santos, e do Laboratório de Dinâmica de UFRJ. Sedimentos Coesivos da Todas as informações coletadas pelas boias meteorocenográficas instaladas na barra norte serão compartilhadas via satélite com a Marinha, responsável por autorizar o calado máximo na região. A expectativa é aumentar o calado das embarcações dos 11,90 metros (autorizado em fase de testes) para 12,50 metros em certas janelas de maré: um ganho de dez mil toneladas por navio Panamax que beneficiará toda a área de abrangência comercial dos portos da BHRA.

Outra iniciativa relevante para a movimentação portuária na região da barra norte do rio Amazonas e na baía de Macapá é o chamado Arco norte, que consiste em um conjunto de portos localizados nos estados do Pará, Amapá, Maranhão e Rondônia, que têm como objetivo escoar a produção agrícola do Centro-Oeste brasileiro pelo norte do país, reduzindo os custos logísticos e aumentando a competitividade do setor. O Arco Norte tem se consolidado como uma alternativa aos portos do Sul e do Sudeste, que sofrem com a saturação e a distância dos principais polos produtores.

De acordo com dados da ANTAQ (2022), os portos do Arco Norte movimentaram 52,6 milhões de toneladas de grãos em 2021, um aumento de 13% em relação a 2020. O destaque entre as instalações foi o terminal Terfron (PA), que movimentou no ano passado 5,4 milhões de toneladas, garantindo um aumento de 51,6% em relação ao ano anterior. O terminal está localizado na baía de Macapá, que é uma área portuária estratégica para o escoamento da produção agrícola do Centro-Oeste e do norte do país, pois possui profundidade natural que permite a atracação de navios de grande porte.

A baía de Macapá também abriga outros terminais portuários importantes para a região, como o Porto de Santana (AP), que é o principal porto do estado e movimenta cargas diversas, como minério de manganês, soja, milho, combustíveis e fertilizantes. O porto possui uma área total de 1.200 hectares e um cais acostável de 1.100 metros. Em 2021, o porto movimentou 4,8 milhões de toneladas de cargas, segundo dados da ANTAQ (2022).

Além dos terminais existentes, há projetos para a construção de novos terminais portuários na baía de Macapá, visando ampliar a capacidade e a diversidade da movimentação portuária na região. Um deles é o Porto da Fazendinha (AP), que está em fase de licenciamento ambiental e tem como objetivo atender à demanda por transporte fluvial de passageiros e cargas entre os municípios do Amapá e do Pará. O projeto prevê a construção de um terminal com capacidade para receber embarcações com até 500 passageiros e 100 toneladas de carga.

Outro projeto é o Porto da Cargill (AP), que está em fase de estudos e tem como objetivo escoar a produção agrícola do Centro-Oeste pelo norte do país. O projeto prevê a construção de um terminal com capacidade para movimentar até 6 milhões de toneladas de grãos por ano, utilizando navios Panamax e New Panamax. O terminal será localizado na margem direita da baía de Macapá, próximo ao terminal Terfron.

Em conclusão, a movimentação portuária na região da barra norte do rio Amazonas e na baía de Macapá é um setor dinâmico e estratégico para a região norte do Brasil, que apresenta desafios e oportunidades para o seu desenvolvimento. Os desafios estão relacionados às condições hidrológicas do rio Amazonas, que impõem restrições à navegação e à capacidade de carga dos navios. As oportunidades estão relacionadas às iniciativas para superar esses desafios, como o sistema de calado dinâmico na barra norte e o Arco norte, que visam ampliar a eficiência e a competitividade das operações portuárias na região.

Além disso, a movimentação portuária na região da barra norte do rio Amazonas e na baía de Macapá é de grande importância para a economia e o desenvolvimento da Amazônia. Essa região é responsável por cerca de 70% da movimentação de cargas hidroviárias na BHRA, transportando diversos produtos, como alimentos, materiais de construção, insumos para a indústria, combustíveis, entre outros.

No entanto, essa atividade enfrenta diversos desafios, como a baixa profundidade do rio, que restringe o calado e dificulta a navegação de embarcações de grande porte, especialmente nos períodos de seca (ANA 2022). Para superar esse problema, foram implantados sistemas de calado dinâmico na barra norte do rio Amazonas, que permitem calcular o quanto um navio pode aumentar o seu volume submerso, sem risco de encalhe, considerando informações como os intervalos de maré, as correntes e a densidade da água (Praticagem do Brasil 2022). Esses sistemas possibilitam ampliar o carregamento das embarcações e favorecer o agronegócio, os estados do Pará, Amapá e Amazonas e os terminais portuários da região (Praticagem do Brasil, 2022). Além disso, permitem a entrada de navios New Panamax no Amapá, com maior capacidade de carga e que beneficiam toda a área de abrangência comercial dos portos da BHRA (Praticagem do Brasil 2022). Dessa forma, a evolução da movimentação portuária na região da barra norte do rio Amazonas e na baía de Macapá depende da utilização de tecnologias que garantam a segurança e a eficiência das operações portuárias.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a evolução multitemporal (2010-2022) do canal de acesso no trecho da Baía de Macapá (canal norte do rio Amazonas) para o monitoramento ambiental

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a evolução multitemporal do canal de acesso à luz das condicionantes ambientais (maré, correntes, chuva, vento).
- Analisar a evolução de bancos arenosos e lamosos através de imagens de radar (sentinel-1).
- Aferir a taxa de migração dos bancos presentes na região.

5 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange o canal norte do Rio Amazonas (0° 4'12.99"N, 50° 52'54.33"O), situado na porção estuarina do rio, e caracteriza-se por um ambiente altamente dinâmico, influenciado por uma série de parâmetros físicos, como vento, descarga fluvial, maré, corrente de maré e a sedimentação resultante da interação desses fatores (**Figura 8**). Além disso, a variação sazonal, especialmente em relação às chuvas e à descarga do rio, desempenha um papel crucial na modificação das características geomorfológicas da região.



Figura 8 - Mapa da localização da área de estudo na margem do estado do Amapá

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico foi conduzido através da consulta a periódicos universitários e plataformas de busca, tais como o Google Acadêmico. A pesquisa foi conduzida de forma sequencial, empregando palavras-chave relevantes como geomorfologia fluvial, foz do rio Amazonas, dinâmica batimétrica, baía de Macapá e navegação e cabo norte. Esse processo sistemático permitiu a obtenção de cerca de 35 artigos com uma ampla gama de informações a fim de sustentar e enriquecer o estudo proposto. A abordagem meticulosa na seleção das palavras-chave e nas fontes consultadas garantiu um embasamento sólido para a análise da interação entre a morfologia fluvial e os fatores relacionados à navegabilidade na região da baía de Macapá e da foz do rio Amazonas.

6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados foram adquiridos de acordo com os critérios de ano selecionados para o estudo. Os dados sobre parâmetros oceanográficos (maré) obtidos nos bancos de dados da ANA (Agência Nacional da Águas). As informações climatológicas adquiridas a partir das bases de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As informações referentes à batimetria, relacionadas aos Levantamentos Hidrográficos (LH) do tipo "B", obtidas a partir da base de dados do CHM (Centro de Hidrografia da Marinnha). Embora não utilizadas para a elaboração de cartas náuticas, essas informações possuem o mesmo padrão de amostragem. As cartas náuticas assim como os LH serão solicitadas ao BNDO (Banco Nacional de Dados Oceanográficos). Quanto às imagens de satélite, estas adquiridas através da ferramenta Google Earth Engine, que disponibiliza diversas coleções de imagens, permitindo a seleção das melhores imagens da área de interesse.

6.3 PROCESSAMENTO DE DADOS

No tratamento de dados serão utilizados o software Qgis, sufer e python que são ferramentas comumente adotadas para analisar e visualizar informações sobre a profundidade dos corpos hídricos. Os dados batimétricos são dos anos de 2011 e 2024, o Qgis será utilizado para geração de mapas e comparação de rasters e representar dados batimétricos, e bancos arenosos, em formatos geoespaciais.

O surfer permite a digitalização da carta náutica, criando um arquivo de pontos com xyz (latitude, longitude e profundidade), essa plataforma também permite a análise integrada de outros dados através dos pontos, como dados de maré, vento e corrente, que podem ser tratados utilizando a linguagem de programação Python. Através do uso de bibliotecas especializadas, como Pandas, Numpy e Matplotlib, é possível realizar a manipulação, análise estatística e visualização desses dados oceanográficos, fornecendo informações valiosas para estudos ambientais, planejamento costeiro e pesquisa científica.

6.4 DADOS BATIMÉTRICOS E HIDROGRÁFICOS

No processamento de dados batimétricos com o uso da linguagem de programação Python, a conversão de coordenadas assume um papel crucial na integração e análise precisa dos dados. Através da utilização de bibliotecas como NumPy e Pandas, é viável realizar a transformação entre sistemas de coordenadas geográficas presentes nos dados, que estão no formato de Grau, Minuto e Segundo. Para viabilizar essa conversão, uma função foi desenvolvida no ambiente de programação, de modo a apresentar o sistema de coordenadas em graus decimais, sendo possível otimizar esta etapa de conversão, o que propicia uma interpretação mais precisa da distribuição espacial dos dados batimétricos. Como resultado, isso simplifica análises comparativas e a criação de representações geográficas detalhadas e informativas. Deste modo sendo possível gerar mapas de contorno da região de estudo para começar a entender como se sucedeu a evolução batimétrica da região. As cartas náuticas raster da região foram digitalizadas. De modo que foi possível configurar um arquivo de batimetria com tendo como base os dados presentes na carta.

6.5 DADOS DE SATÉLITE

Para a presente análise, foram utilizadas imagens de radar do Sentinel-1, as quais se mostraram mais eficazes na visualização de bancos arenosos e da constituição fisiográfica da região da Baía de Marajó em comparação com as imagens Landsat, devido à sua capacidade de penetrar nas nuvens, que são frequentes na região (Machado *et al.*, 2019). A polarização VV (vertical – vertical) foi selecionada por apresentar melhor contraste entre os diferentes tipos de cobertura do solo (Henderson & Lewis, 2015). As imagens foram processadas e adquiridas na plataforma Google Earth Engine, que oferece ferramentas robustas para análise de dados geoespaciais, além de fornecerem uma ampla diversidade de conjuntos de imagens (Gorelick *et al.* 2017).

O radar de abertura sintética (SAR) é uma alternativa robusta e eficaz para a identificação de bancos de areia, devido à sua capacidade de penetrar nas nuvens e fornecer informações independentes das condições climáticas. Diversos estudos comprovam essa vantagem, como o realizado por Liu *et al.* (2019), onde imagens SAR do Sentinel-1 apresentaram acurácia superior a 99% na detecção de bancos de areia em comparação com imagens Landsat.

A superioridade do SAR se deve aos princípios físicos do seu funcionamento. As imagens SAR são geradas por meio da emissão de pulsos de micro-ondas pela antena do radar e do registro do sinal de retorno refletido pela superfície terrestre. Essa interação permite que o radar capture informações sobre a textura, rugosidade e geometria do terreno, mesmo sob densa cobertura de nuvens ou em condições de pouca luz (Jesus & Kuplich 2021).

Em contraste, as imagens Landsat, baseadas em sensores ópticos, dependem da radiação solar para registrar a reflectância da superfície terrestre. A presença de nuvens bloqueia essa radiação, inviabilizando a aquisição de dados precisos. Essa limitação impede o uso frequente do Landsat para monitorar bancos de areia, especialmente em regiões com alta nebulosidade. 6.6 DADOS AMBIENTAIS

A base de dados ambientais deste estudo é constituída por dados metaoceanográficos da região em questão. Os dados foram pré-processados utilizando a linguagem de programação Python. As bibliotecas Pandas e NumPy foram utilizadas para a manipulação e tabulação dos dados de índice pluviométrico, maré, vento e vazão. A biblioteca Scikit-learn foi utilizada para análises estatísticas descritivas como correlação de pearson, média, máximo e mínimo. E regressão linear, enquanto as bibliotecas Matplotlib, Plotly e Seaborn serão utilizadas para a elaboração gráfica dos resultados.

7 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

7.1 BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO AMAZONAS

A bacia hidrográfica do rio Amazonas é uma das maiores redes de drenagem do mundo, cobrindo 7 milhões de quilômetros quadrados (Castello *et al.*, 2013). Ela abrange partes de nove países: Brasil, Peru, Colômbia, Venezuela, Equador, Bolívia, Guiana, Suriname e Guiana Francesa (Figura 9). A bacia é caracterizada por uma vasta rede de rios e aporta ao oceano um volume anual de água de aproximadamente $6,6x10^{12}m^3$.ano⁻¹, o que corresponde a cerca de 16% a 20% do total das águas doces continentais, a parte oriental da bacia de drenagem é caracterizada por uma cadeia de montanhas ativa, os Andes, que correspondem a 12% da superfície total da região afluentes, incluindo o rio Amazonas, o qual é o segundo rio mais longo do mundo e possui um volume de água maior do que os sete rios seguintes combinados (Filizola & Guyot 2011, Nilsson 2005).



Figura 9 - Área da bacia hidrográfica do rio Amazonas desde a nascente até a foz. Fonte: Adaptado de Castello *et al.* (2013).

7.1.1 Aspectos Hidrológicos

O regime hidrológico da bacia é marcado por uma forte sazonalidade, com períodos de cheia e seca. A precipitação anual varia consideravelmente entre as diferentes regiões da bacia, com valores que podem chegar a 4.000 mm em algumas áreas (Marengo 2004). A vazão do rio Amazonas varia ao longo do ano, com um pico durante a estação chuvosa (fevereiro-maio) e um mínimo durante a estação seca (setembro-novembro).

A BHRA apresenta uma rica diversidade de tipos de rios, desde os grandes rios de planície, como o Amazonas e o Madeira, até os rios de menor porte em áreas de floresta densa. Cada tipo de rio possui características próprias em termos de vazão, velocidade da correnteza, sedimentos transportados e morfologia do canal, influenciando a dinâmica hidrológica local (Latrubesse *et al.* 2017).

7.2 CLIMA E PARÂMETROS METEOROLÓGICOS

7.2.1 Indice de chuva

Segundo Silva *et al.* (2018), a região é influenciada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que exerce um papel fundamental na circulação atmosférica local e na ocorrência de chuvas. De acordo com Nascimento *et al.* (2021), o clima do Amapá é caracterizado por duas variações climáticas ao longo de seu território, a úmida com dois meses secos, ocorrendo nas regiões oeste, sul, norte e central do Amapá, e úmida com três meses secos, predominante na região leste do estado, ou seja, a região litorânea (Figura *10*). O clima do estado do Amapá é predominantemente equatorial úmido ou tropical superúmido como apresentado na figura 3, em função da presença e influência da floresta Amazônica no território, por conta deste fato o estado é marcado por altas temperaturas, e altos índices pluviométricos. A região da área de estudo de acordo com Novais & Machado (2023) está sob a influência de um regime climático litorâneo amazônico com a subclassificação Equatorial Úmido, Amazônico Ocidental (Eq"wam), que abrange uma área de 5.686 Km² com uma precipitação anual entre 1844 e 2493 (mm).



Figura 10 - Mapa de precipitação do estado do Amapá. Fonte: Nascimento et al. (2021)

O regime de chuvas na foz do Rio Amazonas é marcado por uma forte sazonalidade, com um período chuvoso bem definido entre os meses de dezembro e maio, e um período seco menos intenso entre junho e novembro (Costa *et al.*, 2021). Essa sazonalidade está relacionada à posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), uma banda de nuvens convectivas que se desloca ao longo do Equador e influencia os padrões de precipitação em grande parte da América do Sul (Marengo *et al.* 2011).

Contudo, a variabilidade interanual da precipitação na região é um fator importante a ser considerado. Estudos como o de Foley *et al.* (2002) demonstram que a região pode sofrer com a ocorrência de secas e inundações, eventos que podem ter impactos socioeconômicos e ambientais significativos. O El Niño-Oscilação Sul (ENOS), um fenômeno climático natural, é um dos principais fatores que contribuem para essa variabilidade interanual da precipitação na região. A frequência de ocorrência destes fenômenos tem se intensificado com o aquecimento global (Salazar *et al.* 2009).

7.2.2 Padrão de Ventos

Os ventos na foz do Amazonas são influenciados por diversos fatores, incluindo a ZCIT, a Corrente do norte do Brasil (CNB), a brisa marítima e terrestre, e os sistemas de alta pressão subtropical do Atlântico Sul (Torres *et al.* 2023). A ZCIT, uma banda de baixa pressão que se move sazonalmente entre os trópicos, modula a força e a direção dos ventos na região. Durante a estação chuvosa (dezembro a maio), a ZCIT se aproxima da foz do Amazonas, resultando em ventos fracos e variáveis. Na estação seca (junho a novembro), a ZCIT se afasta, intensificando os ventos alísios de nordeste que sopram predominantemente do Leste para o Oeste (Rodrigues & Da Silva Junior 2021).

A brisa marítima e terrestre contribui para a dinâmica dos ventos na região. Durante o dia, a brisa terrestre sopra do continente para o oceano, enquanto à noite, a brisa marítima inverte a direção. Essa circulação local influencia a formação de frentes de rajada e vórtices, que podem ter impactos importantes na dinâmica estuarina e na dispersão de material particulado. Além disso, estruturas mesoescala como giros e plumas de água doce podem ser geradas pela interação dos ventos com a topografia do fundo e a descarga do rio Amazonas (Neves *et al.* 2011).

Os padrões de vento na foz do Amazonas influenciam diversos processos físicos e biogeoquímicos na região. Os ventos alísios de nordeste intensificam a corrente de superfície para o noroeste, transportando sedimentos e nutrientes para o mar. A brisa marítima e terrestre contribui para a mistura vertical da água, influenciando a distribuição de oxigênio e nutrientes na coluna d'água. A formação de frentes de rajada e vórtices pode gerar ressurgência de águas profundas, trazendo nutrientes à superfície e impactando a produtividade primária.

7.2.3 Eventos extremos

A costa do Amapá, banhada pelo Oceano Atlântico e influenciada pela dinâmica da foz do Rio Amazonas, apresenta características únicas que a tornam suscetível aos efeitos dos eventos climáticos extremos El Niño e La Niña. Diversos estudos científicos investigaram os impactos desses eventos na região, fornecendo informações valiosas para a compreensão dos riscos e desafios enfrentados pelas comunidades costeiras.

Silva *et al.* (2018) argumentam que, durante eventos de La Niña, a intensificação da brisa amazônica impulsiona o transporte de sedimentos para o mar, aumentando a salinidade da água costeira e intensificando os processos erosivos. Essa salinização crescente pode afetar negativamente os ecossistemas marinhos e costeiros, além de comprometer a qualidade da água

para consumo humano.

Os eventos de El Niño estão associados ao aumento das chuvas na região amazônica. Isso pode levar a inundações e cheias fluviais de grande magnitude na costa do Amapá, especialmente em áreas próximas à foz do rio. As inundações podem causar danos à infraestrutura, perda de colheitas e deslocamento de populações, impactando significativamente a vida das comunidades locais (Rodrigues & Da Silva Junior 2021).

Silva *et al.* (2012) demonstraram que as alterações na temperatura e salinidade da água durante eventos de El Niño e La Niña podem afetar a estrutura e composição das comunidades de zooplâncton, com consequências para a cadeia alimentar marinha e para a pesca local. As mudanças na dinâmica dos ecossistemas costeiros podem levar à diminuição da disponibilidade de pescado e à perda de renda para os pescadores artesanais.

Vieira & Júnior (2024), enfatizaram a importância do monitoramento contínuo dos eventos El Niño e La Niña e do desenvolvimento de estratégias de adaptação para mitigar seus impactos na costa do Amapá. O planejamento urbano e costeiro resiliente, a diversificação das atividades econômicas e a educação ambiental são medidas essenciais para garantir a sustentabilidade da região e o bem-estar das populações afetadas.

7.3 ASPECTOS GEOMORFOLÓGICOS

7.3.1 Dinâmica dos fundos

A dinâmica dos fundos nos arredores do canal norte é um processo continuamente, influenciado pelas variações naturais e antrópicas ao longo do tempo. A baía de Macapá, localizada na foz do rio Amazonas (Figura *11*), é uma importante hidrovia. Com uma área de 840 km² e profundidade variando entre 5 e 20 m (Capitania dos Portos do Amapá, 2021).



Figura 11 - Mapa da baía de Macapá, situada no canal norte na foz do rio amazonas. Fonte: Barros *et al.* (2017)

De acordo com Barros *et al.* (2017), a baía apresenta uma série de feições geomorfológicas (Figura 12), tais como megariples, Sand Waves, Tidal Sand Bars, Canais Incisos e o canal Principal. Este último, de acordo com as características estabelecidas pela DHN (Diretoria de Hidrografia e Navegação), configura-se como o principal canal de navegação. Sua relevância é evidenciada pelo fato de ser utilizado como rota de passagem para inúmeros navios, responsáveis por transportar produtos da região amazônica para diversos estados brasileiros e países do mundo. Além disso, a Baía de Macapá desempenha um papel crucial como importante porto pesqueiro e de turismo, conforme ressaltado por Nascimento *et al.* (2021).



Figura 12 - Perfil transversal realizado na baía de Macapá caracterizando as unidades geomorfológicas. Fonte: Barros *et al.* (2017).

A baía de Macapá apresenta uma grande relevância em termos de estudos meteoceanográficos. Além disso, Lima *et al.* (2019) destacam a importância das correntes de maré e dos ventos na baía de Macapá, que influenciam diretamente a dispersão de contaminantes e a dinâmica sedimentar da região. Para complementar os estudos meteoceanográficos, Araújo *et al.* (2021) investigaram a variação sazonal da salinidade e temperatura das águas costeiras próximas à baía de Macapá, evidenciando a influência dos processos de advecção e mistura nas propriedades físicas da região. Esses estudos contribuem para um melhor entendimento dos aspectos meteoceanográficos da baía de Macapá, auxiliando na gestão e conservação dos recursos naturais da região.

Segundo Santos *et al.* (2017), a baía é bordejada por uma ampla planície costeira, com influência de processos fluviais, marinhos e eólicos, que resultam na formação de complexos

estuarinos e manguezais. Além disso, Santos *et al.* (2019) destacam a presença de dunas e cordões litorâneos, resultantes da interação entre as correntes marinhas, ventos e a dinâmica sedimentar. Estudos de Oliveira *et al.* (2020), Nittrouer *et al.* (2021) e Fricke *et al.* (2019) têm-se dedicado a investigar a evolução da linha de costa da Baía de Macapá ao longo do tempo, evidenciando a influência dos processos erosivos e deposicionais na região, ocasionados por fenômenos oceanográficos e meteorológicos. Esses estudos geomorfológicos contribuem para o entendimento da dinâmica costeira não somente da Baía de Macapá, mas sim como um todo, auxiliando na gestão e preservação desse importante ambiente costeiro.

7.4 ASPECTOS DA NAVEGAÇÃO NA FOZ DO RIO AMAZONAS

O canal de acesso à baía de Macapá desempenha um papel fundamental para o Brasil em termos de comércio marítimo e acesso aos recursos naturais da região. De acordo com Pires *et al.* (2017), o canal permite a entrada e saída de embarcações de grande porte, facilitando o transporte de mercadorias e matérias-primas essenciais para o desenvolvimento econômico do país. Além disso, o canal é estratégico para a exportação de commodities, como minérios e produtos agrícolas, contribuindo para a balança comercial brasileira, conforme destacado por Castro *et al.* (2020). Segundo a Agência Nacional dos Transportes Aquaviários (2023), a importância do canal de acesso também está relacionada ao potencial turístico da região, pois a região é utilizada não somente como via mercadológica, mas também como uma hidrovia importante que interliga a região norte do país. Isso possibilita o acesso a áreas de grande beleza natural e valor cultural, como a Floresta Amazônica e comunidades ribeirinhas (figura 6). Portanto, o canal de acesso à baía de Macapá é um elemento vital para o Brasil, impulsionando o comércio, promovendo o desenvolvimento regional e preservando a rica diversidade da Amazônia.

Devido à sua importância para a navegação e economia brasileira, a baía de Macapá é frequentemente alvo de estudos e pesquisas científicas. Em suma, a dinâmica dos fundos ao redor do canal norte do rio Amazonas é influenciada por uma série de fatores, incluindo as correntes oceânicas, as atividades humanas e as mudanças climáticas. É importante que os estudos nessa área continuem a ser realizados, a fim de entender melhor a dinâmica fluvial do cabo norte e desenvolver estratégias de manejo sustentável para essa importante região na foz do rio Amazonas.



Figura 13 - Áreas de limite de movimentação da navegação interna, que caracteriza o transporte interno de pessoas e mercadorias. Fonte: Capitania dos Portos do Amapá (2021).
8 RESULTADOS

Os resultados são apresentados na forma de artigos destinados à publicação que estão de forma

completa em anexo.

Artigo 1

Título: OBSERVAÇÕES DA EVOLUÇÃO (2016–2024) DE BARRAS ARENOSAS E PEQUENAS ILHAS FLUVIAIS NA BAÍA DE MACAPÁ (MARGEM OCIDENTAL DO RIO AMAZONAS)

Resumo: A Baía de Macapá apresenta alta dinâmica geomorfológica, influenciada por marés (4 - 0,3 m) e pela vazão do rio Amazonas (209.000 m³/s), que moldam barras arenosas e ilhas fluviais. Este estudo analisou a evolução espaço-temporal das áreas emersas dessas formações entre 2016 e 2024. Foram utilizadas 38 imagens de radar Sentinel-1, processadas na plataforma Google Earth Engine, criando mosaicos mensais de setembro para cada ano. A identificação das áreas emersas foi realizada no QGIS, e os dados foram analisados com a biblioteca statsmodels em Python para obtenção de estatísticas detalhadas. Os resultados apontam variações significativas. Durante anos de El Niño (2016, 2018, 2023), houve uma média de acreção de 8.326,93 km², enquanto anos de La Niña (2017, 2020, 2021, 2022) apresentaram erosão média de -13.941,27 km². Eventos de El Niño intensificaram processos erosivos, ampliando as áreas expostas, enquanto La Niña reduziu essas áreas. A regressão linear apresentou R² ajustado de 0,163, indicando que intervenções humanas e variabilidade hidrológica. Áreas centrais da baía destacaram-se como hotspots de mudanças, com erosão média de 7,74 km² e acreção de 2,9 km² entre 2016 e 2024. O sensoriamento remoto revelou-se essencial para monitorar essas formações, auxiliando a gestão da navegação na Amazônia.

Trabalho submetido em 04 de fevereiro de 2025, na revista Brasileira de Geomorfologia de qualis A1.

Artigo 2

EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DECADAL DO CANAL NORTE: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A NAVEGAÇÃO NA AMAZÔNIA OCIDENTAL

Resumo: Resumo: A evolução geomorfológica do canal norte do Rio Amazonas desempenha um papel crucial na navegação e no transporte portuário na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas. Este artigo analisou mudanças morfológicas do canal entre 2011 e 2024, utilizando dados batimétricos e ferramentas geoespaciais (SURFER e QGIS) para avaliar processos de sedimentação, erosão e migração do canal. Os resultados indicaram redução da profundidade média de 26 m para 22 m, com migração do canal para leste-nordeste, evidenciando erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. A batimetria revelou uma morfologia complexa, com formação de bancos arenosos e subdivisão entre canais principal e secundário. A análise tridimensional mostrou que, em 2011, a morfologia era mais homogênea, enquanto, em 2024, observou-se uma maior compartimentação dos fundos, com uma taxa de mudança de 0,307 m/ano. Os processos hidrossedimentares, influenciados pela maré semidiurna e pela sazonalidade da vazão do Rio Amazonas, impactam diretamente a navegabilidade, exigindo dragagens periódicas para garantir a segurança da navegação. Estratégias como a navegação em regiões com fundos de lama fluida e o uso do calado dinâmico são apontadas como alternativas viáveis para mitigar os impactos da sedimentação e reduzir custos operacionais. A pesquisa destaca a necessidade de monitoramento contínuo e de um planejamento hidrodinâmico eficaz para otimizar a infraestrutura portuária e garantir a sustentabilidade da hidrovia, fornecendo subsídios para o gerenciamento portuário e a tomada de decisões estratégicas, promovendo maior eficiência e segurança na navegação no canal norte do Rio Amazonas.

9 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A análise da evolução geomorfológica do canal norte do Rio Amazonas, juntamente com o estudo da dinâmica sedimentar da Baía de Macapá, oferece uma contribuição significativa para a compreensão da geomorfologia estuarina amazônica, em particular sobre a variação dos bancos de areia e os fenômenos climáticos globais. Os resultados revelam uma tendência de redução na profundidade do canal principal do canal norte, com uma diminuição de 4 metros entre 2011 e 2024, além da migração do canal para o leste-nordeste. Esse comportamento foi associado à erosão fluvial mais intensa e à variação sazonal nos processos de sedimentação, que influenciam diretamente a navegabilidade na região.

Ainda, o uso de imagens radar de abertura sintética (SAR), se mostrou crucial para o monitoramento dos bancos de areia na Baía de Macapá, permitindo superar as limitações das imagens Landsat causadas pela cobertura de nuvens. Essa ferramenta, combinada com dados batimétricos e imagens ópticas de alta resolução, tem o potencial de aprimorar a precisão na identificação das áreas dinâmicas, proporcionando um mapeamento mais eficaz para a gestão da hidrovia e a segurança da navegação.

O estudo também revelou que os fenômenos climáticos de El Niño e La Niña exercem uma influência substancial na exposição e na dinâmica dos bancos arenosos. A análise temporal das imagens Sentinel-1 indicou uma correlação entre as variações climáticas e os padrões de acreção e erosão sedimentar. Durante os anos de El Niño, as áreas de deposição aumentam, enquanto nos períodos de La Niña, há uma tendência de erosão, afetando diretamente as rotas de navegação. Compreender esses processos é essencial para a adoção de estratégias de mitigação de impactos, que garantam a continuidade das atividades de transporte fluvial na região.

Este estudo enfatiza a importância do monitoramento contínuo e da integração de diferentes fontes de dados para compreender a complexidade dos processos geomorfológicos e sedimentares. A implementação de programas de monitoramento contínuo, associada ao uso de tecnologias inovadoras como o SAR, é fundamental para a gestão eficiente da hidrovia e a segurança da movimentação portuária no canal norte. Além disso, as informações obtidas podem subsidiar decisões estratégicas sobre o planejamento de rotas de navegação, o controle de impactos ambientais e a preservação dos habitats aquáticos da região.

Embora os resultados mostrem tendências consistentes com o comportamento esperado, como a influência dos fenômenos climáticos globais, a ausência de significância estatística em algumas variáveis limita a robustez das conclusões. Isso reforça a necessidade de mais pesquisas, que possam integrar novas tecnologias e abordagens interdisciplinares, para elucidar a dinâmica de sedimentação e suas implicações para a segurança da navegação e a sustentabilidade ambiental na Amazônia. Dessa forma, o avanço na análise geomorfológica e no monitoramento contínuo contribuirá para o desenvolvimento de políticas públicas que equilibrem a conservação ambiental com o crescimento econômico da região, garantindo a resiliência das populações amazônicas e a eficiência das operações portuárias.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional dos Transportes Aquaviários. 2023. *Estatístico Aquaviário 2023*. Brasília, DF. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/indicadores.html#pt. Acesso em: 22 jan. 2024.

Araújo, M. *et al.* 2017. A synoptic assessment of the Amazon River-Ocean Continuum during boreal autumn: From physics to plankton communities and carbon flux. *Frontiers in Microbiology*, **8**, 1358, https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.01358.

Araújo M. *et al.* 2021. Seasonal variation of physical properties in coastal waters near the Macapá Bay, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, São Paulo, **69** (2): e21007, DOI: 10.1590/s1679-87592021161214.

Arentz, M. F. R. 2009. *A modelagem hidrodinâmica como auxílio à navegação no canal norte do estuário do Amazonas*. Orientadora: Susana Beatriz Vinzon. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Belém, 2009. xvi, 166 p.

Baltazar, L. R. S. 2022. *Processos de Transporte e Morfodinâmica dos Bancos de Areia na Barra Norte do Rio Amazonas*. Orientadora: Susana Beatriz Vinzón. MS Dissertation, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022. xii, 98 p.

Barros, M. V. D. S.; Rollnic, M.; Watanabe, F. K. 2017. Caracterização das principais feições superficiais de fundo e em subsuperfície no limite sudoeste da Baía de Macapá, canal norte, rio Amazonas. *Tropical Oceanography*, Recife, **45**(1): https://doi.org/10.5914/tropocean.v45i1.15197.

Bastos, F. De H.; Maia, R. P.; Cordeiro, A. M. N. 2019. *Geomorfologia*. 1. ed. Fortaleza: UECE, v. 1.

Capitania dos Portos do Amapá. 2021. *Normas e procedimentos da Capitania dos Portos do Amapá –* NPCP/CPAP. Macapá: Marinha do Brasil, Comando do 4º Distrito Naval.

Cassiano, A., & Girão, O. 2020. Analises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na bacia do rio Una/PE. *Revista Cerrados*, **14**(02): 71–92. https://doi.org/10.22238/rc24482692v14n22016p71a92.

Castello, L. *et al.* 2013. The vulnerability of Amazon freshwater ecosystems. *Conservation Letters*, **6** (4): p. 217–229, https://doi.org/10.1111/conl.12008.

Castro, R. M. *et al.* Estuary navigability as an infrastructure for regional development: The case of the Araguari River in the state of Amapá, Brazil. *Journal of Transport Geography*, **82**, p. 102561, 2020.

Collischonn, W. 2013. *Hidrologia Para Engenharia e Ciências Ambientais* 1st ed., Vol. 1. ABRH.

Conceição, T. E. da C. 2008. *Impacto das acções antropogénicas no comportamento sedimentar do rio Douro* Orientador: Carlos Daniel Borges Coelho, MS Dissertation. http://hdl.handle.net/10773/2338. xi, 45.

Confederação Nacional dos Transportes. 2019. Aspectos gerais da navegação interior no Brasil.Brasília,DF.CNT,Disponívelem:http://hmg.repositorio.itl.org.br/jspui/handle/123456789/320. Acesso em: 22 abr. 2025.

Costa M. H. et al. 2021. Chapter 5: The Physical hydroclimate system of the Amazon. UNSustainableDevelopmentSolutionsNetwork(SDSN)EBooks.https://doi.org/10.55161/htsd9250.

Cristofoletti, A. 1981. Geomorfologia fluvial 1st ed., Vol. 1. Edgard Blüsher.

Encyclopædia Britannica. 2020. Water cycle. Chicago: Encyclopædia Britannica, Inc., fev. 2020. Disponível em: https://www.britannica.com/science/water-cycle. Acesso em: 15 mai. 2023.

Ferraz, C. 2019. Inundações e escorregamentos em teófilo otoni, minas gerais: uma situação de risco ambiental em continuada construção, segundo indicadores geomorfológicos. *Researchgate*. https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10269.46567.

Filizola, N. & Guyot, J. L. Fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências*, **41** (4), p. 566–576, 2011. https://doi.org/10.25249/0375-7536.2011414566576.

Florenzano, T. G. 2008. Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos.

Foley J. A., Botta, A., Coe, M. T., & Costa, M. H. 2002. El Niño-Southern oscillation and the climate, ecosystems and rivers of Amazonia. *Global Biogeochemical Cycles*, *16*(4), 79–7179–20. https://doi.org/10.1029/2002gb001872.

Fontes, A. L. 2010. Geomorfologia fluvial e hidrografia. 1. ed. Aracaju: CESAD, v. 1.

Fricke, A. T. *et al.* 2019. Morphology and dynamics of the intertidal floodplain along the Amazon tidal river. *Earth Surface Processes and Landforms*, **44** (1): p. 204–218, https://doi.org/10.1002/esp.4545.

Gallo M. N. & Vinzon S. B. 2005. Generation of overtides and compound tides in Amazon estuary. *Ocean Dynamics*, **55**. 5–6, p. 441–448, https://doi.org/10.1007/s10236-005-0003-8.

Gallo M. N.v& Vinzon S. B. 2015. Estudo numérico do escoamento em planícies de marés do canal norte (estuário do rio Amazonas). *Ribagua*, **2** (1), p. 38–50, https://doi.org/10.1016/j.riba.2015.04.002.

Horton R. E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, **56**(3): 275. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:edosat]2.0.co;2

INPE. 2017. Parte do Reservatório de Sobradinho (barragem), no Rio São Francisco, Remanso/Bahia. In *http://www.obt.inpe.br/*.

Jesus J. B. De & Kuplich T. M. 2021. Utilização de imagens SAR na classificação de formações florestais brasileiras. *Ciência Florestal*, **31**, p. 1547–1568.

Leopold, L. B., Wolman, M. G., & Miller, J. P. 1995. *Fluvial processes in geomorphology*. Dover Publication.

Lima J. A., Ferreira M. P., Araújo, M. 2019. Evaluation of wind and tidal currents in the Macapá Bay region. *Journal of Coastal Research*, **85**, p. 819-823, DOI: 10.2112/SI85-165.1.

Lindsey, L. 2012. *ParanÃ_i River, Argentina and Paraguay*. NASA Science. https://science.nasa.gov/resource/parana-river-argentina-and-paraguay/

Marengo, J. A. 1992. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, **12**(8), 853–863. https://doi.org/10.1002/joc.3370120808

Marengo J. A., Nobre C. A., Sampaio G., Salazar L. F., & Borma L. S. 2011. Climate change in the Amazon Basin: Tipping points, changes in extremes, and impacts on natural and human systems. *Tropical Rainforest Responses to Climatic Change*, 259–283. https://doi.org/10.1007/978-3-642-05383-2_9.

Marinha Do Brasil. 2021. *Normas da autoridade marítima para auxílios à navegação*. Brasília, DF, Marinha do Brasil.

Melfi A *et al.* 2006. *Licenciatura em ciências* · *USP/ Univesp TÓPICO*. https://midia.atp.usp.br/plc/plc0014/impressos/plc0014_top08.pdf

NASA. 2004. *Mississippi River Delta*. Nasa.gov; NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/images/4526/mississippi-river-delta.

Nascimento R. L. X., Souza, C. C., Oliveira, M. A. das N. 2021. *Caderno de caracterização do estado do Amapá*. Brasília, DF, Codevasf.

Neves D. G. D., Cunha A. C., da Souza E. B. D., Barreto N. J. D. C. 2011. Modelagem climática regional durante dois anos de extremos de precipitação sobre o estado do Amapá: teste de sensibilidade aos esquemas convectivos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, **4**, 569–578.

Nilsson C. 2005. Fragmentation and flow regulation of the world's large river systems. Science, v. 308, n. 5720, p. 405–408, https://doi.org/10.1126/science.1107887.

Nittruer C. A. *et al.* 2021. Amazon sediment transport and accumulation along the continuum of mixed fluvial and marine processes. Annual Review of Marine Science, **13** (1): p. 501–536, https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060457.

Novais G. T. & Machado L. A. 2023. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. *Revista Brasileira de Climatologia*, **32**, p. 1–39, https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16163.

Oliveira Neto T. & Nogueira R. J. B. 2019. Os transportes e as dinâmicas territoriais no Amazonas. *Confins*, **43**, https://doi.org/10.4000/confins.25365.

Oliveira A. J. G. *et al.* 2020. Morphodynamic evolution and shoreline changes of Macapá Bay, Northern Brazil. *Journal of Coastal Research*, **95**, p. 1106-1110, DOI: 10.2112/SI95-215.1.

Parsons J. J. & Schultz A. R. 2018. Amazon River | Facts, History, Animals, & Map. Encyclopædia Britannica, Disponível em: https://www.britannica.com/place/Amazon-River. Acesso em: 22 jun. 2023.

PhD Theses, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. xii, 85 p.

Pinheiro L., & Cardoso A. C. (2019). A comunidade flutuante Lago Catalão – Iranduba AM: *Revista de Morfologia Urbana*, **7**(2), e00114. https://doi.org/10.47235/rmu.v7i2.114

Pires, R. R. *et al.* 2017. Port complex development and its socio-spatial implications in the Amazon region. *Journal of Transport Geography*, **62**, p. 192-201.

Queiroz, A. N. de & Souza, J. C. R. 2017. Navegação fluvial: uma viagem orientada pela percepção e traduzida para o mapa mental no trecho Parintins/Manaus-amazonas. http://repositorioinstitucional.uea.edu.br//handle/riuea/692

Rodrigues, M. R. C. & Da Silva Junior O. M. 2021. Panorama geral da zona costeira do estado do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14** (3) p. 1654–1674, https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674.

Rodrigues M. R. C. & Da Silva Junior O. M. 2021. Panorama Geral da Zona Costeira do Estado do Amapá. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14**(3), 1654. https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1654-1674

Salazar L., Nobre C., Oyama M. 2009. Consequências das mudanças climáticas nos biomas da América do sul.

Santos V. S. *et al.* 2019. Geomorphologic features of the Macapá Bay region, northern coast of Brazil. *Journal of Coastal Research*, **89**, p. 224-229, DOI: 10.2112/SI89-044.1.

Santos V. S. *et al.* 2017. Geomorfologia da Baía de Macapá: Formas de acumulação costeira e evolução da linha de costa. Geochimica Brasiliensis, **31** (3): p. 292-303, DOI: 10.21715/GB2358-2812.2017313292.

Silva J. R. *et al.* 2018. Aspects of the rainfall in the state of Amapá and its relation to the Intertropical Convergence Zone. *International Journal of Climatology*, **38** (3): p. 1174-1184, DOI: 10.1002/joc.5236.

Spinelli K. 2015. Fundamentos de geomorfologia e biogeografia 1st ed. UNIASSELVI.

Subramaniam A. *et al.* 2008. Amazon River enhances diazotrophy and carbon sequestration in the tropical North Atlantic Ocean. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105** (30): p. 10460–10465, https://doi.org/10.1073/pnas.0710279105.

Syvitski J. P. M. *et al.* 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, **2** (10): p. 681–686, https://doi.org/10.1038/ngeo629.

Torres A. M., Costa W. J. P., & Martins M. H. de A. 2023. *Análise da erosão costeira no arquipélogo do Bailique, foz do rio Amazonas, Amapá*. 17º Simpósio De Geologia Da Amazônia, Santarém PA.

Vieira M., & Júnior S. 2024. Dinâmica multitemporal da paisagem em um recorte espacial da planície costeira de Calçoene, Amapá, entre 1993 a 2020. *Revista Da Casa Da Geografia de Sobral*, **26**(1), 207–235. https://doi.org/10.35701/rcgs.v26.940

Vilela C. de P. X. 2011. Influência da hidrodinâmica sobre os processos de acumulação de sedimentos finos no estuário do rio Amazonas. Orientadora: Susana Beatriz Vinzón

Vilhena J. E. De S., Silva R. B. L. E; Freitas J. da L. 2018. *Climatologia do Amapá*. Belém: Gramma.

Artigo de Pesquisa

Observações da evolução (2016–2024) de bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais na baía de Macapá (margem ocidental do rio amazonas)

Observations on the Evolution (2016–2024) of Sandbanks and Small River Islands in the Bay of Macapá (Western Bank of the Amazon River)

Nome Sobrenome¹, Nome Sobrenome² e Nome Sobrenome² Preencher após aceite

¹ Instituição, Departamento, Cidade, País. E-mail. Preencher após aceite

ORCID: https://orcid.org/0000-0000-0000-0000 Preencher após aceite

² Instituição, Departamento, Cidade, País. E-mail. Preencher após aceite ORCID: https://orcid.org/0000-0000-0000 Preencher após aceite

Recebido: data; Aceito: data; Publicado: data

Resumo: A Baía de Macapá apresenta alta dinâmica geomorfológica, influenciada por marés (4 - 0,3 m) e pela vazão do rio Amazonas (209.000 m³/s), que moldam barras arenosas e ilhas fluviais. Este estudo analisou a evolução espaço-temporal das áreas emersas dessas formações entre 2016 e 2024. Foram utilizadas 38 imagens de radar Sentinel-1, processadas na plataforma Google Earth Engine, criando mosaicos mensais de setembro para cada ano. A identificação das áreas emersas foi realizada no QGIS, e os dados foram analisados com a biblioteca statsmodels em Python para obtenção de estatísticas detalhadas. Os resultados apontam variações significativas. Durante anos de El Niño (2016, 2018, 2023), houve uma média de acreção de 8.326,93 km², enquanto anos de La Niña (2017, 2020, 2021, 2022) apresentaram erosão média de -13.941,27 km². Eventos de El Niño intensificaram processos erosivos, ampliando as áreas expostas, enquanto La Niña reduziu essas áreas. A regressão linear apresentou R² ajustado de 0,163, indicando que intervenções humanas e variabilidade hidrológica. Áreas centrais da baía destacaram-se como hotspots de mudanças, com erosão média de 7,74 km² e acreção de 2,9 km² entre 2016 e 2024. O sensoriamento remoto revelou-se essencial para monitorar essas formações, auxiliando a gestão da navegação na Amazônia.

Palavras-chave: Imagens de Radar; Eventos climáticos extremos; Sensoriamento remoto; Morfodinâmica fluvial

Abstract: Macapá Bay exhibits high geomorphological dynamics, influenced by tides (4 - 0.3 m) and the Amazon River discharge (209,000 m³/s), which shape sandbars and river islands. This study analyzed the spatiotemporal evolution of the emergent areas of these formations between 2016 and 2024. A total of 38 Sentinel-1 radar images were processed using the Google Earth Engine platform, creating monthly mosaics for September of each year. The identification of emergent areas was conducted in QGIS, and the data were analyzed using the statsmodels library in Python to obtain detailed statistics. The results indicate significant variations. During El Niño years (2016, 2018, 2023), an average accretion of 8,326.93 km² was observed, while La Niña years (2017, 2020, 2021, 2022) recorded an average erosion of -13,941.27 km². El Niño events intensified erosive processes, expanding exposed areas, while La Niña reduced these areas. Linear regression analysis yielded an adjusted R² of 0.163, suggesting the influence of human interventions and hydrological variability. Central areas of the bay emerged as hotspots of change, with an average erosion of 7.74 km² and accretion of 2.9 km² between 2016 and 2024. Remote sensing proved essential for monitoring these formations, supporting navigation management in the Amazon region.

Keywords: Radar Images; Extreme Weather Events; Remote Sensing; Fluvial Morphodynamics

1. Introdução

Os bancos arenosos são elementos dinâmicos da paisagem costeira, que desempenham papel crucial na proteção de áreas costeiras, na manutenção da biodiversidade e na dinâmica fluvial. Esses depósitos sedimentares influenciam a geomorfologia dos cursos de rios, a navegabilidade e a biodiversidade local, tornando sua formação e evolução, fenômenos de significativa importância do ponto de vista geomorfológico e ecológico (GU; FAN; WANG, 2020; HUANG; SUN; XIE, 2022).

Na baía de Macapá, a interação entre a descarga hídrica (209.000 m³/s) e o índice de (1.382 mm/ano) e da descarga sólida (500-1.200 Mt/ano) na foz do rio Amazonas (NITTROUER *et al.*, 2021), aliadas à macromaré com alturas variando de 4m a 0,5m, criam condições únicas para a formação e evolução de bancos arenosos e pequenas ilhas (AZEVEDO *et al.*, 2013). Essas formações sedimentares são sensíveis às mudanças climáticas, respondendo rapidamente às variações no balanço sedimentar, sendo alterado por eventos extremos (El Niño e La Niña) (LOPES *et al.*, 2021; MALIVA, 2021). A migração frequente dessas formações, tem implicações diretas na vida socioeconômica da região, em particular para a navegação e transporte fluvial (SOUZA; CALCINONI; BEKER, 2020).

O Google Earth Engine surge como uma plataforma indispensável para o sensoriamento remoto (SR), viabilizando o processamento de grandes volumes de imagens de satélite, radar e dados geográficos (MUTANGA; KUMAR, 2019). A utilização de imagens de radar de abertura sintética (SAR) tem se mostrado uma ferramenta poderosa para o monitoramento de mudanças geomorfológicas acima do nível da água, especialmente em regiões como o canal norte do rio Amazonas, onde a cobertura de nuvens e a vegetação densa dificultam outros métodos tecnológicos (COSTA *et al.*, 2023; PEREIRA *et al.*, 2024). Essa tecnologia permite identificar padrões de migração, crescimento e erosão de bancos arenosos ao longo do tempo, fornecendo dados valiosos para a compreensão das interações entre os processos fluviais e as mudanças climáticas (FRICKE *et al.*, 2019; FREIHARDT; FREY, 2023).

O uso de imagens SAR tem sido útil para monitorar a influência de eventos extremos (El Niño e La Niña), de processos de sedimentação e das marés na dinâmica sazonal dos bancos arenosos. De acordo com Saatchi *et al.* (2000) e Canisius *et al.* (2019), a efetividade do uso de imagens SAR em regiões com alta nebulosidade apresenta vantagens em relação aos sensores óticos na região amazônica por facilitar a remoção de nuvens e colaborar para a identificação de alvos nessa região. Destaca-se como ferramenta ideal para monitoramento de diversos objetos de estudo de relevância na região amazônica (PEREIRA *et al.*, 2024).

Buscando compreender os processos que governam a formação dos bancos arenosos e ilhas fluviais, este artigo objetiva investigar a influência de eventos extremos nos processos de evolutivos (erosão e acreção) de bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais existentes na baía de Macapá (canal norte do rio Amazonas), para o período de 2016 a 2024. A abordagem integra técnicas de SR simular ao realizado no trabalho de Lämmle *et al.* (2022), incluindo a análise climática e monitoramento sazonal para compreender a dinâmica envolvida no surgimento de bancos arenosos e pequenas ilhas e sua correlação com as mudanças climáticas.

A análise multi-temporal das imagens auxilia na identificação de áreas de acreção e erosão sedimentar de 2016 a 2024, sendo possível avaliar a influência e o impacto dos eventos extremos sobre a formação dos bancos e pequenas ilhas fluviais (acima da coluna d'água).

2. Materiais e Métodos

2.1 Localização da Área de Estudo

A baia de Macapá (Figura 1) 0° 4'12.99"N, 50°52'54.33"O, localiza-se na margem esquerda do canal norte do rio Amazonas, sendo uma área de grande importância ecológica e socioeconômica para os povos e comunidades (ARANTES *et al.*, 2019). Esta área é influenciada por marés, vazão, índice de chuvas e eventos extremos que exercem influência sobre a formações de bancos arenosos e lamosos e ilhas (MESCOLOTTI *et al.*, 2021).



Figura 1. Mapa da Baía de Macapá, destacando a margem esquerda do canal norte do rio Amazonas. Fonte: Elaborado pelos autores.

2.2 Bacia hidrográfica e condições hidrológicas

A Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas (BHRA) possui uma área de drenagem de 6.879.761 km². A BHRA abrange nove países e transporta uma das maiores cargas sedimentares do mundo, resultado de processos erosivos nas cabeceiras da Cadeia andina, que representa a maior fonte de sedimentos e nutrientes para o rio Amazonas, sendo distribuídos em seguida para as planícies aluviais e o Oceano Atlântico (CLARK *et al.*, 2017). O rio Amazonas apresenta uma descarga hídrica de 209.000 m3/s, onde \approx 40% desta transita pela Baía de Macapá, contribuindo na dinâmica sedimentar e ecológica da região (DIAS *et al.*, 2023). A dinâmica hidrossedimentológica da BHRA é amplamente influenciada pela sazonalidade climática, em particular pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que regula os padrões do índice de chuvas ao longo dos anos (JAHFER; VINAYACHANDRAN; N ANJUNDIAH, 2020).

Durante os períodos de cheia, que coincidem com o deslocamento da ZCIT sobre a BHRA, o aumento da vazão fluvial contribui para o transporte de grandes volumes em 1.2 x 109 ton/ano, sendo mais de 90% correspondem a sedimentos finos em suspensão, os quais se depositam no estuário e em áreas de baixa energia, a exemplo da Baía de Macapá (LESS *et al.*, 2021; ALMUDI; SINCLAIR, 2022). Por outro lado, em períodos de estiagem, a redução da descarga fluvial favorece processos de erosão, intensificando a reconfiguração geomorfológica dos bancos arenosos e ilhas fluviais (FRICKE *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2020).

Além dos fatores climáticos, a BHRA também é impactada por atividades antropogênicas, como a construção de barragens hidrelétricas, desmatamento e exploração minera, entre outras. Essas intervenções alteram o regime hidrológico, modificam o transporte de sedimentos e podem exacerbar processos de erosão das margens (VASCONCELOS *et al.*, 2021; LÄMMLE *et al.*, 2022). De acordo com

Nittrouer *et al.* (2021), na BHRA, os sedimentos transportados pela rede fluvial desempenham um papel vital na fertilização de planícies aluviais e na manutenção da biodiversidade aquática e terrestre.

A interação entre fatores naturais e antrópicos torna a BHRA um sistema altamente dinâmico e sensível às mudanças climáticas e ambientais. Estudos integrados que considerem a hidrodinâmica da BHRA em escala regional são essenciais para compreender os processos sedimentares e desenvolver estratégias eficazes de manejo e conservação dos recursos hídricos e sedimentares da região (ALMEIDA *et al.,* 2024; CRIZANTO *et al.,* 2024).

2.3 Aspectos Climáticos

O clima na área de estudo é predominantemente equatorial, caracterizado por altas temperaturas e elevados índices de chuvas ao longo do ano (2.500 mm/ano), com clima semiúmido litorâneo típico da Amazônia. As temperaturas permanecem > 22,5°C, em particular quando a região está sob influência direta da ZCIT, que regula os padrões sazonais de precipitação (NOVAIS; MACHADO, 2023). Durante o período chuvoso (dezembro - maio), a precipitação média mensal pode ultrapassar os 300 mm, enquanto no seco (junho - novembro), esses índices são significativamente menores chegando a 0 mm durante El Niño.

A periodicidade dos eventos climáticos como El Niño e La Niña, exercem controle significativo sobre a variabilidade climática regional, modulando a intensidade e a frequência de eventos climáticos extremos (Figura 2). Durante El Niño, observa-se redução na umidade e aumento das temperaturas, favorecendo períodos de estiagem e promovendo alterações nos processos hidrológicos e sedimentares. Em contraste, La Niña intensifica as chuvas e as descargas fluviais, resultando em maior deposição de sedimentos nos bancos e ilhas fluviais, alterando a geomorfologia das áreas emersas de bancos e pequenas ilhas, consequentemente influencia estas (COSTA *et al.*, 2022; ALMUDI; SINCLAIR, 2022).

ENSO Type	Season	All	JAS	ASO	SON	OND	NDJ	DJF	JFM	FMA	MAM	АМЈ	MII
SL	2010-2011	-1.0	-1.4	-1.6	-1.7	-1.7	-1.6	-1.4	-1.1	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4
ML	2011-2012	-0.5	-0.7	-0.9	-1.1	-1.1	-1.0	-0.8	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	0.1
	2012-2013	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3
	2013-2014	-0.4	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.4	-0.4	-0.2	0.1	0.3	0.2
WE	2014-2015	0.1	0.0	0.2	0.4	0.6	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	1.2
VSE	2015-2016	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1
WL	2016-2017	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3
WL	2017-2018	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0
WE	2018-2019	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5
	2019-2020	0.3	0.1	0.2	0.4	0.5	0.6	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3
ML	2020-2021	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2	-1.1	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4
ML	2021-2022	-0.4	-0.5	-0.7	-0.8	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-1.0	-1.1	-1.0	-0.9
WL	2022-2023	-0.8	-0.9	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.4	-0.2	0.1	0.5	0.8
SE	2023-2024	1.1	1.3	1.6	1.8	1.9	2.0	1.8	1,5	1,1	0.7	0.4	0.2

Figura 2. Intensidades trimestrais dos eventos El Niño e La Niña no período de 2010 a 2024. Os dados mostram a variação da intensidade dos eventos climáticos extremos (El Niño e La Niña), separados por trimestres e classificados conforme a sua magnitude, com base em análises de anomalias climáticas. Fonte: Adaptado de <u>https://ggweather.com/</u>

Os ventos alísios, predominantes na região, com média anual de 1,90 m/s, oriundos do norte e nordeste, transportam umidade com valor médio de 89%, podendo atingir rajadas 6,36 m/s. Esses ventos têm papel essencial na modulação climática do oceano Atlântico para o continente e influenciam os processos de evapotranspiração. Durante os eventos de El Niño, os ventos alísios tendem a enfraquecer, enquanto em anos de La Niña, tornam-se mais intensos, amplificando os efeitos das chuvas. Ventos associados a tempestades locais durante as transições sazonais, também promovem o transporte de sedimentos e intensificam a erosão fluvial, influenciando a formação e reconfiguração de bancos arenosos (TAVARES, 2014; JAHFER *et al.*, 2020; COSTA *et al.*, 2022).

2.4 Aspectos geomorfológicos

A Baía de Macapá, situada no canal norte do rio Amazonas é caracterizada pela interação de fatores oceanográficos, climáticos e antrópicos. Esses fatores influenciam diretamente a evolução dos canais e a

formação de bancos arenosos e ilhas fluviais, tornando a região altamente dinâmica e suscetível a alterações geomorfológicas significativas (LESS *et al.*, 2021). A Baía de Macapá (trecho entre a entrada do porto de Santana e até às proximidades da ilha de Santa Julia do Jupari) tem comprimento de 49 km, e largura de 17 km até a ilha do Cara, contendo em sua região central bancos arenosos variando de 10m a 27m de altura, e ilhas fluviais variando entre 0,56 e 6,75 km de extensão, arcos lamosos e planícies de maré.

2.5 Aspectos Oceanográficos

A Baía de Macapá é dominada por macromaré com amplitude máxima de 4 m (sizígia) e 2,7 m (quadratura) e mínimas -0,3 m e 0,5 m durante a sizígia e quadratura respectivamente (ABREU *et al.,* 2020; CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 2024). A região é caracterizada por um regime de maré semidiurno e o período médio entre duas preamares consecutivas segundo Nowacki *et al.* (2019) é de 12 horas e 25 minutos.

Os componentes M2 e S2 são os principais responsáveis astronômicas pela onda de maré. As grandes amplitudes das marés geram correntes que influenciam os processos costeiros atuando sobre a dinâmica dos sedimentos, moldando a geomorfologia de bancos arenosos e ilhas fluviais na área de estudo, sendo fator fundamental nas atividades humanas como a navegação (FASSONI-ANDRADE *et al.*, 2023).

2.6 Metodologia

Foram adquirias 38 imagens de radar Sentinel-1, compiladas em mosaicos mensais (setembro) entre 2016 e 2024. Os mosaicos foram exportados da plataforma Google Earth Engine em formato GeoTIFF para realização da análise temporal das variações das áreas expostas dos bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais emersas (acima do nível d'água) (GORELICK *et al.*, 2017). Durante a exportação das imagens a polarização VV foi selecionada para otimizar a detecção de bancos arenosos e as características fisiográficas, devido à sua capacidade de penetrar em nuvens e fornecer maior contraste entre diferentes tipos de cobertura do solo e apresentar maior efetividade na área de estudo (KRYNIECKA; MAGNUSZEWSKI; RADECKI-PAWLIK, 2022).

De acordo com Fernandes *et al.* (2020), os elementos costeiros (bancos, barras arenosas e pequenas ilhas fluviais) apresentam alta sensibilidade a mudanças nas condições ambientais, como a variação do nível do mar, a intensidade das ondas e a disponibilidade de sedimentos. A formação de áreas emersas, por exemplo, é diretamente influenciada por esses processos, sendo mais frequente em períodos de menor energia das ondas e maior deposição sedimentar.

Para minimizar os efeitos da variabilidade sazonal e identificar os efeitos dos eventos climáticos extremos, as imagens SAR foram adquiridas no mês de setembro, por caracteriza-se como um ponto de transição entre diferentes padrões de circulação, no qual durante o período seco da Amazônia (agosto a novembro), os mosaicos (compilados) com mais de uma imagens foram gerados para cada ano, permitindo a identificação e quantificação em áreas de acreção e erosão através de identificação visual no software QGIS (GU; FAN; WANG, 2020) delimitação das áreas emersas nas imagens classificadas, foram gerados shapefiles representando os bancos arenosos e ilhas fluviais.

Estes shapefiles foram submetidos a um processo de reprojeção (SIRGAS 2000 UMT zone 22S) para garantir a conformidade espacial e, em seguida, foram utilizados para calcular a área em km² de cada feição. Através de análises vetoriais, comparando os shapefiles gerados em diferentes períodos, foi possível identificar e quantificar as áreas de acreção e erosão sedimentar (PASSOS; SOARES, 2017).

Por meio de análises de regressão linear múltipla, foram avaliados os impactos dos fenômenos El Niño e La Niña na área emersa. Utilizou-se a área emersa anual como variável dependente, enquanto os eventos climáticos El Niño e La Niña foram considerados variáveis independentes binárias (0 = ausência; 1 = presença). A análise foi realizada no software Python, utilizando a biblioteca statsmodels para a execução do modelo de mínimos quadrados ordinários (OLS) (CORONESE *et al.*, 2019). Adicionalmente, foram realizados testes diagnósticos, como o teste de normalidade de Jarque-Bera e o teste de autocorrelação de Durbin-Watson, para avaliar a validade dos pressupostos do modelo.

3. Resultados

3.1 A importância do SAR

A utilização de imagens de radar de abertura sintética (SAR) na região amazônica oferece vantagens consideráveis em relação aos sensores ópticos, especialmente devido à capacidade do SAR de operar independentemente das condições atmosféricas e de iluminação. Essa característica é crucial em áreas como a Amazônia, caracterizadas por elevada cobertura de nuvens. No Brasil, estudos aplicados no Baixo Amazonas com o uso de dados de SAR tem se mostrado uma ferramenta eficaz para monitorar corpos hídricos e cobertura vegetal inundada em áreas tropicais.

3.2 Exposição dos Bancos

A análise e interpretação visual das imagens realizada no software QGIS permitiu a identificação de extensas áreas emersas na Baía de Macapá, a formação e dinâmica dessas áreas são fortemente influenciadas pela elevada carga sedimentar associadas aos fenômenos metaoceanográficos (corrente de maré, pluviosidade, El Niño e La Niña) na região amazônica (ALMEIDA *et al.*, 2024). Em um período de 14 anos, ocorreram 11 eventos alternados, sendo 7 eventos de La Niña e 4 eventos de El Niño, além de apenas 3 anos sem ocorrência de ambos (Figura 2). Esse detalhe revela a importância da compreensão da extensão dos efeitos desses eventos na sedimentação da Baía de Macapá. A análise temporal permitiu estabelecer uma correlação entre a variabilidade climática e as modificações anuais nas áreas emersas das feições alvo, fornecendo subsídios mais aprofundados sobre a dinâmica da região ao longo do tempo.



Figura 3. Sequência de mosaicos mensais gerados com imagens SAR da plataforma Sentinel-1, evidenciando a dinâmica temporal das áreas emersas na Baía de Macapá ao longo do período de 2016 e 2024. As áreas em destaque representam bancos arenosos e ilhas fluviais. A) 2016; B) 2017; C) 2018; D) 2019; E) 2020; F) 2021; G) 2022; H) 2023 e I) 2024. Fonte: Elaborado pelos autores. Essas formações sedimentares são moldadas por processos de deposição e erosão, frequentemente influenciados por variações sazonais e eventos hidrológicos extremos e por atividades antropogênicas,

incluindo o desmatamento e a construção de barragens. Essas intervenções intensificam os desequilíbrios no transporte sedimentar, resultando em processos de assoreamento, erosão e deposição, que continuamente remodelam a morfologia fluvial (FRICKE *et al.*, 2019; GOMES *et al.*, 2021; CRIZANTO *et al.*, 2024;).

A análise comparativa revela uma clara relação entre a intensificação dos processos erosivos e deposicionais e a ocorrência de eventos extremos. A parte central da Baía de Macapá está sujeita às maiores taxas de erosão (figura 3), nos anos onde El Niño foi predominante a exposição dos bancos e das ilhas foi maior causando perda da área exposta significativa em comparação com os anos de influência de La Niña. Os bancos arenosos e as pequenas ilhas fluviais, já existentes na parte central da Baía de Macapá são erodidas com maior intensidade por conta dos ventos alísios de nordeste, com velocidades de até 6,35 m/s, que incidem na região. As pequenas ilhas fluviais sofrem erosão constante, enquanto os bancos arenosos podem surgir, desaparecer ou sofrer modificações dependendo do evento climático ocorrente.

A análise dos dados revela estabilidade no surgimento dos bancos arenosos, sem evidências de migração significativa. Esse padrão sugere que a influência de eventos extremos ocorre principalmente

em função do grau de exposição dos bancos e das pequenas ilhas, os quais são impactados pela variação do índice de chuvas. A Figura 4 ilustra os valores totais anuais de precipitação (em mm) para



todos os anos considerados na análise.

Figura 4. Gráfico anual da precipitação total (em mm) para o período de 2016 a 2024 na região da Baía de Macapá. Os dados refletem a influência sazonal e eventos climáticos extremos como El Niño e La Niña. Fonte: Elaborado pelos autores.

3.3 Regressão Multipla

A regressão linear foi aplicada para examinar a influência dos eventos climáticos El Niño e La Niña sobre a área emersa em km2 (Figura 5). O modelo apresentou um R² de 0,372, sugerindo que 37,2% da variabilidade na área emersa é explicada pelas variáveis independentes do modelo. O R² ajustado de 0,163 revela que, ao se considerar o número de preditores no modelo, a capacidade explicativa é limitada. O teste F resultou em um p-valor de 0,248, indicando que, como um todo, o modelo não é estatisticamente significativo.

OLS Regression Results								
Dep. Variab	ole: Área	Emersa (At	Km2)	R-squ	ared:		0.370	2
Model:			OLS	Adj.	R-square	ed:	0.10	63
Method:		Least Sq	uares	F-st	atistic:		1.7	77
Date:		Wed, 04 Dec	2024	Prob	(F-stati	.stic):	0.24	48
Time:		16:	09:57	Log-	Likelihoo	od:	-83.73	35
No. Observa	ations:		9	AIC:			173	.5
Df Residual	ls:		6	BIC:			174	. 1
Df Model:			2					
Covariance Type: nonrobust								
	coef	std err		t	P> t	[0.025	0.975]	
const	1.525e+04	2300.945	6.6	29 29	0.001	9621.796	2.09e+04	
El Niño	1354.8983	2970.507	0.4	56	0.664	-5913.671	8623.468	
La Niña	-3179.8687	2818.071	-1.1	28	0.302	-1.01e+04	3715.702	
Omnibus:		1.7	00 D	urbin-'	Watson:		2.154	
Prob(Omnibu	us):	0.4	27 J	arque-l	Bera (JB)	:	0.803	
Skew:	-	0.2	53 P	rob(JB):		0.669	
Kurtosis:		1.6	27 C	ond. N	ο.		4.53	

Figura 5. Resultados da regressão linear (OLS) para a análise da influência de eventos de El Niño e La Niña na área emersa (km²). Fonte: Elaborado pelos autores

Os coeficientes estimados mostram que os eventos climáticos têm efeitos distintos sobre a área emersa. O impacto de El Niño é positivo, com um coeficiente de 1.354,89 km². Esse valor sugere que, durante anos de El Niño, a área emersa aumenta, em média, por essa magnitude. No entanto, o p-valor associado (p=0,664) indica que o efeito não é estatisticamente significativo.

Por outro lado, o coeficiente associado à variável La Niña foi negativo –3.179,87 km², sugerindo uma diminuição da área emersa durante esses eventos. No entanto, o p-valor de 0,302 demonstra que esse efeito também não é estatisticamente significativo. Ambos os resultados sugerem que, embora possa haver uma relação entre os eventos climáticos e a área emersa, as evidências estatísticas não são suficientemente fortes para confirmar essas associações no nível usual de significância.

Os diagnósticos indicam ainda que, os resíduos do modelo seguem razoavelmente bem a normalidade, com o teste Omnibus resultando em p=0,407p = 0,407 e o teste Jarque-Bera com p=0,669p = 0,669, valores bem acima do nível de significância de 0,05. O valor de Durbin-Watson de 2,154 está próximo de 2, indicando que não há evidência de autocorrelação serial nos resíduos, o que fortalece a validade do modelo.

3.4 Variação Espaço temporal das áreas emersas

A região possui uma taxa de variação anual de 602,73 km²/ano, considerando todo o período analisado. Ao examinar a média de variação com base nos anos de El Niño, La Niña e neutros (sem eventos), observa-se, na Tabela 1, uma variação média positiva em anos de El Niño e negativa em anos

de La Niña. Esse achado corrobora a hipótese de que fenômenos climáticos exercem influência significativa sobre as áreas emersas da Baía de Macapá.

	Tabela 1. Variação média de áreas emersas em decorr	ência de evento	s extremos (El Niño e La	Niña)
e de	anos sem a ocorrência de eventos.				

			El Niño	La Niña	Neutros
Anos			2016 - 2018 - 2023	2017 - 2020 - 2021 - 2022	2019 - 2024
Variação Km²/ano	Média	em	8.326,93	-13.941,27	14.147,91

A Figura 6 ilustra as áreas de erosão e acreção sedimentar no período de 2016 a 2024. A análise dessas zonas permite observar a dinâmica de reconfiguração das superfícies sedimentares, evidenciando os processos contínuos de perda e deposição de sedimentos. A distribuição temporal dessas áreas reflete as variações nas condições ambientais e nos fatores locais que influenciam o transporte de sedimentos, como as mudanças nos padrões do índice de chuvas e nos eventos climáticos extremos. As áreas de erosão são particularmente notáveis em locais com maior exposição aos fluxos hídricos, enquanto as zonas de acreção indicam regiões onde os sedimentos se acumulam devido a condições favoráveis de deposição.





Figura 6. Mapa comparativo das áreas de erosão e acreção dos bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais na Baía de Macapá no período de 2016 a 2024. Regiões em vermelho indicam erosão, enquanto áreas em verde representam acreção. Fonte: Elaborado pelos autores.

A região apresenta uma área emersa em deposição de 2,9 km², enquanto a área total em erosão é significativamente maior, atingindo 7,74 km². Esses valores destacam um desequilíbrio morfodinâmico, evidenciando predominância dos processos erosivos em relação à acreção sedimentar durante o período de análise, revelando uma tendência erosiva nos bancos e pequenas ilhas existentes na Baía de Macapá, relacionando-os com a tendência negativa, de modo que, a perda de áreas emersas é maior do que a exposição das mesmas apresentada nas análises estatísticas.

4. Discussão

Estudos demonstraram que imagens SAR, como as do sensor TerraSAR-X, são eficazes no mapeamento de uso e cobertura da terra, permitindo a discriminação de diferentes tipos de cobertura vegetal e uso do solo com precisão. No entanto, a interpretação dessas imagens requer conhecimento especializado, e a presença de ruído speckle pode dificultar a análise. Apesar dessas limitações, a integração de dados SAR com imagens ópticas tem se mostrado uma abordagem promissora para o monitoramento ambiental na Amazônia (GARCÍA *et al.*, 2012). Canisius *et al.* (2019), utilizando 22 imagens multitemporais do RADARSAT-2 demonstraram que, durante o período de águas baixas, as áreas úmidas apresentaram alta coerência, enquanto os dados de intensidade foram usados para delimitar zonas alagadas, extensão de inundações e pulsos hidrológicos. A combinação dos dados resultou na classificação da cobertura vegetal alagada com 86% de precisão. Esses achados reforçam o potencial do SAR para monitoramento detalhado em larga escala e corroboramos resultados obtidos na Baía de Macapá com imagens Sentinel-1, destacando a importância do SR para entender a dinâmica fluvial que atua sobre os bancos arenosos e ilhas.

Conforme Niedermeier, Hoja e Lehner (2005), a análise da exposição das áreas emersas ao longo dos anos revelaram padrões distintos associados aos eventos climáticos extremos de El Niño e La Niña. Mesmo durante períodos de menor precipitação, a intensidade e duração dos processos erosivos variaram significativamente de acordo com a ocorrência destes eventos climáticos extremos. As imagens de SAR (Figura 3) evidenciam que durante os eventos El Niño (A, C, D), os bancos arenosos e as pequenas ilhas da região central da baía encontram-se mais expostas, sendo assim, mais vulneráveis aos processos erosivos. Durante o período ocorre um enfraquecimento dos ventos alísios formados durante eventos de El Niño e a junção destes fatores aliados a diminuição da umidade e redução da pluviosidade promovem maior erosão na região nesses períodos e seca com passagem de eventos extremos (TAVARES, 2014).

A intensificação da erosão e a redução do nível do mar, características típicas do El Niño, combinadas com a redução da sedimentação, favorecem a remoção de sedimentos dos bancos arenosos e ilhas já existentes. Em contraste, durante os eventos La Niña (E, F e G), a deposição de sedimentos é predominante, resultando em um avanço da linha de costa e na proteção das áreas costeiras corroborando com JESUS *et al.* (2024).

Segundo Valerio *et al.* (2021), nesses períodos o aumento do nível do mar, a intensificação das ondas e das correntes de maré promovem a remobilização e o transporte de sedimentos, resultando em erosão das formações dos bancos e ilhas. Por outro lado, as áreas de deposição das formações geomorfológicas estão associadas às regiões mais abrigadas (entorno de grandes ilhas fluviais como a ilha do Cara), onde a energia da maré e dos ventos é dissipada e os sedimentos podem se acumular (MARINHO *et al.*, 2022). A ocorrência de eventos extremos, ao modificar as condições hidrodinâmicas e o fornecimento de sedimentos, exerce um papel fundamental na dinâmica costeira, acelerando os processos erosivos e deposicionais, alterando a geomorfologia dos bancos arenosos e pequenas ilhas fluviais (MARENGO *et al.*, 2018).

Os resultados sugerem que El Niño e La Niña exercem influência na dinâmica das áreas emersas, mas a falta de significância estatística impede conclusões robustas. Esses achados estão alinhados com trabalhos anteriores, como Costa, Vasconcelos e Armond (2024), que destacam a complexidade das interações entre processos climáticos globais e sedimentação fluvial em ambientes costeiros. Fatores locais, como alterações no fluxo do Rio Amazonas ou intervenções humanas, como implementação de barragens, podem mascarar o impacto direto desses fenômenos globais (VASCONCELOS *et al.*, 2021).

A compreensão da relação entre eventos extremos e processos erosivos e deposicionais é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de gestão costeira mais eficazes (ALMEIDA; COSTA; ROCHA, 2023). A identificação das áreas mais vulneráveis à erosão e a previsão da ocorrência de eventos extremos permitem a implementação de medidas de adaptação, como a construção de estruturas de proteção e a restauração de dunas, visando minimizar os impactos negativos sobre o ambiente costeiro e as comunidades locais.

Os resultados obtidos na Baía de Macapá corroboram com estudos realizados em outras regiões tropicais que utilizaram imagens Sentinel-1 para monitorar a dinâmica fluvial. Por exemplo, na bacia do rio Mekong, na Ásia, a aplicação de SR revelou padrões semelhantes de formação e migração de barras arenosas, influenciados por variações sazonais e intervenções humanas, como a construção de barragens hidrelétricas. Nessas áreas, eventos extremos como monções foram associados às alterações significativas na geomorfologia fluvial, evidenciando o papel dos fenômenos climáticos na modulação dos processos sedimentares (GU; FAN; WANG, 2020).

De acordo com o estudo de Freihardt e Frey (2023), conduzido no delta do rio Níger, a integração de dados do Sentinel-1 e análise temporal permitiu identificar hotspots de erosão e acreção. A comparação entre anos de maior influência de eventos climáticos extremos mostrou que as áreas de deposição predominam durante períodos de maior vazão fluvial, enquanto a erosão foi mais pronunciada em períodos secos. Esses resultados são paralelos às dinâmicas observadas na Baía de Macapá, demonstrando que sistemas fluviais com alta carga sedimentar e forte influência climática compartilham características comuns, apesar de suas diferenças regionais.

5. Conclusões

Os resultados apontam para o avanço científico na compreensão da geomorfologia fluvial amazônica, com a detecção da redução da área de bancos de areia, produtos da erosão fluvial mais intensa em períodos de La Niña e aumento dessas áreas em anos de El Niño e uma tendência erosiva ao longo do período de análise, fornecendo subsídios essenciais para as atividades econômicas dependentes do rio Amazonas como a navegação.

Diante das vantagens apresentadas, o SAR se consolida como uma ferramenta essencial para o mapeamento e monitoramento de bancos de areia, superando as limitações das imagens Landsat impostas pela cobertura de nuvens. A combinação de dados SAR com outras fontes de informação, como imagens ópticas de alta resolução e dados batimétricos, pode aprimorar ainda mais a precisão da identificação e caracterização desses recursos dinâmicos.

Constatou-se que, os fenômenos de El Niño e La Niña tem influência na exposição das barras arenosas na Baía de Macapá. A análise temporal das imagens Sentinel-1 revelou uma sensibilidade dos bancos arenosos às variações climáticas. As áreas de acreção e erosão sedimentar identificadas, apresentaram uma correlação com os eventos de El Niño e La Niña, indicando que estes também exercem um controle significativo sobre a dinâmica morfodinâmica da região, possibilitando a compreensão desses processos e assim, podendo identificar as áreas de surgimento de bancos que podem afetar a navegabilidade da região.

Este artigo reforça a importância da integração entre conhecimento técnico, tecnologia para o monitoramento dos bancos arenosos e pequenas ilhas. Para além oferecer uma base para o desenvolvimento de políticas públicas voltadas à sustentabilidade e à resiliência das populações amazônicas assim como para a navegação da região. A análise da geomorfologia da Baía de Macapá é essencial para o planejamento ambiental e urbano, dado o impacto significativo dos processos erosivos e de deposição sobre as margens e habitats aquáticos. O entendimento detalhado dos processos dinâmicos e das alterações geomorfológicas locais pode auxiliar na formulação de estratégias que promovam a conservação ambiental e a sustentabilidade das atividades humanas na área.

Embora os coeficientes das variáveis El Niño e La Niña indiquem tendências consistentes com o comportamento esperado, a ausência de significância estatística limita a robustez das conclusões. Desse modo, este artigo contribui para a compreensão da influência dos eventos climáticos globais na variabilidade das áreas emersas de formações sedimentares fluviais, mas ressalta a necessidade de análises mais abrangentes para elucidar tais dinâmicas com maior precisão. A continuidade das pesquisas na região, associada à aplicação de novas tecnologias e a análises interdisciplinares, deve ser essencial para mitigar os impactos das mudanças climáticas e assegurar o equilíbrio entre a conservação ambiental e o desenvolvimento socioeconômico na Amazônia e do Brasil, por se tratar de uma região relevante no cenário nacional.

Contribuições dos Autores: Para artigos com vários autores, um pequeno parágrafo especificando suas contribuições individuais deve ser fornecido. As seguintes menções devem ser usadas "Concepção, X.X. e Y.Y.; metodologia, X.X.; software, X.X.; validação, X.X., Y.Y. e Z.Z.; análise formal, X.X.; pesquisa, X.X.; recursos, X.X.; preparação de dados, X.X.; escrita do artigo, X.X.; revisão, X.X.; supervisão, X.X.; aquisição de financiamento, Y.Y. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito". A autoria deve ser limitada àqueles que tenham contribuído substancialmente para o trabalho relatado. Preencher somente após aceito para publicação.

Financiamento: Favor acrescentar: "Esta pesquisa não recebeu nenhum financiamento externo" ou "Esta pesquisa foi financiada pelo NOME DO FUNDADOR, número de bolsa XXX". Verifique cuidadosamente se os detalhes fornecidos são precisos e use a grafia padrão dos nomes das agências financiadoras em https://search.crossref.org/funding, quaisquer erros podem afetar seu financiamento futuro. Preencher somente após aceito para publicação.

Agradecimentos: Nesta seção você pode reconhecer qualquer apoio dado que não esteja coberto pela parte de contribuições dos autores ou financiamento. Isto pode incluir apoio administrativo e técnico, ou doações (por exemplo, materiais utilizados para experimentos). Preencher somente após aceito para publicação.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- 1. ABREU, C. H. M. De *et al.* Hydrodynamic Modeling and Simulation of Water Residence Time in the Estuary of the Lower Amazon River. Water, 2020. v. 12, n. 3, p. 660. https://doi.org/
- ALMEIDA, K. C. DE; COSTA, A. P. F. DA; ROCHA, T. B. DA. Utilização do google earth engine para análise comparativa da linha de costa de dois deltas da costa leste brasileira entre 1986 e 2021: delta do rio São Francisco (Al/Se) e delta do rio Paraíba do sul (Rj). Geo UERJ, n. 42, 22 jun. 2023.
- 3. ALMEIDA, R. P. *et al.* Morphodynamics and depositional architecture of mid-channel bars in large Amazonian rivers. Sedimentology, 12 mar. 2024.
- 4. ALMUDI, T.; SINCLAIR, A. J. Extreme hydroclimatic events in rural communities of the Brazilian Amazon: local perceptions of change, impacts, and adaptation. Regional Environmental Change, 2022. v. 22, n. 1, p. 27.
- 5. ARANTES, C. C. *et al.* Floodplain land cover affects biomass distribution of fish functional diversity in the Amazon River. Scientific Reports, v. 9, n. 1, 13 nov. 2019.
- AZEVEDO, A. R. De *et al.* Caracterização de uso e cobertura da terra na Amazônia utilizando imagens duais multitemporais do COSMO-SkyMed. Acta Amazonica, 2013. v. 44, n. 1, p. 87– 97.
- 7. CANISIUS, F. *et al.* SAR Backscatter and InSAR Coherence for Monitoring Wetland Extent, Flood Pulse and Vegetation: A Study of the Amazon Lowland. Remote Sensing, v. 11, n. 6, p. 720, 26 mar. 2019.
- 8. CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. Dados Maregráficos e Fluviométricos | Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-segnav/dados-de-mare-mapa. Acesso em: 12 set. 2024.
- 9. CLARK, K. E. *et al.* Erosion of organic carbon from the Andes and its effects on ecosystem carbon dioxide balance. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, v. 122, n. 3, p. 449–469, mar. 2017.
- 10. CORONESE, M. *et al.* Evidence for sharp increase in the economic damages of extreme natural disasters. Proceedings of the National Academy of Sciences, v. 116, n. 43, p. 21450–21455, 7 out. 2019.
- 11. COSTA, Á. K. R. Da *et al.* Effects of Extreme Climatic Events on the Hydrological Parameters of the Estuarine Waters of the Amazon Coast. Estuaries and Coasts, 2022. v. 45, n. 6, p. 1517–1533.
- 12. COSTA, E. De C. P. *et al.* Identificação de corpos hídricos em série temporal de radar sentinel-1. GEOgraphia, 2023. v. 25, n. 55.

- 13. COSTA, C. E. S.; VASCONCELOS, S. C. DE ; ARMOND, N. B. Passagens frontais e os impactos de eventos extremos na zona costeira do Rio de Janeiro (RJ). Geo UERJ, n. 45, 3 ago. 2024.
- 14. CRIZANTO, J. L. P. *et al.* Modeling the Impacts of Sea Level Rise Scenarios on the Amazon River Estuary. Hydrology, 2024. v. 11, n. 6, p. 86.
- DIAS, L. C. *et al.* Análise da tendência de séries históricas de vazão na bacia hidrográfica do Rio Amazonas. Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación desarrollo y práctica, p. 154–175, 6 abr. 2023.
- 16. FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Seasonal to interannual variability of the tide in the Amazon estuary. Continental Shelf Research, 2023. v. 255, p. 104945.
- FERNANDES, R. T. De V. *et al.* Geoprocessamento aplicado a análise de erosão costeira no delta do Piranhas-açu, Rio Grande do norte. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 2020. v. 9, n. 3, p. 460–479.
- FREIHARDT, J.; FREY, O. Assessing riverbank erosion in Bangladesh using time series of Sentinel-1 radar imagery in the Google Earth Engine. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2023. v. 23, n. 2, p. 751–770.
- 19. FRICKE, A. T. *et al.* Morphology and dynamics of the intertidal floodplain along the Amazon tidal river. Earth Surface Processes and Landforms, 2019. v. 44, n. 1, p. 204–218.
- 20. GARCÍA, C. E. *et al.* Análise do potencial de imagem TerraSAR-X para mapeamento temático no sudoeste da Amazônia brasileira. Acta Amazonica, v. 42, n. 2, p. 205–214, 1 jun. 2012.
- GOMES, V. J. C. *et al.* Connection between macrotidal estuaries along the southeastern Amazon coast and its role in coastal progradation. Estuarine Coastal and Shelf Science, v. 240, p. 106794– 106794, 27 abr. 2020.
- GOMES, V. J. C. *et al.* Suspended-Sediment Distribution Patterns in Tide-Dominated Estuaries on the Eastern Amazon Coast: Geomorphic Controls of Turbidity-Maxima Formation. Water, 2021. v. 13, n. 11, p. 1568.
- 23. GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 2017. v. 202, p. 18–27.
- 24. GU, Z.; FAN, H.; WANG, Y. Dynamic characteristics of sandbar evolution in the lower Lancang-Mekong River between 1993 and 2012 in the context of hydropower development. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020. v. 237, p. 106678.
- 25. HUANG, J.; SUN, Z.; XIE, D. Morphological evolution of a large sand bar in the Qiantang River Estuary of China since the 1960s. Acta Oceanologica Sinica, 2022. v. 41, n. 2, p. 156–165.
- JAHFER, S.; VINAYACHANDRAN, P. N.; NANJUNDIAH, R. S. The role of Amazon river runoff on the multidecadal variability of the Atlantic ITCZ. Environmental Research Letters, 2020. v. 15, n. 5, p. 054013.
- 27. JESUS, J. *et al.* Caracterização multitemporal de barras fluviais no arquipélago de Mariuá, Médio Rio Negro, Amazonas. Revista Geonorte, v. 15, n. 48, 9 fev. 2024.
- KRYNIECKA, K.; MAGNUSZEWSKI, A.; RADECKI-PAWLIK, A. Sentinel-1 Satellite Radar Images: A New Source of Information for Study of River Channel Dynamics on the Lower Vistula River, Poland. Remote Sensing, 2022. v. 14, n. 5, p. 1056.
- 29. LÄMMLE, L. *et al.* Anthropogenic Pressure on Hydrographic Basin and Coastal Erosion in the Delta of Paraíba do Sul River, Southeast Brazil. Journal of Marine Science and Engineering, 2022. v. 10, n. 11, p. 1585.
- LESS, D. F. S. *et al.* Seasonal and Daily Variation of Hydrodynamic Conditions in the Amazon River Mouth: Influence of Discharge and Tide on Flow Velocity. Journal of Coastal Research, 2021. v. 37, n. 6, p. 1181–1192.
- 31. LOPES, A. B. *et al.* Anomalias na precipitação de quatro municípios do Amazonas, Brasil. Research, Society and Development, 2021. v. 10, n. 14, p. e196101421766.
- MALIVA, R. Climate Change and Groundwater: Planning and Adaptations for a Changing and Uncertain Future, WSP Methods in Water Resources Evaluation Series No. 6. Springer Hydrogeology, 2021. p. 155–176.

- 33. MARINHO, R. R. *et al.* Riverbed morphology and hydrodynamics in the confluence of complex mega rivers A study in the Branco and Negro rivers, Amazon basin. Journal of South American Earth Sciences, v. 118, p. 103969–103969, 1 out. 2022.
- MESCOLOTTI, P. C. *et al.* Fluvial aggradation and incision in the Brazilian tropical semi-arid: Climate-controlled landscape evolution of the São Francisco River. Quaternary Science Reviews, 2021. v. 263, p. 106977.
- 35. MOLINAS, E.; CARNEIRO, J. C.; VINZON, S. Internal tides as a major process in Amazon continental shelf fine sediment transport. Marine Geology, 2020. v. 430, p. 106360.
- 36. MUTANGA, O.; KUMAR, L. Google Earth Engine Applications. Remote Sensing, 2019. v. 11, n. 5, p. 591.
- 37. NIEDERMEIER, A.; HOJA, D.; LEHNER, S. Topography and morphodynamics in the German Bight using SAR and optical remote sensing data. Ocean Dynamics, 2005. v. 55, n. 2, p. 100–109.
- NITTROUER, C. A. *et al.* Amazon Sediment Transport and Accumulation Along the Continuum of Mixed Fluvial and Marine Processes. Annual Review of Marine Science, 2021. v. 13, n. 1, p. 1–36.
- 39. NGUYEN, N. Y. *et al.* A composite approach towards understanding the mechanisms and driving variables of river mouth variability: A case study of the Da Dien River mouth. Coastal Engineering Journal, v. 64, n. 4, p. 533–550, 19 set. 2022.
- 40. NOVAIS, G. T.; MACHADO, L. A. Os climas do Brasil: segundo a classificação climática de Novais. Revista Brasileira de climatologia, 2023.
- 41. NOWACKI, D. J. *et al.* Seasonal, tidal, and geomorphic controls on sediment export to Amazon River tidal floodplains. Earth Surface Processes and Landforms, 2019. v. 44, n. 9, p. 1846–1859.
- PASSOS, M. S.; SOARES, E. A. A. Análise multitemporal do sistema fluvial Solimões-Amazonas entre os tributários Purus e Negro, Amazônia Ocidental, Brasil. Geologia USP. Série Científica, 2017. v. 17, n. 1, p. 61–74.
- PEREIRA, D. H. C. *et al.* Avaliação das imagens sar/sentinel-1 para identificação de garimpos de ouro embarcados por meio de algoritmos de detecção de embarcações. Caminhos de Geografia, 2024. v. 25, n. 98, p. 150–169–150–169.
- 44. SAATCHI, S. S. *et al.* Mapping land cover types in the Amazon Basin using 1 km JERS-1 mosaic. International Journal of Remote Sensing, v. 21, n. 6-7, p. 1201–1234, jan. 2000.
- SOUZA, G. C.; CALCINONI, J. E.; BEKER, F. M. Caracterização dos bancos de areia causados pelo assoreamento na Boca da Barra do canal do Linguado em Balneário Barra do Sul. Metodologias e Aprendizado, 2020. v. 2, p. 22–27.
- 46. SOUZA, J. J. De *et al.* Caracterização multitemporal de barras fluviais no arquipélago de Mariuá, médio rio negro, Amazonas. REVISTA GEONORTE, 2024. v. 15, n. 48.
- 47. TAVARES, J. P. N. Características da climatologia de Macapá-AP. Caminhos de Geografia, v. 15, n. 50, 13 jun. 2014.
- 48. VALERIO, A. DE M. *et al.* Optical Classification of Lower Amazon Waters Based on In Situ Data and Sentinel-3 Ocean and Land Color Instrument Imagery. Remote Sensing, v. 13, n. 16, p. 3057, 4 ago. 2021.
- 49. VASCONCELOS, M. A. DE *et al.* Eventos extremos hidroclimáticos e percepção da dinâmica sociocultural por ribeirinhos da Amazônia. Research, Society and Development, v. 10, n. 8, p. e22610817222, 11 jul. 2021



Esta obra está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

EVOLUÇÃO GEOMORFOLÓGICA DECADAL DO CANAL NORTE: DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA A NAVEGAÇÃO NA AMAZÔNIA OCIDENTAL

Resumo: A evolução geomorfológica do canal norte do Rio Amazonas desempenha um papel crucial na navegação e no transporte portuário na Bacia Hidrográfica do Rio Amazonas. Este artigo analisou mudanças morfológicas do canal entre 2011 e 2024, utilizando dados batimétricos e ferramentas geoespaciais (SURFER e QGIS) para avaliar processos de sedimentação, erosão e migração do canal. Os resultados indicaram redução da profundidade média de 26 m para 22 m, com migração do canal para leste-nordeste, evidenciando erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. A batimetria revelou uma morfologia complexa, com formação de bancos arenosos e subdivisão entre canais principal e secundário. A análise tridimensional mostrou que, em 2011, a morfologia era mais homogênea, enquanto, em 2024, observou-se uma maior compartimentação dos fundos, com uma taxa de mudança de 0,307 m/ano. Os processos hidrossedimentares, influenciados pela maré semidiurna e pela sazonalidade da vazão do Rio Amazonas, impactam diretamente a navegabilidade, exigindo dragagens periódicas para garantir a segurança da navegação. Estratégias como a navegação em regiões com fundos de lama fluida e o uso do calado dinâmico são apontadas como alternativas viáveis para mitigar os impactos da sedimentação e reduzir custos operacionais. A pesquisa destaca a necessidade de monitoramento contínuo e de um planejamento hidrodinâmico eficaz para otimizar a infraestrutura portuária e garantir a sustentabilidade da hidrovia, fornecendo subsídios para o gerenciamento portuário e a tomada de decisões estratégicas, promovendo maior eficiência e segurança na navegação no canal norte do Rio Amazonas.

Palavras-chave: Batimetria; Geomorfologia fluvial; Sedimentação; Navegação; Hidrodinâmica.

Abstract: The geomorphological evolution of the North Channel of the Amazon River plays a crucial role in navigation and port transportation in the Amazon River Basin. This study analyzed morphological changes in the channel between 2011 and 2024, using bathymetric data and geospatial tools (SURFER and QGIS) to assess sedimentation, erosion, and channel migration processes. The results indicated a reduction in the average depth from 26 m to 22 m, with the channel migrating east-northeast, evidencing erosion on the left bank and deposition on the right bank. The bathymetry revealed a complex morphology, with the formation of sandbanks and a subdivision between the main and secondary channels. Three-dimensional analysis showed that in 2011, the morphology was more homogeneous, whereas, in 2024, a greater compartmentalization of the riverbed was observed, with a change rate of 0.307 m/year. Hydro-sedimentary processes, influenced by the semidiurnal tide and the seasonal discharge of the Amazon River, directly impact navigability, requiring periodic dredging to ensure safe navigation. Strategies such as navigation in regions with fluid mud bottoms and the use of dynamic draft are identified as viable alternatives to mitigate sedimentation impacts and reduce operational costs. The research highlights the need for continuous monitoring and effective hydrodynamic planning to optimize port infrastructure and ensure the sustainability of the waterway, providing support for port management and strategic decision-making, promoting greater efficiency and safety in navigation in the North Channel of the Amazon River.

Keywords: Bathymetry; Fluvial geomorphology; Sedimentation; Navigation; Hydrodynamics.

INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio amazonas é a maior bacia tropical do mundo, abrange um complexo sistema de rios, canais, lagos e ilhas que continuamente sofrem mudanças, devido aos processos de sedimentação, de transporte de material particulado e deposição. O Rio Amazonas, principal responsável pela descarga de água doce no oceano Atlântico, contribui com 175.000 m3 s-1 durante o período seco (novembro), variando entre 250.000 m3 s-1 e 110.000 m3 s-1 no período chuvoso (maio) (SAMPAIO; ROBRINI, 2024), e com uma descarga sólida de 1.200 mt/ano (MILLIMAN; FARNSWORTH, 2011). O canal norte é dominado por macromaré com amplitudes máxima de 4 m (sizígia) e 2,7 m (quadratura) e mínimas -0,3 m e 0,5 m durante a sizígia e quadratura respectivamente (CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 2024), e ondas geradas por ventos alísios de nordeste com amplitude média de 1-2 m (KOSUTH; CALLÈDE; LARAQUE, 2000).

O estudo da geomorfologia de canais fluviais é de suma importância para a segurança da navegação e movimentação portuária. Segundo Galindo *et al.* (2021), o canal norte, situado na porção estuarina do rio Amazonas, margeando as cidades (Santana, Macapá) do estado do Amapá e dando acesso ao complexo portuário de Santana. Este canal é considerado uma das principais hidrovias navegáveis da região norte do Brasil, desempenhando um papel fundamental na economia e no desenvolvimento social da região.

De acordo com a Agência Nacional de Transportes Aquaviários (2024), cerca de 2,5 milhões de toneladas de grãos sólidos são movimentadas anualmente na região, sendo 80% compostas por soja. O Porto de Santana (Amapá), é um dos principais polos desse fluxo. A frota que transita pela região é diversificada, com destaque para navios de bandeira estrangeira, evidenciando a relevância do complexo portuário para o comércio internacional. Diante da importância estratégica do canal, a região portuária do Amapá passa por dragagens periódicas, devido à sua localização na região estuarina do rio Amazonas, sujeita a um intenso aporte sedimentar proveniente do rio Amazonas (COMPANHIA DAS DOCAS DE SANTANA, 2024).

Este canal é influenciado por processos hidrológicos, estando situado em uma região de alta descarga hídrica e sólida. A intensa atividade de maré semidiurna, combinada com as variações sazonais do regime hidrológico (seco de setembro a maio e chuvoso de junho a agosto), e as elevadas taxas de precipitação, com média anual superior a 3.000 mm, exercem um controle significativo sobre o deslocamento do canal (LESS *et al.*, 2021). De acordo com (FASSONI-

ANDRADE *et al.*, 2023) a alta pluviosidade, característica da região amazônica, contribui para o aumento da descarga fluvial, influenciando a geomorfologia do canal.

Os canais fluviais exibem uma ampla gama de características geomorfológicas que refletem os complexos processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos ao longo do tempo (Bastos *et al.*, 2019). Estas características incluem meandros, que são curvas sinuosas que se desenvolvem naturalmente à medida que o fluxo de água se desloca ao redor de obstáculos geológicos e devido à variação da velocidade da água. Além disso, barras de areia frequentemente se formam no leito dos canais, resultando em áreas de acúmulo de sedimentos que podem afetar a hidrodinâmica local (Fricke *et al.*, 2019). Conforme Santos *et al.* (2022) os canais para acesso podem ser classificados em três tipos em U, R e C, sendo U o que melhor permite o acesso de embarcações o R tem por característica estar próximo de uma das margens e ter passado por processos de dragagem e C o canal mais restrito com o talvegue mais elevado. Esta pesquisa objetiva analisar a evolução geomorfológica do canal norte para o período de 2011 a 2024, com o intuito de avaliar as mudanças do canal e compreender a intensidade/velocidade dos processos que controlam sua dinâmica e fornecer subsídios para a gestão ambiental e o planejamento portuário.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A área de estudo abrange o canal norte do Rio Amazonas (0° 4'12.99"N, 50° 52'54.33"O), situado na parte estuarina do rio, e caracteriza-se por um ambiente altamente dinâmico, influenciado por uma série de parâmetros físicos, como vento, descarga fluvial, maré, corrente de maré e a sedimentação resultante da interação desses fatores (Figura 1). Além disso, a variação sazonal, especialmente em relação às chuvas e à descarga do rio, desempenha um papel crucial na modificação das características geomorfológicas da região.

Ventos e Correntes de Maré

Os ventos alísios de nordeste, com amplitude média de ondas variando entre 1-2 m, desempenham um papel fundamental na dinâmica da região, impactando tanto a circulação de águas quanto a distribuição de sedimentos no leito do canal (Siqueira *et al.*, 2020). Essas correntes de vento influenciam a formação de bancos arenosos e lamosos ao gerar ondas que alteram a direção e velocidade das correntes marinhas, resultando em um contínuo movimento e rearranjo dos sedimentos. A interação entre os ventos e as correntes de maré pode intensificar os processos de erosão e deposição, favorecendo a formação de diferentes tipos de depósitos sedimentares ao longo do leito do canal.

A maré exerce uma grande influência sobre a dinâmica do canal norte, com variações semidiurnas que atingem amplitudes de até 4 m durante a sizígia e 2,7 m durante a quadratura, com valores mínimos de -0,3 m e 0,5 m, respectivamente (CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA, 2024). Essa oscilação controla a troca entre águas doces e salgadas, além de favorecer o transporte de sedimentos fluviais e marinhos ao longo do canal. As correntes de maré associadas a essas variações sazonais alteram a distribuição dos sedimentos, impactando diretamente a formação de bancos de areia e lodo, que são essenciais para a modificação da geomorfologia do canal (HOITINK; JAY, 2016; DIAS *et al.*, 2023).

Descarga e Sedimentos

A descarga do Rio Amazonas, com uma média anual de 175.000 m³/s no período seco e uma variação de 250.000 m³/s a 110.000 m³/s no período chuvoso, resulta em um intenso transporte de sedimentos para o canal norte (ANTHONY *et al.*, 2010; CONSTANTINE *et al.*, 2014). Esse fluxo intenso, em combinação com as variações sazonais das chuvas e o aumento da descarga durante o período chuvoso, contribui significativamente para a deposição de sedimentos no leito do canal, formando bancos arenosos e lamosos (BRÊDA *et al.*, 2020).

A sedimentação é maior durante o período chuvoso, quando o volume de água transportado pelo rio aumenta consideravelmente, contribuindo para a formação de depósitos de areia fina e média em algumas áreas do canal, enquanto outras áreas podem sofrer o acúmulo de sedimentos mais finos, como o silte e argila. Essas variações na deposição sedimentar causam modificações na profundidade e na morfologia do canal, o que pode afetar a navegação e exige dragagens periódicas para garantir a segurança da movimentação de embarcações (FAGUNDES *et al.*, 2021).

Variação Sazonal

A região do canal norte é caracterizada por uma variação sazonal pronunciada, principalmente no que diz respeito à precipitação pluviométrica e à descarga fluvial. Durante o período chuvoso (junho a agosto), a quantidade de água e sedimentos transportados pelo Rio Amazonas aumenta, o que altera diretamente a dinâmica do canal, resultando em um maior transporte e deposição de sedimentos. Esse aumento na descarga fluvial é acompanhado por uma intensificação das correntes de maré, o que altera a geodinâmica do ambiente estuarino (GETIRANA; PAIVA, 2013).

Por outro lado, durante o período seco (de setembro a maio), a redução da descarga fluvial leva à diminuição da quantidade de sedimentos transportados, resultando em uma maior estabilidade na formação dos bancos sedimentares. Esse ciclo sazonal é crucial para entender as mudanças geomorfológicas que ocorrem na região e a adaptação das embarcações à navegabilidade do canal (ZANIN *et al.*, 2024).

Geomorfologia da Região

A geomorfologia do canal norte é caracterizada por uma grande diversidade de formas de relevo, resultantes da interação dos processos de sedimentação e erosão. Os canais fluviais na região apresentam uma morfologia altamente dinâmica, com meandros, bancos de areia de 15m e ilhas fluviais como a ilha do Cará (Figura 1), além de variações de profundidade que podem alterar rapidamente ao longo do tempo. Segundo Rudorff; Melack; Bates (2014), os processos de deposição e erosão são amplificados pela combinação das altas taxas de descarga e pelas marés semidiurnas, resultando em mudanças frequentes na topografia do fundo do canal.

Estudos sobre a geomorfologia do estuário amazônico indicam que os canais fluviais, como o canal norte, apresentam formas complexas de relevo que são moldadas pela interação entre a descarga do rio, a maré e as correntes de vento (FASSONI-ANDRADE *et al.*, 2020). Essas mudanças contínuas na morfologia do canal são um reflexo direto da intensa atividade hidrológica e dos processos sedimentares que ocorrem na região.

Dinâmica de Navegação

A dinâmica de navegação no canal norte é altamente afetada pelas variações geomorfológicas e hidrodinâmicas do canal. A movimentação de grãos e outros produtos, especialmente soja, é uma das principais atividades econômicas da região, com o Porto de Santana sendo um dos principais pontos de saída para o comércio internacional (SILVA; TOBIAS, 2023). No entanto, o tráfego de embarcações enfrenta desafios devido à constante modificação da profundidade do canal, que pode afetar a navegabilidade e exigir dragagens frequentes (SCHAEFFER *et al.*, 2023).

A variação sazonal e os depósitos sedimentares formados no leito do canal exigem que as operações portuárias e de transporte se ajustem constantemente às condições do ambiente estuarino. A dragagem periódica é necessária para garantir que a profundidade do canal seja adequada para a passagem de embarcações, especialmente durante o período de maior sedimentação, o que torna o monitoramento contínuo essencial para a segurança da navegação (LEWIS; RHOADS, 2015).



Figura 1 – Mapa de localização do canal norte, com a marcação da ilha do cará como referência da divisão entre Amapá e o Pará.

Metodologia

A carta náutica (n° 204) foi adquirida em formato raster e cobriram a área entre a Ilha da Pedreira e a Ilha de Santana. A tabela 1 apresenta as ferramentas utilizadas para extrair as informações batimétricas das cartas náuticas, os arquivos raster foram importados para o software Surfer, onde a ferramenta Digitize foi utilizada para a digitalização manual dos pontos batimétricos, seguindo a metodologia descrita por Augusto, Robrini e Moraes (2022). E da geração dos mapas batimétricos com os valores extraídos e interpolados afim de garantir a precisão dos valores encontrados.

Tabela 1 - Ferramentas e softwares utilizados.

FERRAMENTA/SOFTWARE	FINALIDADE
SURFER	Digitalização de cartas náuticas e geração de modelos batimétricos e aplicação do método de krigagem para geração das superfícies
QGIS	Manipulação espacial dos dados e elaboração de mapas
PYTHON	Processamento de dados gerais criação de visualizações de dados

Os dados batimétricos de 2011 e os valores extraídos das cartas náuticas de 2024 foram interpolados utilizando o método de krigagem, escolhido por sua alta precisão na modelagem

de superfícies batimétricas. A análise exploratória dos dados orientou o ajuste dos parâmetros da interpolação, considerando a variabilidade espacial e a distribuição dos pontos. As superfícies geradas foram validadas comparando-se os modelos interpolados com pontos de controle disponíveis na região.

Com base no trabalho de superfícies interpoladas, foram gerados mapas de curvas de nível para visualizar a morfologia do leito do canal similar ao trabalho realizado por Gualtieri et al. (2018). Seções transversais foram extraídas em pontos estratégicos para avaliar as variações de profundidade e largura do canal de navegação. Além disso, foram criadas visualizações tridimensionais (3D) das superfícies interpoladas, permitindo uma análise mais detalhada das mudanças morfológicas ao longo do tempo, destacando processos de erosão, deposição e migração de bancos arenosos.

RESULTADOS

As figuras 2 e 5 apresentam os mapas batimétricos dos anos de 2024 e 2011. Em 2024, as isóbatas variaram de 24 a 30 metros de profundidade, sendo a saída do canal a região mais profunda, com 45 metros, considerando a maré da região, que apresenta uma variação média de 2,79 metros de altura ao longo da série histórica (figura 3). A profundidade média no canal de acesso no ano de 2024 foi de 22 metros. A baía de Macapá possui um canal secundário com profundidades de 10 a 20 metros, separados por bancos arenosos alongados que variam de 15 a 20 metros de extensão.



Figura 2 – Carta batimétrica, mostrando as isóbatas retiradas da carta náutica nº 204 de 2024. Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 3 – Série histórica 2010 a 2022 de maré da estação de Macapá com valores de máximo, mínimo e média para a altura de maré. Fonte: Elaborado pelos autores.

A representação tridimensional (3D) da fisiografia do fundo do canal norte do rio Amazonas revelou uma clara subdivisão entre o canal principal e um canal secundário adjacente. O canal principal se destaca por sua maior profundidade e continuidade morfológica, apresentando

taludes acentuados e um eixo bem definido, característico de um ambiente de alta energia hidrodinâmica. Em contraste, o canal secundário exibe menores profundidades, feições morfológicas mais irregulares e depósitos sedimentares que sugerem uma dinâmica diferenciada, possivelmente controlada por variações no fluxo e na sedimentação. Essa compartimentação evidencia a complexidade geomorfológica da região e pode estar associada a processos hidrodinâmicos sazonais e à influência da maré na distribuição dos sedimentos (Figura 4).

Figura 4 – Mapa 3D do ano de 2024 gerado a partir das curvas batimétricas. Fonte: Elaborado pelos autores

Em 2011, a região da saída do canal de navegação apresentou maiores profundidades, atingindo valores em torno de 50 metros (Figura 5). Os bancos arenosos que separam os canais principal e secundário exibiram alturas variando entre 10 e 15 metros, evidenciando a compartimentação morfológica da área. Na margem oeste, próxima à costa do município de Macapá, observou-se um rápido aumento da profundidade, passando de 0 metros na linha de costa para 12 e 24 metros em direção ao canal. Em comparação com 2024, a saída do canal manteve-se como a região mais profunda, atingindo 56 metros em 2011. Além disso, a profundidade média do canal nesse período foi superior à registrada em 2024, com valores em torno de 26 metros, sugerindo possíveis processos de sedimentação e redistribuição de material ao longo do tempo.

Figura 5 - Carta batimétrica, com as isóbatas retiradas da batimetria de 2011. Fonte: Elaborado pelos autores

A representação 3D (Figura 6) da batimetria de 2011 revelou uma morfologia distinta no canal norte, caracterizada pela ausência de uma subdivisão clara entre o canal principal e o canal secundário. Diferentemente do que foi observado em 2024, a superfície do fundo apresentava uma topografia mais homogênea, com variações de profundidade menos acentuadas ao longo do canal principal. A maior feição encontrada na região é um banco arenoso na região central foi uma duna subaquosa, sugerindo a atuação de processos hidrodinâmicos que influenciam a redistribuição dos sedimentos. Além disso, a profundidade ao longo do canal principal mantevese relativamente constante, contrastando com padrões mais complexos registrados em períodos posteriores.

Figura 6 – Mapa 3D do ano de 2011 gerado a partir das curvas batimétricas. Fonte: Elaborado pelos autores.

A comparação das curvas batimétricas de 2011 e 2024 evidencia uma migração do canal no sentido leste-nordeste, caracterizada por erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. O deslocamento das isóbatas indica um aprofundamento em setores onde as curvas de 2024 estão mais internas ao canal, enquanto o avanço para menores profundidades sugere deposição sedimentar (Figura 7).

Essas variações refletem uma reconfiguração morfológica significativa do canal norte do rio Amazonas ao longo dos 13 anos analisados conferindo uma taxa de redução média do canal com valor de 0,307 m/ano associados a redução apresentada. A dinâmica observada está associada a alterações na descarga fluvial, eventos hidrodinâmicos extremos e padrões de transporte sedimentar (FRANZINELLI, 2011). A quantificação dessas mudanças é essencial para compreender a evolução do canal e seus impactos na hidrodinâmica regional, navegabilidade e estabilidade de bancos arenosos.

Figura 7 – Comparação das curvas batimétricas do canal norte do rio Amazonas nos anos de 2011 (vermelho) e 2024 (azul). Observa-se a migração do canal no sentido leste-nordeste, com indícios de erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. Fonte: Elaborado pelos autores

Para a análise da migração do canal norte ao longo dos anos 2011 a 2024, foram realizados seis perfis transversais distribuídos de maneira estratégica ao longo da extensão do canal (Figura 8). Esses perfis foram obtidos a partir de mapas batimétricos detalhados, cobrindo a totalidade da largura do canal, e estão dispostos de forma paralela, permitindo uma visualização abrangente das variações batimétricas. Cada perfil fornece uma representação da topografia subaquática do canal em diferentes pontos de sua extensão, facilitando a identificação de padrões de migração, erosão e sedimentação que caracterizam a dinâmica do sistema. A análise desses perfis permite uma compreensão mais precisa das mudanças no relevo submarino, associadas a fenômenos como alterações no fluxo hidrodinâmico e influências de eventos extremos.

Sessões transversais permitem analisar a variação do canal de navegação ao longo dos anos a figura 9 demonstra a variação dos canais principal e secundário presentes na baia de Macapá.

A análise dos perfis de profundidade do canal norte do Rio Amazonas, comparando os anos de 2011 e 2024, revelou mudanças morfológicas significativas ao longo do canal principal de navegação. Essas alterações refletem processos dinâmicos de erosão, sedimentação e ajustes hidrológicos (Figura 9).

No perfil 1, a profundidade máxima aumentou de 30 metros em 2011 para cerca de 40 metros em 2024, acompanhada por uma expansão lateral do canal. Essa mudança indica um processo de aprofundamento e erosão das margens, possivelmente devido a um aumento na capacidade de transporte de sedimentos ou a mudanças no regime hidrológico (Figura 9a).

O perfil 2, também apresentou um aumento na profundidade, de cerca de 20 metros para 30 metros, com uma expansão lateral significativa. A distância horizontal do canal aumentou, sugerindo que o processo de erosão atuou tanto no leito quanto nas margens. Essa expansão pode estar relacionada a mudanças na dinâmica fluvial, como variações na vazão ou na carga de sedimentos (Figura 9b).

No perfil 3, a profundidade manteve-se relativamente estável, com pouca variação entre os dois anos. No entanto, a largura do canal aumentou consideravelmente, indicando um processo de

alargamento sem um correspondente aprofundamento. Esse padrão pode ser atribuído à deposição de sedimentos no leito do rio, que compensou o aprofundamento esperado, enquanto as margens continuaram a sofrer erosão lateral (Figura 9c).

O Perfil 4 mostrou uma leve redução na profundidade máxima de 30 metros em 2011 para 25 metros em 2024, associada a um aumento na largura do canal. Essa tendência sugere um processo de sedimentação no leito, que reduziu a profundidade, enquanto o canal se expandia lateralmente. Esse comportamento pode estar relacionado a uma diminuição na capacidade de transporte de sedimentos ou a mudanças na dinâmica do fluxo (Figura 9d).

O Perfil 5 apresentou uma leve diminuição na profundidade máxima, de cerca de 30 metros para 25 metros, juntamente com um aumento na largura do canal. Essa mudança pode ser atribuída a processos de sedimentação que reduziram a profundidade enquanto o canal se expandia lateralmente (Figura 9e).

O perfil 6 também mostrou uma leve redução na profundidade máxima, de 30 metros em 2011 para 25 metros em 2024, associada a um aumento na largura do canal. Essa tendência sugere um processo de sedimentação no leito, que reduziu a profundidade, enquanto o canal se expandia lateralmente. Esse comportamento pode estar relacionado a uma diminuição na capacidade de transporte de sedimentos ou a mudanças na dinâmica do fluxo (Figura 9f).

As alterações observadas entre os dois anos destacam processos de erosão, sedimentação e mudanças morfológicas, com tendências de aprofundamento e alargamento do canal em determinados trechos. Essas variações têm implicações significativas para a navegação, a dinâmica sedimentar e a gestão ambiental na região (NITTROUER *et al.*, 2021).


Figura 9 - Perfis de profundidade do canal norte do Rio Amazonas para os anos de 2011 e 2024. As setas indicam a posição do canal principal de navegação. Os gráficos mostram a variação da profundidade (eixo vertical, em metros) em função da distância horizontal (eixo horizontal, em metros) para os perfis de 1a 6.

DISCUSSÃO

As análises batimétricas realizadas nos anos de 2011 e 2024 evidenciam mudanças significativas na morfologia do canal norte do Rio Amazonas. Em 2011, a profundidade média do canal era de 26 metros, enquanto em 2024 essa média reduziu para 22 metros. Essa diminuição na profundidade média sugere um processo de sedimentação contínua ao longo dos anos, resultante da dinâmica hidrossedimentar característica da região (HERRERO *et al.*, 2018) Estudos anteriores já apontavam para a migração e erosão de bancos de areia, deslocando-se para o norte e aumentando a profundidade em áreas mais ao sul (SUKHODOLOV *et al.*, 2017). Essas alterações podem ser atribuídas à intensa variação de marés e à descarga fluvial do Rio Amazonas, que influenciam diretamente o balanço sedimentológico local (KHOJASTEH *et al.*, 2021).

A ausência de uma subdivisão clara entre o canal principal e o secundário na representação tridimensional de 2011, juntamente com a presença de uma duna subaquosa na região central,

indica uma morfologia mais homogênea nesse período. De cordo com Barros; Rollnic; Watanabe (2017), essa homogeneidade pode refletir uma fase de menor energia hidrodinâmica ou uma distribuição uniforme dos sedimentos. Pesquisas na Baía de Macapá destacam que as variações morfológicas do leito são influenciadas pela constante atuação dos processos hidrodinâmicos e sedimentares, corroborando a relação entre as feições superficiais de fundo e as estruturas em subsuperfície (HERRERO *et al.*, 2016). Portanto, a presença de formas de fundo, como dunas subaquosas, está intrinsecamente ligada à dinâmica sedimentar e às condições hidrodinâmicas prevalentes (AHMED; CONSTANTINE; DUNNE, 2019).

A região da saída do canal de navegação apresentou profundidades máximas de 50 metros em 2011 e 56 metros em 2024, indicando um aprofundamento nessa área específica. Essa tendência pode estar associada a processos erosivos localizados, possivelmente intensificados pela convergência de fluxos e pela interação entre correntes fluviais e marítimas (MARINHO *et al.*, 2022). Estudos sobre a confluência dos rios Negro e Solimões demonstram que alterações nas características de fluxo, juntamente com a movimentação da carga de fundo, podem provocar transformações morfológicas no canal, incluindo a formação de cavidades similares a poços e deposição de sedimentos sob a forma de barras (JESUS *et al.*, 2024), e este padrão se estende a confluência entre os canais sul e norte do rio amazonas. Assim, a dinâmica observada na saída do canal de navegação do Rio Amazonas pode ser resultado de processos semelhantes, onde a interação hidrodinâmica promove modificações na estrutura do leito fluvial (ANTHONY *et al.*, 2010)

A batimetria desempenha um papel crucial na movimentação portuária, especialmente em regiões de grande variabilidade sedimentar, como o canal norte do Rio Amazonas. A redução da profundidade pode impactar diretamente a segurança da navegação, exigindo frequentes ajustes nas rotas e restrições de calado para embarcações de grande porte (Amaral *et al.*, 2020). Além disso, o acúmulo de sedimentos pode gerar a necessidade de dragagens constantes, aumentando os custos operacionais e os impactos ambientais associados à remoção de material do fundo do canal (LATRUBESSE *et al.*, 2017).

Uma alternativa viável para a manutenção da navegabilidade na região é a utilização da lama fluida para a operação segura de embarcações. Estudos indicam que, em determinadas condições, a lama fluida pode atuar como um meio de suporte dinâmico para os navios, permitindo a navegação com calados superiores aos valores tradicionais estabelecidos pelos métodos batimétricos convencionais (WINTERWERP; WANG, 2013). Experiências em portos europeus, como em Roterdã, demonstraram que a utilização desse princípio possibilita a

otimização da capacidade de carga das embarcações, reduzindo a necessidade de dragagem intensiva (MCANALLY; MEHTA, 2002)

A implementação do sistema de calado dinâmico pode ser uma solução inovadora para otimizar a navegação no canal norte do Rio Amazonas. Esse sistema, baseado em dados em tempo real de batimetria, hidrodinâmica e características sedimentares, permite uma gestão mais eficiente da profundidade operacional dos navios, minimizando os riscos de encalhe e maximizando a segurança das operações (MALCHEREK *et al.*, 2014). Além disso, o uso de tecnologias como sensores acústicos e modelagem numérica pode fornecer informações precisas sobre a distribuição do sedimento no canal, auxiliando na tomada de decisões em tempo real (RAMÓN *et al.*, 2014).

Adicionalmente, a variabilidade sazonal e os eventos hidrológicos extremos podem afetar a navegabilidade no canal norte, reforçando a necessidade de um monitoramento contínuo e de estratégias adaptativas para a gestão do transporte aquaviário. Estudos apontam que a interação entre os fluxos fluviais e a influência das marés pode modificar rapidamente a distribuição dos sedimentos, tornando essencial a aplicação de modelos preditivos para a manutenção da segurança e eficiência das operações portuárias (ÁVILA; GALLO, 2021). Assim, a integração entre monitoramento batimétrico avançado, navegação na lama fluida e o sistema de calado dinâmico representa um caminho promissor para o desenvolvimento sustentável da infraestrutura portuária na região amazônica.

A pesquisa destaca a necessidade de monitoramento contínuo e de um planejamento hidrodinâmico eficaz para otimizar a infraestrutura portuária e garantir a sustentabilidade da hidrovia. Os achados deste estudo fornecem subsídios valiosos para o gerenciamento portuário e a tomada de decisões estratégicas, promovendo maior eficiência e segurança na navegação no canal norte do Rio Amazonas.

CONCLUSÕES

A análise da evolução geomorfológica do canal norte do Rio Amazonas entre 2011 e 2024 demonstrou que a região apresenta uma tendência de redução na profundidade do canal principal, com uma diminuição de 4 metros nesse período. Essa dinâmica reflete processos de sedimentação e migração do canal em direção ao leste-nordeste, com uma taxa média de deslocamento estimada em 0,307 m/ano.

Os resultados indicam a necessidade de monitoramento contínuo para garantir a segurança da navegação e otimizar operações de dragagem, reduzindo custos e impactos ambientais. O estudo

também fornece subsídios para a gestão da hidrovia, contribuindo para a manutenção do acesso ao complexo portuário de Santana.

A compreensão da dinâmica sedimentar do canal norte é essencial para a elaboração de estratégias sustentáveis de gestão fluvial. A implementação de programas de monitoramento continuado permitirá a identificação precoce de mudanças na morfologia do canal, possibilitando a adoção de medidas mitigadoras eficazes. Além disso, as informações geradas por este estudo podem subsidiar decisões relacionadas à infraestrutura portuária e ao planejamento de rotas de navegação, garantindo maior segurança e eficiência no transporte hidroviário da região. Dessa forma, a pesquisa destaca a relevância da análise batimétrica na compreensão da dinâmica dos canais fluviais e a importância do monitoramento contínuo para a gestão ambiental e o planejamento de atividades marítimas na região do canal norte.

Portanto, a evolução das técnicas de monitoramento batimétrico e a adoção de estratégias inovadoras, como a navegação na lama fluida e o calado dinâmico, são fundamentais para garantir a sustentabilidade da movimentação portuária no canal norte do Rio Amazonas. Essas soluções podem contribuir para a redução dos custos de dragagem e a manutenção da segurança na navegação, promovendo a eficiência logística na região.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DOS TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS . **Estatístico Aquaviário 2023**. Disponível em: https://web3.antaq.gov.br/ea/sense/transptku.html#pt. Acesso em: 8 out. 2024.

AHMED, J.; CONSTANTINE, J. A.; DUNNE, T. The role of sediment supply in the adjustment of channel sinuosity across the Amazon Basin. **Geology**, 19 jun. 2019.

ALMEIDA, R. P. *et al.* Morphodynamics and depositional architecture of mid-channel bars in large Amazonian rivers. **Sedimentology**, 12 mar. 2024.

ANTHONY, E. J. *et al.* The Amazon-influenced muddy coast of South America: A review of mud-bank–shoreline interactions. **Earth-Science Reviews**, v. 103, n. 3-4, p. 99–121, dez. 2010.

AUGUSTO, C.; ROBRINI, M. E.; MORAES, H. B. DE . Dinâmica dos fundos das áreas de disposição de sedimentos dragados na Baía de Guajará, Pará, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 23, n. 1, 13 jan. 2022.

ÁVILA, B.; GALLO, M. N. Morphological behavior of the Magdalena River delta (Colombia) due to intra and interannual variations in river discharge. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 108, p. 103215, jun. 2021.

BARROS, M. V. DA S.; ROLLNIC, M.; WATANABE, F. K. CARACTERIZAÇÃO DAS PRINCIPAIS FEIÇÕES SUPERFICIAIS DE FUNDO E EM SUBSUPERFÍCIE NO LIMITE SUDOESTE DA BAÍA DE MACAPÁ, CANAL DO NORTE, RIO AMAZONAS. **Tropical Oceanography**, v. 45, n. 1, 7 maio 2017.

BRÊDA, J. P. L. F. *et al.* Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections. **Climatic change**, v. 159, n. 4, p. 503–522, 30 jan. 2020.

CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. **Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha**. Disponível em: https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>.

COMPANHIA DAS DOCAS DE SANTANA. **Programação de Navios**. Disponível em: http://www.docasdesantana.com.br/index.php/operacional/programacao-de-navios. Acesso em: 30 set. 2024.

CONSTANTINE, J. A. *et al.* Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. **Nature Geoscience**, v. 7, n. 12, p. 899–903, 2 nov. 2014.

DIAS, L. C. *et al.* ANÁLISE DA TENDÊNCIA DE SÉRIES HISTÓRICAS DE VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO AMAZONAS. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales Investigación desarrollo y práctica**, p. 154–175, 6 abr. 2023.

FAGUNDES, H. O. *et al.* Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. **Water Resources Research**, v. 57, n. 2, 1 fev. 2021.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* High-resolution mapping of floodplain topography from space: A case study in the Amazon. **Remote Sensing of Environment**, v. 251, p. 112065–112065, 11 set. 2020.

FASSONI-ANDRADE, A. C. *et al.* Seasonal to interannual variability of the tide in the Amazon estuary. **Continental shelf research**, v. 255, p. 104945–104945, 1 fev. 2023.

FRANZINELLI, E. Características morfológicas da confluência dos rios Negro e Solimões (Amazonas, Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 41, n. 4, p. 587–596, 1 dez. 2011.

GALINDO, A. G. *et al.* O porto de Santana no estado Amapá como canal para o desenvolvimento do comércio internacional na Amazônia. Revista Científica
Multidisciplinar do CEAP, v. 3, n. 1, p. 6–6, 27 ago. 2021.

GETIRANA, A. C. V.; PAIVA, R. C. D. Mapping large-scale river flow hydraulics in the Amazon Basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 5, p. 2437–2445, maio 2013.

GUALTIERI, C. *et al.* A field study of the confluence between Negro and Solimões Rivers. Part 1: Hydrodynamics and sediment transport. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 350, n. 1-2, p. 31–42, jan. 2018.

HERRERO, H. *et al.* Flow structure at a confluence: experimental data and the bluff body analogy. **Journal of Hydraulic Research**, v. 54, n. 3, p. 263–274, 11 abr. 2016.

HERRERO, H. *et al.* The influence of tributary flow density differences on the hydrodynamic behavior of a confluent meander bend and implications for flow mixing. **Geomorphology**, v. 304, p. 99–112, 1 mar. 2018.

HOITINK, A. J. F.; JAY, D. A. Tidal river dynamics: Implications for deltas. **Reviews of Geophysics**, v. 54, n. 1, p. 240–272, mar. 2016.

JESUS, J. *et al.* CARACTERIZAÇÃO MULTITEMPORAL DE BARRAS FLUVIAIS NO ARQUIPÉLAGO DE MARIUÁ, MÉDIO RIO NEGRO, AMAZONAS. **Revista Geonorte**, v. 15, n. 48, 9 fev. 2024.

KHOJASTEH, D. *et al.* Sea level rise impacts on estuarine dynamics: A review. **Science of The Total Environment**, v. 780, p. 146470, ago. 2021.

KOSUTH, P.; CALLÈDE, J.; LARAQUE, A. Ocean Tide Waves Propagation along Downstream Amazon River: Measuring the Amazon Discharge at the Estuary. **Proceedings**, 11 set. 2000. LATRUBESSE, E. M. *et al.* Damming the rivers of the Amazon basin. **Nature**, v. 546, n. 7658, p. 363–369, 1 jun. 2017.

LEWIS, Q. W.; RHOADS, B. L. Rates and patterns of thermal mixing at a small stream confluence under variable incoming flow conditions. **Hydrological Processes**, v. 29, n. 20, p. 4442–4456, 22 maio 2015.

MALCHEREK, G. *et al.* Mesenchymal stromal cells inhibit proliferation of virus-specific CD8+ T cells. **Leukemia**, v. 28, n. 12, p. 2388–2394, 17 set. 2014.

MARINHO, R. R. *et al.* Riverbed morphology and hydrodynamics in the confluence of complex mega rivers - A study in the Branco and Negro rivers, Amazon basin. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 118, p. 103969–103969, 1 out. 2022.

MCANALLY, W. H.; MEHTA, A. J. Significance of Aggregation of Fine Sediment Particles in Their Deposition. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 54, n. 4, p. 643–653, abr. 2002.

MILLIMAN, J. D.; FARNSWORTH, K. L. River Discharge to the Coastal Ocean. **Cambridge University Press**, 2011.

NITTROUER, C. A. *et al.* Amazon Sediment Transport and Accumulation Along the Continuum of Mixed Fluvial and Marine Processes. **Annual Review of Marine Science**, v. 13, n. 1, p. 501–536, 3 jan. 2021.

PEIXOTO, H. J. C.; EL ROBRINI, M. Dinâmica espaço-temporal (1986-2020) de manguezais de RESEX da Foz do rio Pará (Amazônia oriental, Brasil). **Novos Cadernos NAEA**, v. 27, n. 2, 25 ago. 2024.

RAMÓN, C. L. *et al.* Mixing dynamics at the confluence of two large rivers undergoing weak density variations. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 119, n. 4, p. 2386–2402, abr. 2014.

RUDORFF, C. M.; MELACK, J. M.; BATES, P. D. Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: 2. Seasonal and interannual hydrological variability. **Water Resources Research**, v. 50, n. 1, p. 635–649, jan. 2014.

SAMPAIO, R. S.; ROBRINI, M. E. Mudança de níveis de água (1995-2021) no Estuário
Superior do rio Amazonas (Baixo Amazonas - Pará): possíveis fatores que afetam. Revista
Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 2, p. 882–894, 14 mar. 2024.

SANTOS, E. M. *et al.* **Planejamento portuário : recomendações para acessos náuticos**. 1. ed. Rio de janeiro: Praticagem do Brasil, 2022.

SCHAEFFER, R. *et al.* A NEW INFRASTRUCTURE FOR THE AMAZON. **The Amazon** we want, 9 dez. 2023.

SILVA, Á. S. DA ; TOBIAS, M. S. G. A VIABILIDADE DO PORTO DE SANTANA NO CONTEXTO DO PROJETO ARCO NORTE E SEUS CONDICIONANTES. **Editora Científica Digital eBooks**, p. 25–44, 1 jan. 2023.

SILVA, T. G. DA; RABELO, F. D. B.; NUNES, H. K. DE B. Geomorfologia fluvial e geodiversidade do Lago de Tefé (Tefé, Amazonas, Brasil). Revista Brasileira de Geografia Física, v. 17, n. 4, p. 2396–2411, 23 jul. 2024.

SUKHODOLOV, A. N. *et al.* Turbulent flow structure at a discordant river confluence: Asymmetric jet dynamics with implications for channel morphology. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 122, n. 6, p. 1278–1293, jun. 2017.

WINTERWERP, J. C.; WANG, Z. B. Man-induced regime shifts in small estuaries—I: theory. **Ocean Dynamics**, v. 63, n. 11-12, p. 1279–1292, 12 nov. 2013.

ZANIN, P. R. *et al.* Streamflow Dynamics of Amazonian Rivers According to Their Hydrogeochemical Heterogeneity. **Heterogeneity**, 1 jan. 2024.