

Mudanças Geomorfológicas no Canal Norte no Rio Amazonas (2011–2024): Impactos Para a Navegação na Baía De Macapá

Geomorphological Changes in the North Channel of the Amazon River (2011–2024): Impacts on Navigation in the Bay of Macapá

Eduardo Pantoja da Silva *, Maâmar El Robrini **

* Grupo de Estudos Marinhos Costeiros (GEMC), Universidade Federal do Pará (UFPA), eduardo.pantoja.silva@ig.ufpa.br

** Grupo de Estudos Marinhos Costeiros (GEMC) e Faculdade de Oceanografia (FAOC), Universidade Federal do Pará (UFPA), robrinigmc@gmail.com

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v65i1.100215>

Resumo

O Canal Norte do rio Amazonas é uma porta logística vital na Bacia Hidrográfica do rio Amazonas. Este artigo analisa a evolução geomorfológica do canal, no período de 2011 a 2024, avaliando os processos morfodinâmicos e a quantificação da incerteza diferencial das fontes de dados. A metodologia empregou um rigoroso processo de padronização, reprojetoando os dados de levantamento multifeixe (2011) e de digitalização de carta náutica (2024) para o sistema métrico SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S. A interpolação por krigagem ordinária, com modelos Gaussianos ajustados individualmente, foi utilizada. Os resultados da validação cruzada quantificaram a disparidade de precisão entre as fontes, revelando um baixo erro (RMSE) de 1,16 m para o modelo de 2011 e um erro moderado e conhecido de 5,25 m para o modelo de 2024. A análise morfológica revelou uma tendência de assoreamento, com redução da profundidade média de 26 m para 22 m, e uma migração do canal para leste-nordeste. Conclui-se que a gestão segura do canal depende de uma abordagem que incorpore essa incerteza quantificada. A análise reforça a necessidade de monitoramento batimétrico contínuo e valida a adoção de estratégias de navegação adaptativas, como o calado dinâmico, para garantir a segurança operacional neste complexo sistema fluvial.

Palavras-chave:

Batimetria, Geomorfologia fluvial, Sedimentação, Hidrodinâmica.

Abstract

The North Channel of the Amazon River is a vital logistical gateway within the Amazon River Basin. This paper analyzes the geomorphological evolution of the channel from 2011 to 2024, assessing morphodynamic processes and quantifying the differential uncertainty of data sources. The methodology applied a rigorous standardization process, reprojecting multibeam survey data (2011)

and digitized nautical chart data (2024) to the metric system SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S. Ordinary kriging interpolation with individually fitted Gaussian models was used. Cross-validation results quantified the precision disparity between sources, revealing a low root mean square error (RMSE) of 1.16 m for the 2011 model and a moderate, well-characterized error of 5.25 m for the 2024 model. The morphological analysis indicated a silting trend, with a decrease in mean depth from 26 m to 22 m, and a channel migration toward the east-northeast. It is concluded that safe channel management depends on an approach that incorporates this quantified uncertainty. The analysis reinforces the need for continuous bathymetric monitoring and supports the adoption of adaptive navigation strategies, such as dynamic draft, to ensure operational safety in this complex fluvial system.

Keywords:

Bathymetry, Fluvial geomorphology, Sedimentation, Hydrodynamics.

I. INTRODUÇÃO

A bacia hidrográfica do rio Amazonas é a maior bacia tropical do mundo, abrange um complexo rede de rios, canais, lagos e ilhas que sofrem mudanças contínuas, devido aos processos de sedimentação, transporte e deposição de material particulado sólido (MPS). O rio Amazonas despeja anualmente uma descarga de água doce no oceano Atlântico de 175.000 m³ s⁻¹/ano, variando entre 250.000 m³ s⁻¹ (período chuvoso - maio) e 110.000 m³ s⁻¹ (seco - novembro) (Sampaio; El Robrini, 2024), e descarga sólida de 1.200 mt/ano (Milliman; Farnsworth, 2011). O canal norte, assim como a região amazônica é dominado por macromaré com amplitude máxima de 4 m (sizígia) e 2,7 m (quadratura) e mínima 0,3 m e 0,5 m durante a sizígia e quadratura, respectivamente (Centro de Hidrografia da Marinha, 2025), 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 importante para a segurança da navegação e movimentação portuária. Segundo Galindo et al. (2021), o canal norte, situado na parte estuarina do rio Amazonas, margeando as cidades do estado do Amapá e conferindo acesso ao complexo portuário de Santana, sendo 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), um volume 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 sendo a última realizada em 2024, devido à sua posição estratégica no estuário do rio Amazonas, sujeita a um 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 > 3.000 mm/ano, exercem um controle significativo sobre o deslocamento do canal (Less et al., 2021). A alta pluviosidade, característica da região amazônica, também contribui para o aumento da descarga fluvial, influenciando a geomorfologia do canal (Fassoni-Andrade et al., 2023).

Os canais fluviais exibem 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 à medida que o fluxo de água se desloca ao redor de obstáculos geológicos 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. O canal do tipo U é 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, enquanto o do tipo C caracteriza-se por ser o canal mais restrito com o talvegue mais elevado.

Este artigo objetiva analisar a evolução geomorfológica deste canal para o período de 2011 a 2024, para 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.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

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 dinâmico, influenciado por processos físicos (vento, descarga fluvial, maré, corrente de maré) e a sedimentação resultante da interação desses fatores (Figura 1). O índice de chuvas e descarga hídrica desempenham sazonalmente, um papel crucial na modificação das características geomorfológicas da região.

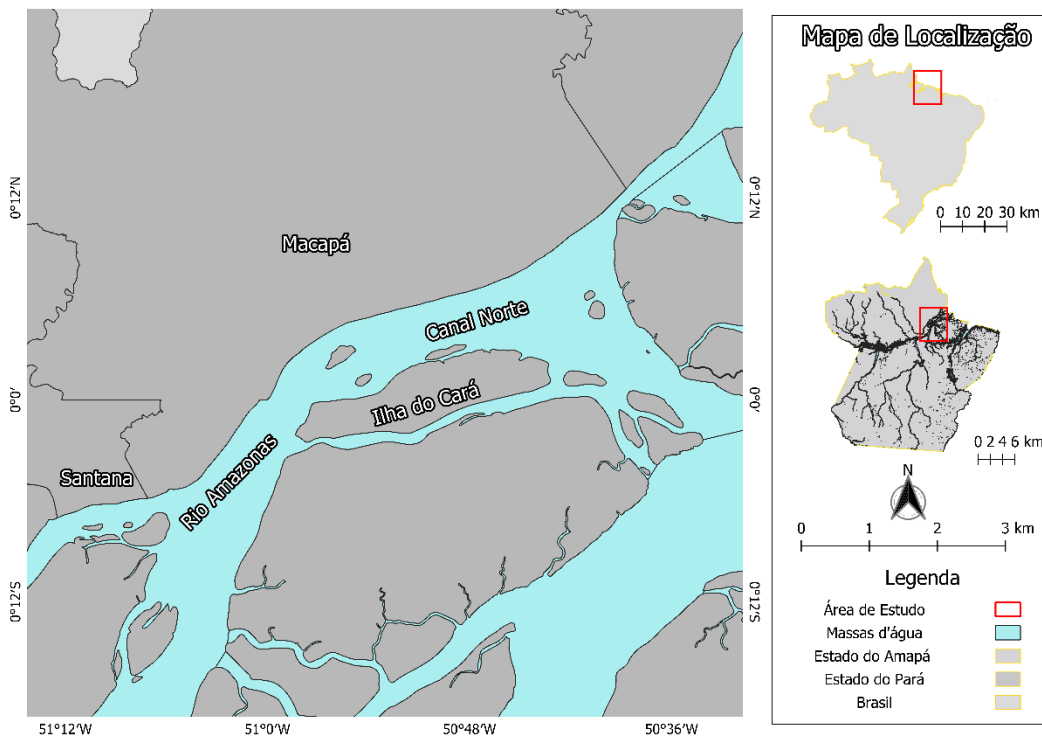


Figura 1 – Localização da área de estudo, destacando o canal Norte (C.), a ilha do Cará (I.) e o rio Amazonas (R.). Fonte: Os autores.

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 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 depósitos sedimentares no canal.

A maré exerce influência na dinâmica do Canal Norte, com variação semidiurna que atinge amplitude de até 4 m (sizígia) e 2,7 m (quadratura), e valores mínimos de 0,3 m e 0,5 m, respectivamente (Centro de Hidrografia da Marinha, 2025). Essa oscilação controla a troca entre águas doces e salgadas, além de favorecer o transporte de sedimentos fluviais e marinhos no 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).

A descarga do rio Amazonas, com média anual de 175.000 m³/s e variação de 250.000 m³/s (período chuvoso) a 110.000 m³/s (seco), 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 para a deposição de sedimentos no 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 áreas do canal, enquanto outras áreas podem sofrer acúmulo de sedimentos mais finos (silte e argila). Essas variações na deposição sedimentar causam modificações na profundidade e na morfologia do canal, podendo afetar a navegação e exigindo dragagens periódicas para garantir a segurança da movimentação de embarcações (Fagundes et al., 2021). Durante o período chuvoso (dezembro – maio), a descarga sólida média de 1.200 mt/ano do rio Amazonas aumenta, o que altera a dinâmica do canal, resultando em um maior transporte e deposição de sedimentos. A elevação da descarga fluvial é acompanhada por intensas correntes de maré, alterando a geodinâmica do ambiente estuarino (Getirana; Paiva, 2013). Do outro lado, durante o seco (junho – setembro), a redução da descarga fluvial leva à redução de sedimentos transportados, produzindo uma maior estabilidade na formação dos bancos sedimentares. O ciclo sazonal é importante para entender as mudanças geomorfológicas que ocorrem na região e a adaptação das embarcações à navegabilidade do canal (Zanin et al., 2024).

No Canal Norte, ocorrem feições geomorfológicas, resultantes da interação dos processos oceanográficos e hidrológicos como o aporte sedimentar, maré, vazão, que fazem a reconfiguração através de transporte de material resultando em áreas de deposição e erosão de sedimentos. O canal norte fluvial apresenta morfologia dinâmica, com meandros, bancos de areia de 15 m de altura e ilhas fluviais (do Cará, Figura 1), além de variações de profundidade que podem se alterar sazonalmente. Segundo Rudorff, Melack e Bates (2014), os processos de deposição e erosão são amplificados pela combinação das altas taxas de descarga e marés semidiurnas, resultando em mudanças frequentes dos fundos estuarinos.

Estudos sobre a geomorfologia do estuário do rio Amazonas indicam que os canais, como o canal Norte, apresentam formas complexas, sendo moldadas pela interação entre a descarga do rio, e as correntes de maré (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. A navegação no Canal Norte é afetada pelas variações geomorfológicas e hidrodinâmicas do canal. A movimentação de grãos e outros produtos, como soja, é uma das principais atividades econômicas da região, sendo o Porto de Santana um dos principais pontos de exportação (Silva; Tobias, 2023). No entanto, o tráfego de embarcações enfrenta desafios devido à modificação da profundidade do canal, exigindo dragagens frequentes (Schaeffer et al., 2023).

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, tornando o monitoramento contínuo essencial para a segurança da navegação (Lewis; Rhoads, 2015). A variação sazonal dos depósitos sedimentares formados no canal exige que as operações portuárias e de transporte se ajustem constantemente às condições do ambiente estuarino, de modo que, afetam diretamente a mobilidade da navegação de carga na região.

Metodologia

A análise da evolução geomorfológica do Canal Norte foi realizada comparando dados batimétricos de dois períodos distintos: 2011 e 2024. Os dados de 2011 são provenientes de um levantamento hidrográfico (LH) multifeixe de alta densidade. Conforme descrito por Mendes, El Robrini e Moraes (2022) os dados de 2024 foram obtidos através da digitalização manual da Carta Náutica nº 204 (escala 1:80.000). Um polígono de limite (boundary) foi criado no QGIS para definir a área de estudo e garantir que as análises fossem restritas à área do canal. Para todos os dados, as profundidades foram normalizadas para o mesmo referencial vertical, o Nível de Redução (NR) ou zero hidrográfico, adotado pela DHN, garantindo a comparabilidade altimétrica (Tabela 1).

Tabela 1 – Metadados, parâmetros de padronização e resultados de validação dos modelos geoestatísticos de 2011 e 2024. A comparabilidade metodológica foi garantida pela padronização dos parâmetros marcados com asterisco (*)

Parâmetro	Dados 2011	Dados 2024
Fonte Original	Levantamento Hidrográfico Multifeixe	Digitalização da Carta Náutica Nº 204
Densidade de Pontos (n)	215.307 (Alta)	698 (Baixa)
Referencial Vertical*	Nível de Redução (NR) - DHN	Nível de Redução (NR) - DHN
Ref. Horizontal (SRC)*	SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S (EPSG:31982)	SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S (EPSG:31982)
Método de Interpolação*	Krigagem Ordinária	Krigagem Ordinária
Modelo de Variograma*	Gaussiano	Gaussiano
Parâmetros do Modelo	Nugget: 20 m ² , P. Sill: 50 m ² , Range: 5000 m	Nugget: 36,5 m ² , P. Sill: 68,3 m ² , Range: 3870 m
Parâmetros de Busca*	Raio: 22.500 m, 4 Setores, Mín 8, Máx 64	Raio: 22.500 m, 4 Setores, Mín 8, Máx 64
Geometria do Grid Final*	Idêntica (Padronizada)	Idêntica (Padronizada)
Incerteza (RMSE)	1,16 m	5,25 m

Fonte: Os autores

Reconhecendo que os conjuntos de dados provêm de fontes com metadados e precisões intrinsecamente distintas, um rigoroso processo de padronização foi adotado para garantir a validade da análise comparativa. A comparabilidade foi assegurada em três etapas: (1) A padronização vertical (NR) já mencionada;

(2) A padronização métrica geoespacial, onde ambos os conjuntos de dados (2011 e 2024) e o polígono de limite foram reprojatados para o sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S (EPSG:31982); (3) A padronização da geometria do grid, onde o grid de 2011 foi configurado para ter exatamente a mesma extensão, alinhamento e resolução do grid de 2024. Esta padronização UTM é o passo fundamental que transforma coordenadas de graus em metros, permitindo uma análise geoestatística uniforme e a correta aplicação de raios de busca métricos.

Grades batimétricas contínuas para 2011 e 2024 foram geradas utilizando o método de interpolação por krigagem ordinária no software Surfer. Para cada conjunto de dados, um modelo de variograma foi ajustado individualmente para refletir sua estrutura espacial: para o modelo de 2011, foi ajustado um modelo Gaussiano com Efeito Pepita (Nugget) de 20 m², Patamar Parcial (Partial Sill) de 50 m², e Alcance (Range) de 5000 m; para o modelo de 2024, foi ajustado um modelo Gaussiano com Efeito Pepita de 36,5 m², Patamar Parcial de 68,3 m², e Alcance de 3870 m. Os parâmetros de krigagem foram padronizados para ambos os modelos, utilizando um raio de busca de 22.500 m, dividido em 4 setores, com um mínimo de 8 e máximo de 64 pontos por estimativa (Plant; Holland; Puleo, 2002).

A performance e a confiabilidade de cada modelo foram rigorosamente avaliadas pela técnica de validação cruzada (leave-one-out cross-validation), quantificada pela Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). A análise morfodinâmica comparativa foi realizada através da geração dos produtos cartográficos principais, finalizados no QGIS: (1) Mapas de isóbatas individuais para 2011 e 2024; (2) Um mapa de diferença, calculado subtraindo-se o grid de 2011 do grid de 2024, para visualizar áreas de assoreamento (valores positivos) e erosão (valores negativos); e (3) Perfis batimétricos transversais comparativos; e (4) Mapas com o gradiente de profundidade (figura 2).

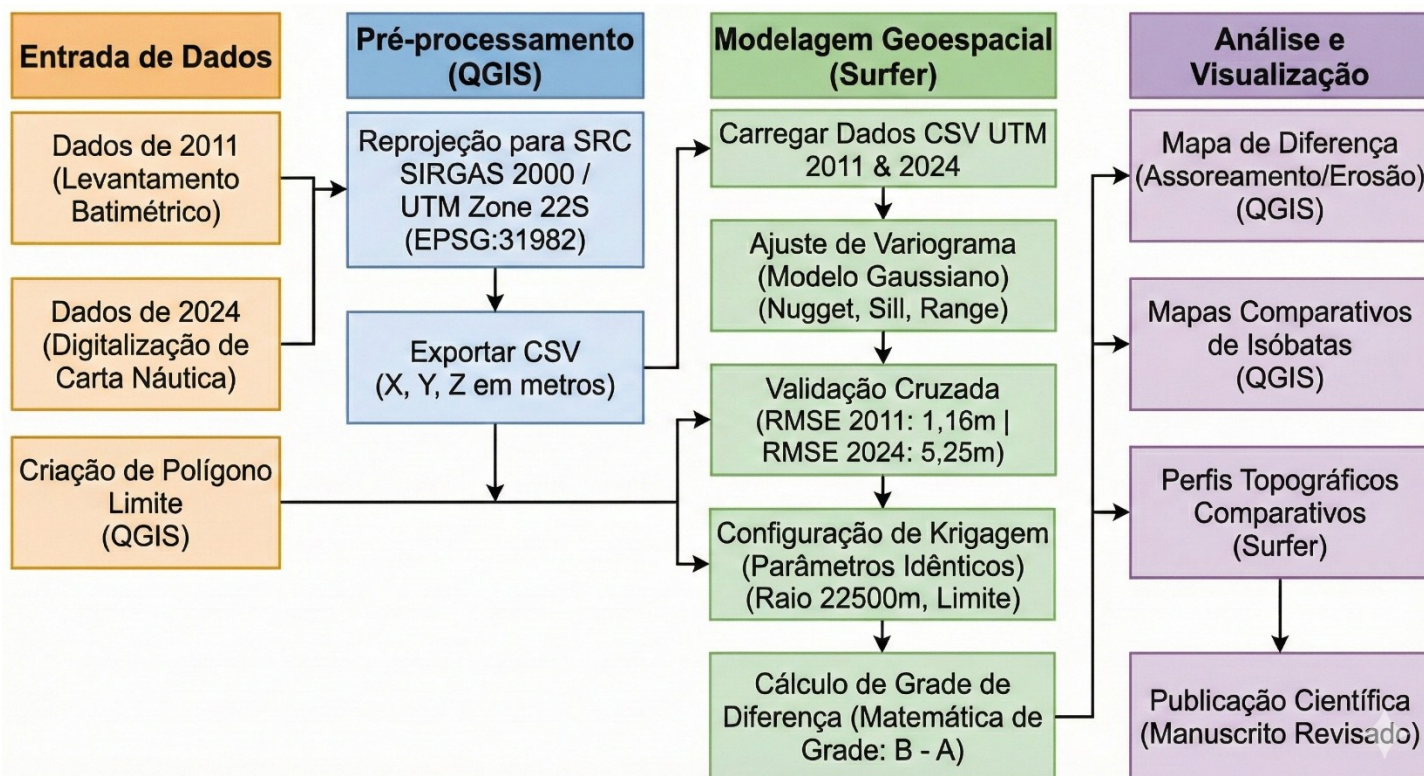


Figura 2 – Fluxograma metodológico do estudo. O fluxo demonstra as quatro etapas principais: (1) Entrada de Dados (Levantamento de 2011 e Carta Náutica de 2024); (2) Pré-processamento no QGIS, incluindo a padronização crucial de todos os dados para o SRC SIRGAS 2000 / UTM Zone 22S (EPSG:31982); (3) Modelagem Geoespacial e validação (Krigagem) no Surfer; e (4) Análise e Visualização dos resultados (mapas de diferença, perfis e isóbatas) Fonte: Os autores.

As profundidades utilizadas neste estudo foram referidas ao nível de redução, que é o referencial vertical adotado pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil para a elaboração das cartas náuticas oficiais, incluindo a Carta Náutica nº 204. O nível de redução, também denominado zero hidrográfico, corresponde, ao nível mais baixo da maré astronômica (sizígia) previsto para a região, sendo definido com base na análise estatística de longas séries de dados maregráficos (Borba, 2020).

Os dados batimétricos de 2011 e os valores extraídos da carta náutica 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 geomorfologia 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. Ainda, foram criadas visualizações de gradiente das superfícies interpoladas, permitindo uma análise

mais detalhada das mudanças geomorfológicas, destacando processos de erosão, deposição e migração de bancos arenosos.

Para a análise da migração batimétrica do canal Norte do rio Amazonas, foram realizados seis transversais distribuídos no canal (figura 3). 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.

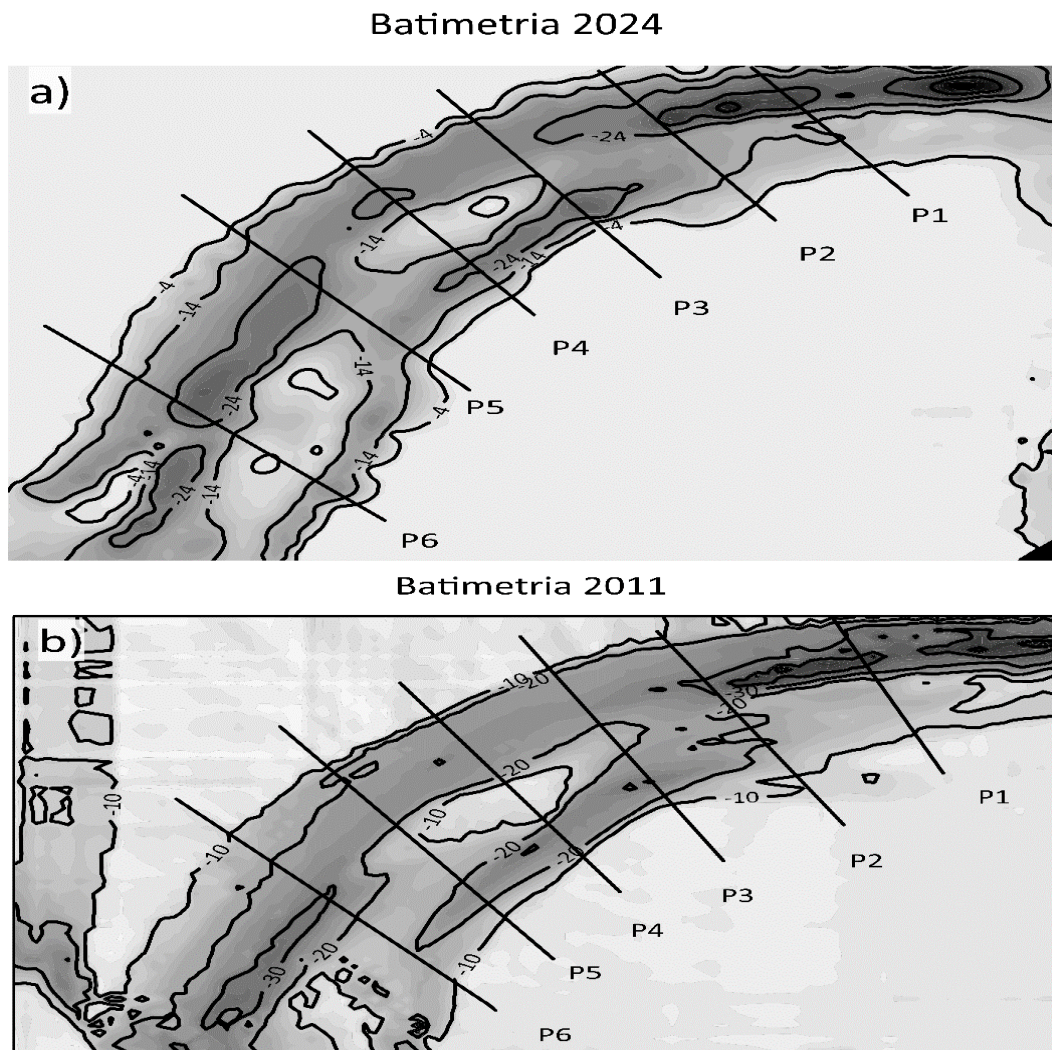


Figura 3 – Perfis batimétricos transversais do canal Norte do rio Amazonas. a) batimetria com os perfis de 2024; b) batimetria com os perfis de 2011. Fonte: Os autores

Cada perfil fornece uma representação da topografia subaquática do canal, facilitando a identificação de padrões de migração, erosão e sedimentação que caracterizam a dinâmica do sistema (Rademann et al., 2023). A análise dos perfis permite uma compreensão mais precisa das mudanças ocorridas nas feições de

subsuperfície e do leito fluvial, essas podem ser associadas a fenômenos como alterações no fluxo hidrodinâmico sob a influência de eventos extremos (Queiroz; Marinho, 2024).

De acordo com Santana et al. (2020), esse referencial tem como principal objetivo garantir a segurança da navegação, assegurando que as profundidades representadas nas cartas correspondam aos valores mínimos possíveis, mesmo durante as marés mais baixas. Assim, ao operar com dados referenciados ao nível de redução, garante-se que a profundidade real no local dificilmente será menor que a representada.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Características Batimétricas e Evolução Temporal

O primeiro resultado deste artigo é a avaliação da performance e da incerteza dos modelos batimétricos gerados. A validação cruzada rigorosa dos novos modelos geoestatísticos, agora em coordenadas métricas, revelou uma melhoria substancial na precisão e, crucialmente, quantificou a incerteza de cada fonte de dados. O modelo de 2011, baseado no levantamento multifeixe de alta densidade, demonstrou altíssima precisão, com uma Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de apenas 1,16 m. Em contraste, o modelo de 2024, derivado da digitalização da Carta Náutica, resultou em um RMSE maior, de 5,25 m. Esta diferença de incerteza (1,16 m vs. 5,25 m) não é uma falha de modelagem, mas sim um resultado quantificável da diferença de precisão entre um levantamento direto (2011) e uma fonte cartográfica generalizada (2024). As figuras 4 e 5 apresentam os mapas batimétricos de 2011 e 2024, revelando alterações significativas na morfologia do Canal Norte do rio Amazonas. Em 2011, profundidades máximas de até 50 m foram observadas na região próxima à saída do canal de navegação (Figura 4).

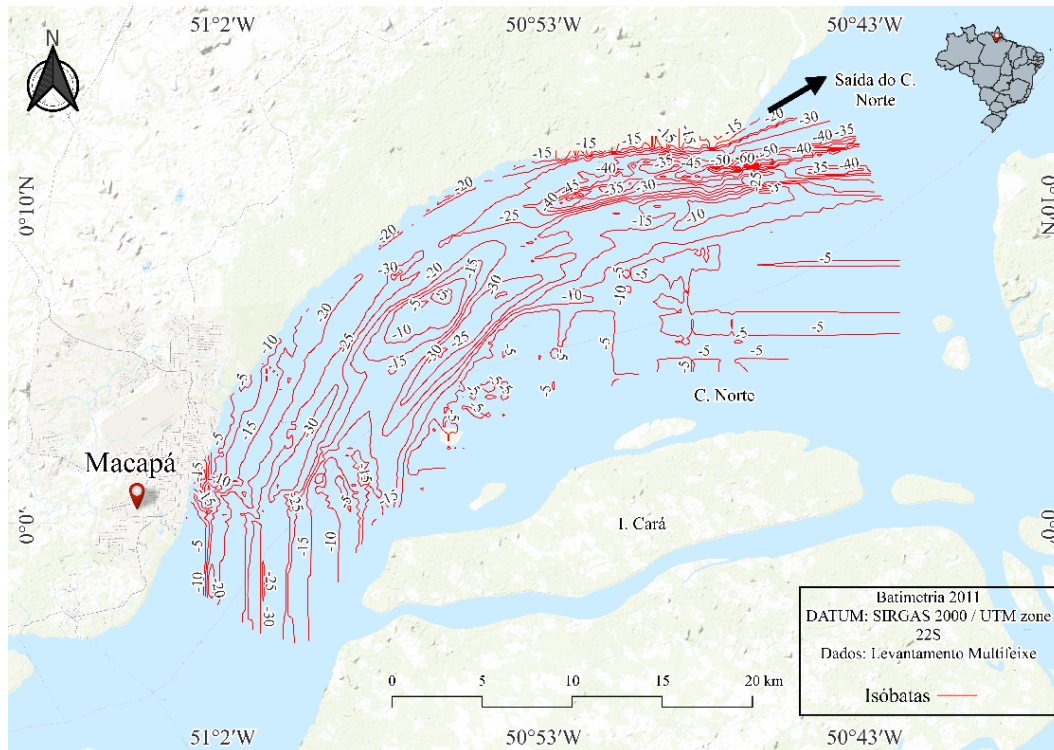


Figura 4 – Isóbatas extraídas da batimetria de 2011 LH (Levantamento Hidrográfico) em XYZ. Fonte: Os autores.

Os bancos arenosos separando os canais principal e secundário apresentaram alturas entre 10 e 15 m, caracterizando a compartimentação morfológica da área. Na margem oeste (próxima a Macapá), a profundidade aumentou abruptamente de 0 m na linha de costa para até 24 m no canal principal.

A análise temporal mostra que a profundidade média do canal de navegação passou 26 m (2011) para 22 m (2024), indicando tendência de assoreamento. Esse processo está em consonância com as observações de Herrero et al. (2018), que associam a diminuição da profundidade média a um contínuo aporte sedimentar influenciado pelas marés e descarga fluvial. Em 2024, a profundidade máxima foi de 45 m, enquanto os bancos arenosos apresentaram extensão entre 15 e 20 m, evidenciando a migração e reorganização das feições sedimentares (Figura 5).

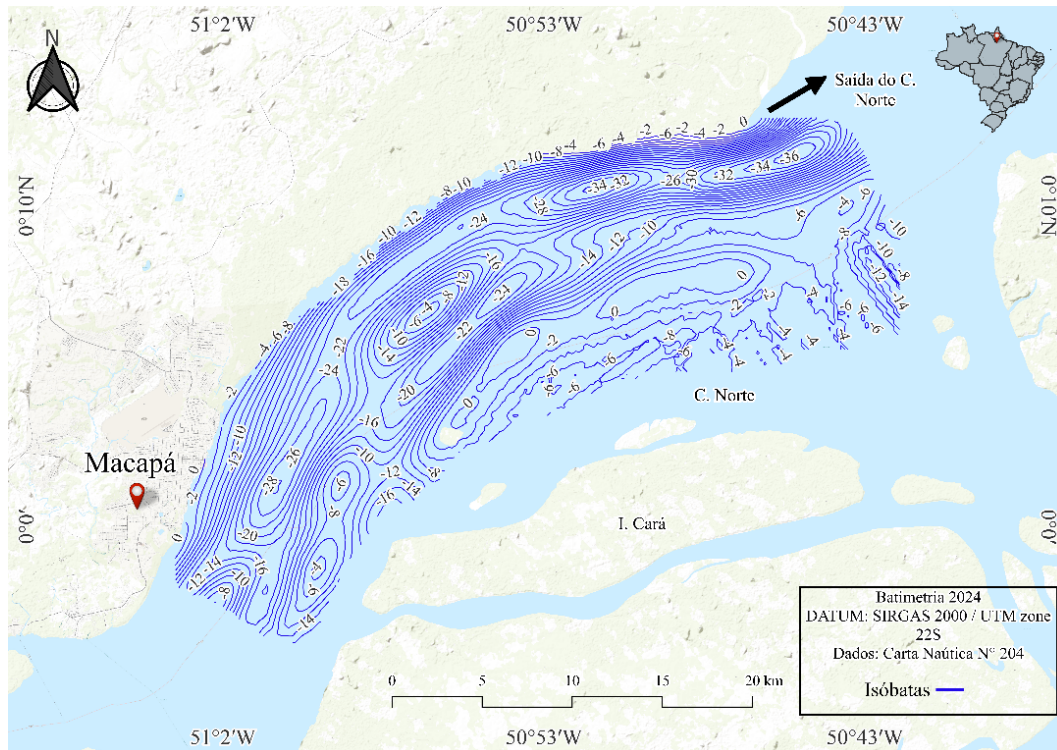


Figura 5 – Isóbatas extraídas da batimetria de 2024 gerada a partir da carta náutica 204. Fonte: Os autores.

Regime de Marés e Influência Hidrodinâmica

A série histórica de maré (Figura 6) demonstra um regime semidiurno de macromaré, com amplitude superior a 5 m, e média de 2,79 m para o período 2010–2022. Essa amplitude significativa atua como força moduladora sobre o transporte sedimentar, promovendo alternadamente a ressuspensão e a deposição. De acordo com Sukhodolov et al. (2017) e Khojasteh et al. (2021), ambientes sujeitos a grandes amplitudes de maré tendem a apresentar redistribuição intensa de sedimentos, o que pode gerar a migração de bancos e modificar a profundidade do canal principal.

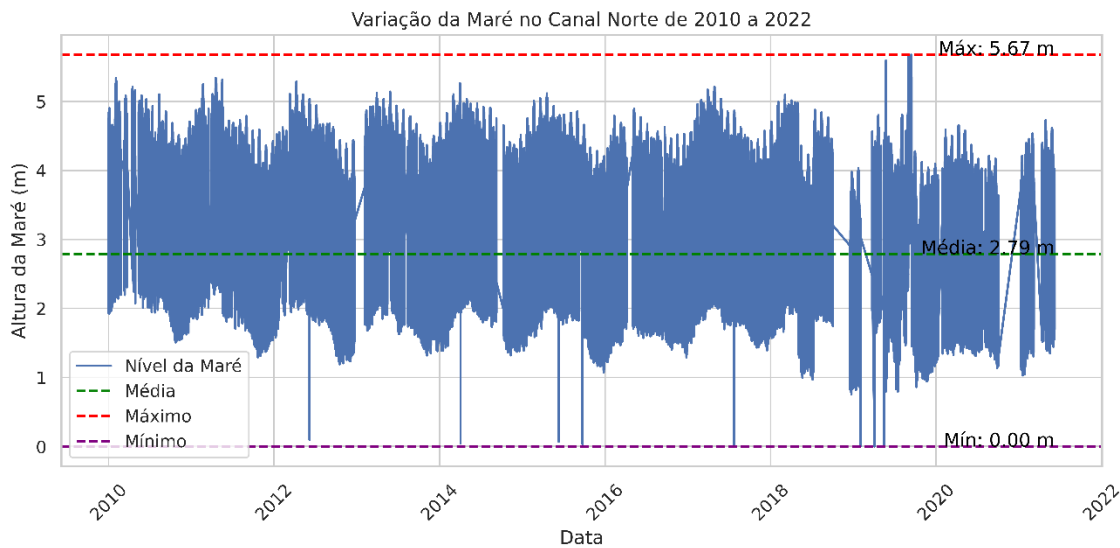


Figura 6 – Série histórica de maré no período de 2010 a 2022, da estação de Macapá com valores de máximo, mínimo e média para a altura de maré. Fonte: Os autores.

Representação e Compartimentação Morfológica

A modelagem da batimetria de 2024 evidencia uma clara compartimentação entre o canal principal (média de 26 m) e um canal secundário (profundidades até 6 m) localizado a leste, próximo à ilha do Cará (Figura 7). Essa diferenciação morfológica pode ser explicada por variações no regime de energia hidrodinâmica, o que é comum em canais de maré com múltiplas bifurcações (Finotello et al., 2020).

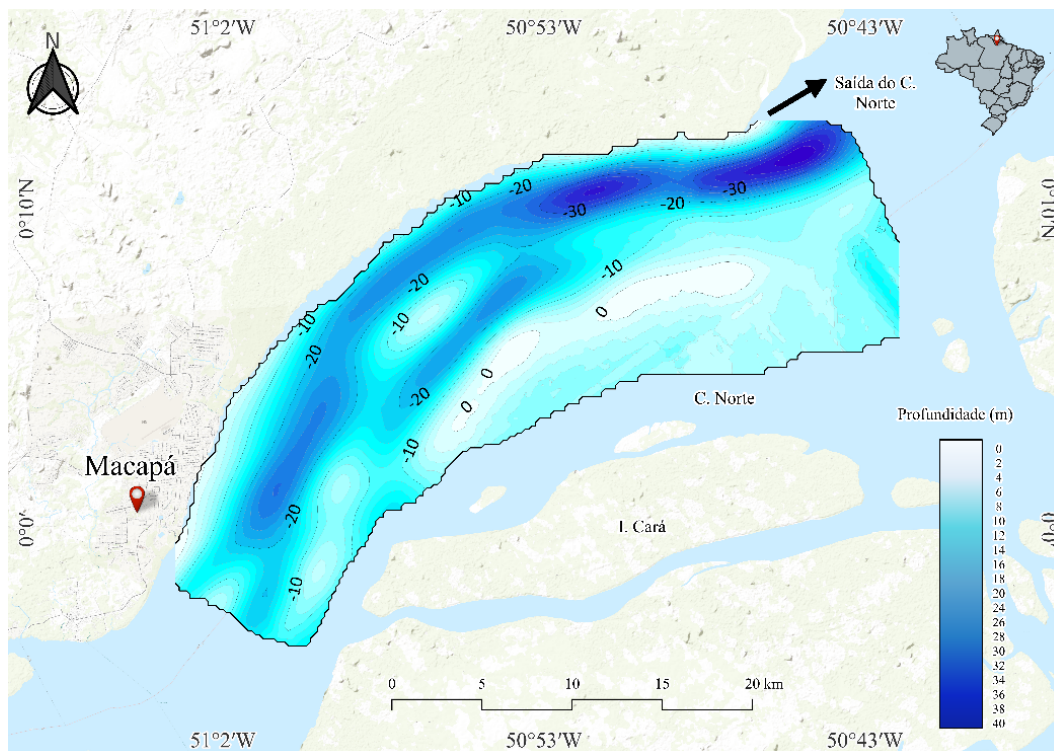


Figura 7 – Mapa com gradiente do ano de 2024 gerado a partir das curvas batimétricas. Fonte: Os autores.

Em contraste, o modelo de 2011 apresenta feições mais homogêneas, com destaque para a presença de uma duna subaquosa central (Figura 8), indicativa de uma fase anterior, de maior equilíbrio sedimentar ou menor energia. De acordo com Barros, Rollnic e Watanabe (2017), a homogeneidade do leito pode refletir condições hidrodinâmicas mais estáveis ou menor intensidade de processos erosivos. Pesquisas realizadas na Baía de Macapá destacam que as variações geomorfológicas do fundo são influenciadas pela constante atuação dos processos hidrodinâmicos e sedimentares, corroborando a relação entre feições superficiais e estruturas de subsuperfície (Almeida et al., 2024; Herrero et al., 2016).

14

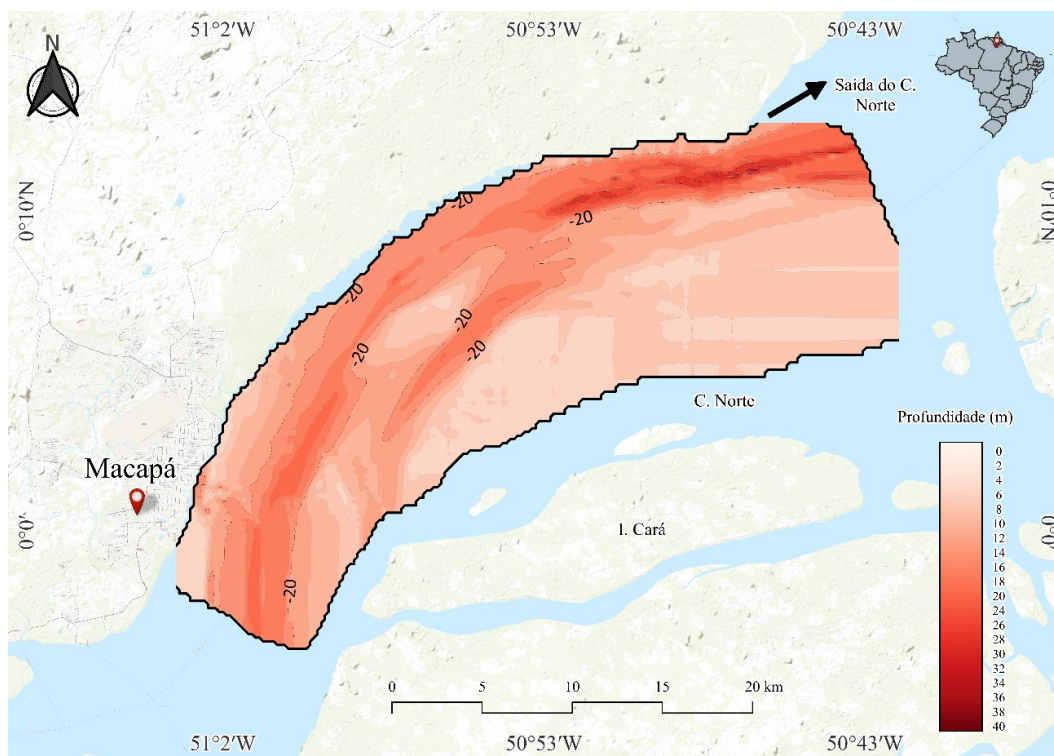


Figura 8 – Mapa com o gradiente do ano de 2011 gerado a partir de isóbatas. Fonte: Os autores.

A ocorrência de dunas subaquosas está associada à dinâmica sedimentar e às condições hidrodinâmicas. A interação entre a maré e o aporte fluvial sazonal contribui para a redistribuição sedimentar, favorecendo a formação de bancos móveis e alterações no traçado dos canais secundários (Ahmed; Constantine; Dunne, 2019).

Migração do Canal e Processos Erosivo-Deposicionais

A comparação entre as grids de 2011 e 2024 (Figura 9) mostra a migração do canal para leste-nordeste, com erosão na margem esquerda e deposição na margem direita. Essa dinâmica é coerente com padrões fluviais observados em grandes rios tropicais, onde a interação entre descarga fluvial, marés e sedimentação gera deslocamentos laterais dos canais (Fryirs, 2016; Franzinelli, 2011).

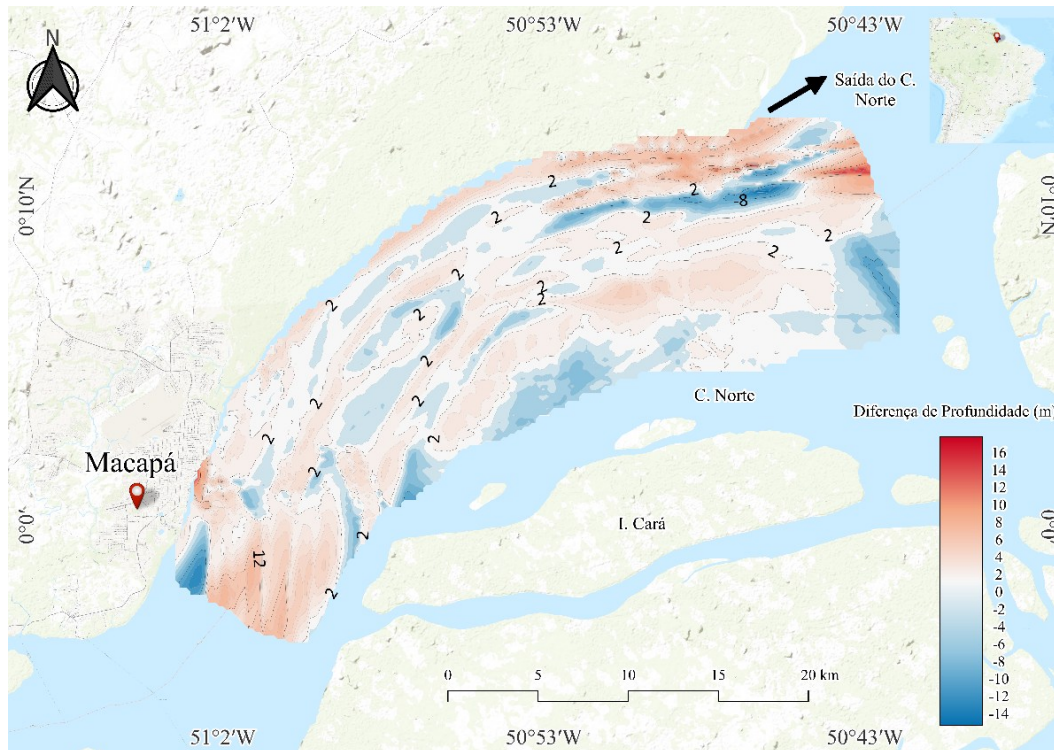


Figura 9 – Mapa de diferença batimétrica do Canal Norte (2011–2024). O mapa foi gerado pela subtração do grid de 2011 do grid de 2024 (Grid_2024 - Grid_2011). As cores quentes (vermelho/laranja) indicam valores positivos, representando áreas de assoreamento (diminuição da profundidade). As cores frias (azul) indicam valores negativos, representando áreas de erosão (aumento da profundidade). O valor 0 (branco) indica áreas de mínima ou nenhuma mudança. Fonte: Os autores.

Na região da saída do canal, a profundidade aumentou de 50 m para 56 m entre os anos, sugerindo erosão localizada. Marinho et al. (2022) relacionam esse tipo de aprofundamento à convergência de fluxos e à ação combinada de correntes fluviais e marítimas. Estudos sobre a confluência dos rios Negro e Solimões demonstram que alterações nas características do fluxo, juntamente com a movimentação da carga de fundo, podem provocar transformações geomorfológicas no canal, incluindo formação de cavidades similares a poços e deposição sob a forma de barras (Jesus et al., 2024).

Análise dos Perfis Batimétricos Transversais

Os perfis transversais (Figura 10) revelam mudanças expressivas na largura e profundidade do canal. Nos perfis 1 e 2, houve aumento da profundidade e expansão lateral, indicando processos simultâneos de erosão do leito e margens. Perfis 4 a 6 mostram reduções de profundidade e aumento da largura, compatíveis com sedimentação no fundo e erosão lateral, comportamento frequentemente observado em canais em transição morfológica (Silva; Rabelo; Nunes, 2024; Sulaiman et al., 2021).

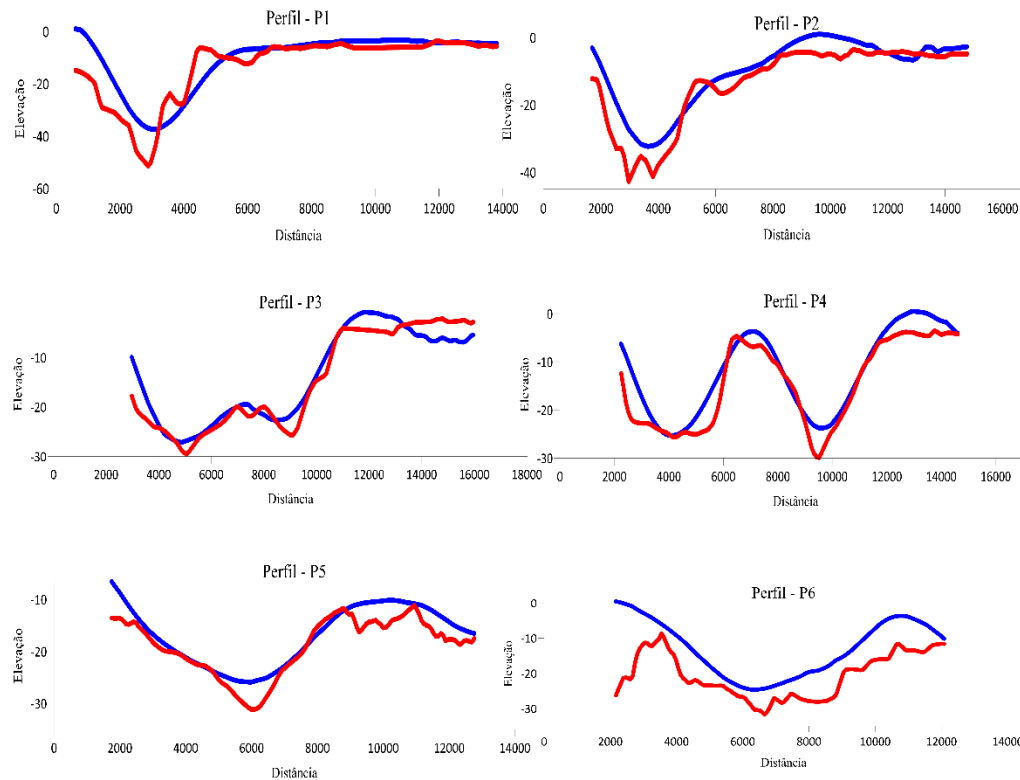


Figura 10 – Perfis batimétricos comparativos (2011 - vermelho vs. 2024 – azul) no Canal Norte do Rio Amazonas. Os gráficos mostram a variação da profundidade (eixo vertical, em m) em função da distância horizontal (eixo horizontal, em m) para os perfis batimétricos de 1 a 6.

O perfil 3 manteve profundidade estável, mas ampliou sua largura de 500 m para 2000 m, sugerindo deposição vertical compensando o aprofundamento (figura 10). Esse tipo de redistribuição é típico em sistemas fluviais sob influência mista fluvial-marinha (Gugliotta et al., 2018).

Esses resultados revelam um sistema dinâmico sujeito a ajustes morfológicos frequentes. A presença de canais secundários, barras e dunas submersas reforça o caráter multicanal do setor, compatível com ambientes deltáicos de baixa latitude dominados por maré (Nittrouer et al., 2021).

Implicações para a Navegação e Gestão Portuária

A variabilidade batimétrica e sedimentar do Canal Norte representa um desafio para a logística regional. A redução de profundidade em alguns trechos pode comprometer a segurança da navegação, exigindo dragagens frequentes, com altos custos e impactos ambientais (Latrubesse et al., 2017).

Como alternativa, a navegação sobre lama fluida tem sido empregada em ambientes costeiros portuários, como em Roterdã, permitindo a operação segura mesmo com calados acima dos valores tradicionais (Winterwerp; Wang, 2013; Mcanally; Mehta, 2002). A adoção de calado dinâmico (Draught Management System), já implementada em portos europeus, pode ser uma estratégia viável na região amazônica (Xue et al., 2019).

De modo que a integração entre sistemas de monitoramento batimétrico, modelagem numérica e estratégias operacionais adaptativas pode promover eficiência e segurança na gestão hidroviária amazônica (Ávila; Gallo, 2021).

A dificuldade em gerar um modelo de alta precisão, como demonstrado neste estudo, serve como um forte indicio da necessidade de se investir em monitoramento batimétrico de maior frequência e densidade, visando promover a eficiência e a segurança na complexa gestão hidroviária amazônica.

IV. CONCLUSÕES

A análise da evolução geomorfológica do Canal Norte do Rio Amazonas, entre 2011 e 2024, evidenciou tendências qualitativas claras de uma dinâmica morfossedimentar ativa. O estudo identificou um processo de assoreamento geral, com redução da profundidade média do canal de 26 m para 22 m e uma migração lateral consistente no sentido leste-nordeste.

Uma análise da distância entre as isóbatas de 2011 e 2024 sugere um deslocamento aparente que, em alguns trechos, é da ordem de 50 m ao longo dos 13 anos. Contudo, a principal contribuição metodológica deste trabalho foi a aplicação de um fluxo de trabalho geoestatístico robusto, em coordenadas métricas UTM, que permitiu não apenas modelar as mudanças, mas também quantificar a incerteza diferencial das fontes de dados. A validação revelou alta precisão para o modelo de 2011 (RMSE de 1,16 m) e uma incerteza moderada e conhecida para o modelo de 2024 (RMSE de 5,25 m).

Deste modo, as análises de assoreamento e migração são apresentadas com um nível de confiança estatística conhecido. A constatação desta incerteza quantificada reforça a conclusão de que o monitoramento batimétrico contínuo é uma ferramenta de gestão indispensável para a região-

A segurança da navegação e a otimização de estratégias onerosas, como a dragagem, não podem depender de representações estáticas do fundo do canal. A compreensão de que os modelos batimétricos são uma aproximação com erro quantificável é essencial para o planejamento de rotas seguras, para a manutenção do acesso ao complexo portuário de Santana e para o desenvolvimento de políticas sustentáveis de gestão fluvial.

Diante deste cenário, a adoção de soluções tecnológicas inovadoras, como a navegação sobre lama fluida e, principalmente, o uso de calado dinâmico, representa a alternativa mais promissora para lidar com a variabilidade morfológica do canal. Tais estratégias, que incorporam dados em tempo real para gerenciar o risco, são a resposta direta ao desafio imposto pela alta incerteza. Assim, o presente estudo destaca o papel

estratégico da análise batimétrica não apenas para compreender a dinâmica de grandes rios, mas para quantificar as incertezas inerentes à sua representação, formulando diretrizes técnicas mais realistas e seguras para a gestão do transporte hidroviário.

V. 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.
- 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.
- BORBA, C. H. DE O. Compatibilização do Datum Vertical das Cartas Náuticas e Cartas Terrestres. *Anais Hidrográficos*, v. XIII, 2020.
- 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.
- BRODIE, K. L. et al. Simultaneous Mapping of Coastal Topography and Bathymetry From a Lightweight Multicamera UAS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 57, n. 9, p. 6844–6864, set. 2019.
- CENTRO DE HIDROGRAFIA DA MARINHA. Tábuas de Maré | Centro de Hidrografia da Marinha. Disponível em: <<https://www.marinha.mil.br/chm/tabuas-de-mare>>. 2025
- 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.
- DOUCETTE, P. et al. Error estimation for gridded bathymetry. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*, p. 1–20, 1 out. 2015.
- 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.

FINOTELLO, A. et al. Remotely-sensed planform morphologies reveal fluvial and tidal nature of meandering channels. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, 9 jan. 2020.

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.

FRYIRS, K. A. River sensitivity: a lost foundation concept in fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 42, n. 1, p. 55–70, 22 abr. 2016.

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.

GUGLIOTTA, M. et al. Sediment distribution and depositional processes along the fluvial to marine transition zone of the Mekong River delta, Vietnam. *Sedimentology*, v. 66, n. 1, p. 146–164, 9 ago. 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 NPegro, AMAZONAS. *Revista Geonorte*, v. 15, n. 48, 9 fev. 2024.

JO, H.; PYRCZ, M. J. Automatic Semivariogram Modeling by Convolutional Neural Network. *Mathematical Geosciences*, v. 54, n. 1, p. 177–205, 12 jul. 2021.

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.

- 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.
- MENDES, C. A. 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.
- 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.
- PLANT, N. G.; HOLLAND, K. TODD.; PULEO, J. A. Analysis of the scale of errors in nearshore bathymetric data. *Marine Geology*, v. 191, n. 1-2, p. 71–86, nov. 2002.
- QUEIROZ, M. S. DE; MARINHO, R. R. Rio Congo: Análise do Fluxo de Sedimentos Suspensos em uRam Megassistema Multicanal na África Central. *RAEGA - O Espaço Geográfico em Análise*, v. 61, p. 153–172, 18 dez. 2024.
- RADEMANN, L. K. et al. Avaliação da Dinâmica de Bancos de Areia Com Imagens De Alta Resolução No Rio Areal do Limeira, Sul do Brasil. *RAEGA - O Espaço Geográfico Em Análise*, v. 57, p. 3–3, 12 set. 2023.
- 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.
- SANTANA, F. R. et al. Cartas Náuticas com Modelos SEP: Evolução Histórica, e Perspectivas para Hidrografia Brasileira. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 72, p. 1299–1328, 30 dez. 2020.
- 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.
- SULAIMAN, Z. A. et al. The Influence of Tides on Coastal Plain Channel Geomorphology: Altamaha River, Georgia, USA. *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, v. 126, n. 7, 13 jun. 2021.

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.

XUE, J. et al. Multi-attribute decision-making method for prioritizing maritime traffic safety influencing factors of autonomous ships' maneuvering decisions using grey and fuzzy theories. *Safety Science*, v. 120, p. 323–340, 1 dez. 2019.

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