



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO Nº 658

**MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SENSORIAMENTO
REMOTO EM ESTUÁRIOS AMAZÔNICOS: ANÁLISE DA
VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE SEDIMENTOS**

Tese apresentada por:

MATHEUS DIAS DE AVIZ

Orientador: Prof. Dr. Laurent Polidori (UFPA)

**BELÉM - PARÁ
2024**

**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)**

A957m Aviz, Matehus Dias de.
Monitoramento hidrológico e sensoriamento remoto em estuários
amazônicos: análise da variação espacial e temporal desedimentos /
Matehus Dias de Aviz. — 2024.
xiv, 50 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Larent Polidori
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de
Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologiae Geoquímica,
Belém, 2024.

1. semivariância. 2. ANOVA. 3. rio Pará. 4. sedimento
suspenso. 5. amostragem. I. Título.

CDD 621.3678



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

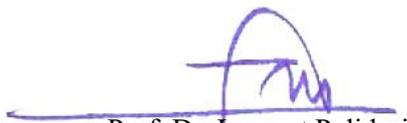
MONITORAMENTO HIDROLÓGICO E SENSORIAMENTO REMOTO EM ESTUÁRIOS AMAZÔNICOS: ANÁLISE DA VARIAÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DE SEDIMENTOS

Dissertação apresentada por
MATHEUS DIAS DE AVIZ

**Como requisito parcial à obtenção de Grau de Mestre em Ciências na Área de GEOLOGIA e
Linha de Pesquisa GEOLOGIA MARINHA E COSTEIRA.**

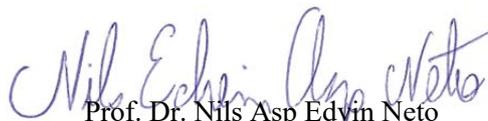
Data de Aprovação: 13 / 10 / 2024

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Laurent Polidori
(Orientador – UFPA)

Rogério Ribeiro Marinho
Prof. Dr. Rogério Ribeiro Marinho
(Membro – UFAM)



Prof. Dr. Nils Asp Edvin Neto
(Membro – MPEG)

Dedico este trabalho aos meus pais e minhas avós, pelo apoio incondicional. Além dos meus amigos de quatro patas Teemo, Chihiro e Totoro, por todo amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço prioritariamente a Deus, por todas as vitórias conquistadas e por ter me dado forças para continuar diante de cada obstáculo surgido, até o presente momento.

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

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Laurent Polidori, por ter contribuído com meu processo de aprendizagem, compartilhado seus conhecimentos acadêmicos, pela dedicação e paciência. Bem como ao Prof. Dr. Cristiano Mendel pelo apoio de concepção e apoio institucional dado a este trabalho.

As Professoras Dr.^a Silvana Veloso e Dr.^a Maria de Lourdes pelo apoio e suporte.

Aos técnicos do Observatório Nacional, em especial aos técnicos do Observatório Geomagnético de Tatuoca, obrigado pela parceria nos trabalhos de campo e laboratoriais, momentos de descontração e companheirismo.

Aos companheiros de análise laboratorial do Laboratório de Química Ambiental e do Laboratório de Ciências Ambientais.

Aos meus familiares, meu paai Mauro Aviz, minha mãe Karla Dias, minhas avós Célia Aviz e Estanila Rodrigues e aos meus irmãos Manuely Aviz, Ana Dias e Gustavo Dias.

Às amigas Luciane Fiel e Marina Sousa, por todo suporte, apoio e suporte.

Ao amigo que fiz durante o mestrado Julián Pérez, agradeço pelos bons momentos compartilhados.

A todos que contribuíram de maneira direta e/ou indiretamente para a elaboração e conclusão deste trabalho.

“Nós só podemos ver um pouco do futuro, mas o suficiente para perceber que há muito a fazer.”

(Alan Turing)

RESUMO

O monitoramento dos ambientes aquáticos, de forma geral, exige alto investimento técnico-científico e financeiro para sua realização. A existência de redes dedicadas ao monitoramento é necessária para garantir a continuidade espacial e temporal. No entanto, a qualidade dos dados também depende da padronização desde a coleta de amostras até a análise dos parâmetros. Estudos mostram que o maior desafio no Brasil é a escassez de recursos financeiros, resultando em descontinuidade de dados. A cooperação interinstitucional é essencial para superar esses obstáculos e promover monitoramento de longo prazo. Nesse contexto, o sensoriamento remoto surge como uma ferramenta auxiliar fundamental, complementando o monitoramento tradicional ao fornecer dados sobre diversas variáveis aquáticas, como altura, temperatura e concentração de componentes opticamente ativos, sobretudo em condições de restrição de recursos financeiros ou problemas de governança. As variações espaço-temporais da cor da água em um estuário são afetadas por diversos componentes físicos e hidrológicos, o que torna seu entendimento complexo. Neste estudo, buscamos compreender a variação espaço-temporal da cor da água, para fins de amostragem, em um estuário da Costa Amazônica. A área de estudo para esse estudo, situa-se no estuário formado pela confluência dos rios Pará (Tocantins, 5% do rio Amazonas), Guamá e Acará, próximo à ilha de Tatuoca, a 10 km de Belém. A região é influenciada pelas baías de Marajó e Santo Antônio, que possuem morfologias de fundo distintas, afetando as correntes locais. O clima apresenta duas estações: chuvosa (dezembro a maio) e menos chuvosa (junho a novembro). As marés são meso e macro semidiurnas, com amplitudes de até 3,7 m. Para atingir nossos objetivos, aplicamos ferramentas geoestatísticas e estatísticas para testar a variabilidade espaço-temporal da cor da água, com base em dados de reflectância multisensor, Landsat-8/9 e Sentinel-2 na banda do vermelho. A variação espacial mostrou distâncias superiores a $48 \text{ m} \pm 4,26$ na maré alta e $44 \text{ m} \pm 7,62$ na maré baixa. Para a variação temporal, verificamos que as variações mensais são significativas de acordo com a sazonalidade e apresentam a mesma variação nas diferentes fases da maré (alta, baixa e equinociais). Portanto, a cor da água na região da Ilha de Tatuoca apresenta variação espaço-temporal geoestatística e estatisticamente significativa. As distâncias e a frequência temporal da amostragem devem ser ajustadas de acordo com as marés e a sazonalidade para garantir que os dados sejam amostrados de acordo com as variações do ambiente.

Palavras-chave: semivariância; ANOVA; rio Pará; sedimento suspenso; amostragem.

ABSTRACT

Monitoring aquatic environments generally requires high technical, scientific and financial investment. The existence of dedicated monitoring networks is necessary to guarantee spatial and temporal continuity. However, data quality also depends on standardization, from sample collection to parameter analysis. Studies show that the biggest challenge in Brazil is the scarcity of financial resources, resulting in data discontinuity. Inter-institutional cooperation is essential to overcome these obstacles and promote long-term monitoring. In this context, remote sensing has emerged as a fundamental auxiliary tool, complementing traditional monitoring by providing data on various aquatic variables, such as height, temperature and concentration of optically active components, especially in conditions of restricted financial resources or governance problems. Spatio-temporal variations in water color in an estuary are affected by various physical and hydrological components, which makes understanding them complex. In this study, we sought to understand the spatio-temporal variation of water color, for sampling purposes, in an estuary on the Amazon Coast. The study area for this study is located in the estuary formed by the confluence of the Pará (Tocantins, 5% of the Amazon River), Guamá and Acará rivers, near the island of Tatuoca, 10 km from Belém. The region is influenced by the Marajó and Santo Antônio bays, which have different bottom morphologies, affecting local currents. The climate has two seasons: rainy (December to May) and less rainy (June to November). The tides are meso and macro semidiurnal, with amplitudes of up to 3.7m. To achieve our objectives, we applied geostatistical and statistical tools to test the spatio-temporal variability of water color, based on multisensor reflectance data, Landsat-8/9 and Sentinel-2 in the red band. The spatial variation showed distances of more than 48 m \pm 4.26 at high tide and 44 m \pm 7.62 at low tide. For the temporal variation, we found that the monthly variations are significant according to seasonality and show the same variation in the different phases of the tide (high, low and equinoctial). Therefore, the color of the water in the Tatuoca Island region shows geostatistical and statistically significant spatio-temporal variation. The distances and temporal frequency of sampling should be adjusted according to the tides and seasonality to ensure that the data is sampled according to the variations in the environment.

Keywords: semivariance; ANOVA; Pará river; suspended sediment; sampling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização da área de estudo.....	4
Figura 2 – Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d’água) e sensor orbital.....	14
Figura 3 – Precipitação pluviométrica no município de Belém, com o total mensal em 2023 e a média mensal dos últimos 30 anos (1983 a 2023). Dados da estação INMET estação 82191.....	16
Figura 4 – Carta de unidades geológicas da região de Belém.....	17
Figura 5 – Resumo metodológico.....	20
Figura 6 – Correlogramas pelo índice de Moran.....	25
Figura 7 – Correlogramas angulares.....	27
Figura 8 – Gráficos de semivariância anisotrópica.	28
Figura 9 – Reflectância das bandas Azul, Verde e Vermelha pela mediana por mês em diferentes marés.....	30
Figura 10 – Concentrações de SSSC e TSS em mg/L, mediana por mês em diferentes marés.	32
Figura 11 – Agrupamento ANOVA.	33
Figura 12 – Estimativas de SSSC e TSS representadas pela mediana por ano.	34
Figura 13 – Zonas de turbidez de acordo com a maré.....	40

LISTA DE SIGLAS

ρ_{BLUE} – Reflectância da banda azul

ρ_{GREEN} – Reflectância da banda verde

ρ_{NIR} – Reflectância da banda vermelha

ρ_{RED} – Reflectância da banda infravermelho próximo

ANA – Agência Nacional de Águas

ANOVA – Analysis of Variance

CDOM – Matéria orgânica dissolvida cromófora

ESA – European Space Agency

GEE – Google Earth Engine

GOOS – Global Ocean Observing System

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas

mg/L – miligramas por litro

MODIS - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

NASA – National Aeronautics and Space Administration

NE - Noroeste

PA - Pará

RGB – Red, Green, Blue

SS – Sedimentos em suspensão

SSSC – Concentração de Sólidos em suspensão em superfície

SW - Sudoeste

TSS – Sedimentos suspensos totais

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
1 INTRODUÇÃO	1
2 ÁREA DE ESTUDO	4
3 PROBLEMÁTICA	6
4 OBJETIVOS	7
4.1 OBJETIVO GERAL.....	7
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	7
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	8
5.1 OBSERVATÓRIOS DA ÁGUA.....	8
5.2 ESTUÁRIOS	9
5.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS E HIDROGRÁFICAS	11
5.4 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DA ÁGUA	13
5.5 CONTEXTO GEOLÓGICO E CLIMÁTICO.....	15
6 MÉTODOS E MATERIAIS	19
6.1 AQUISIÇÃO DE IMAGEM	21
6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS	21
6.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS E AQUISIÇÃO DE DADOS DE REFLECTÂNCIA	22
6.4 GEOESTATÍSTICA E ESTATÍSTICA.....	22
6.4.1 Geoestatística	22
6.4.2 Estatística	23

6.5 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA.....	24
7 RESULTADOS	25
7.1 ANÁLISE ESPACIAL.....	25
7.1.1 Autocorrelação	25
7.1.2 Anisotropia	26
7.1.3 Semivariância	28
7.2 ANÁLISE TEMPORAL.....	29
7.2.1 O comportamento da reflectância relacionado às variáveis ambientais	30
7.2.2 O comportamento da reflectância ao longo de um período de dez anos	33
7.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA.....	35
7.3.1 Distribuição dos Estudos por Ano (2014-2023):	35
7.3.2 Principais Periódicos e Autores:	35
7.3.3 Análise das Palavras-Chave:	35
7.3.4 Casos de Sucesso e Desafios:	36
7.3.5 Tendências Emergentes:	36
8 DISCUSSÃO	37
8.1 OBSERVATÓRIOS E MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	38
8.2 VARIAÇÃO ESPACIAL.....	38
8.2.1 As alterações na vazão fluvial	39
8.2.2 Dinâmica das marés e seu impacto na cor da água	39
8.2.3 Implicações das marés nas métricas de variação espaciais	42
8.3 VARIAÇÃO TEMPORAL.....	43
8.3.1 Efeitos sazonais na reflectância	43
8.3.2 Implicações dos sedimentos na reflectância	44
8.3.3 Implicações dos fenômenos climáticos ao longo da década na reflectância	44
8.3.4 Implicações estatísticas para métricas temporais	45
9 CONCLUSÃO	46

REFERÊNCIAS.....47

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento dos ambientes aquáticos, de forma geral, exige alto investimento técnico-científico e financeiro para sua realização. Então, a existência de rede dedicadas ao acompanhamento desses ambientes é necessária para a continuidade espacial e temporal de observação seja executado. Além disso, as questões de qualidade dos dados, é influenciada pela padronização desde coleta de amostras até as análises dos parâmetros de interesse (Franz *et al.* 2021).

Estudos mostram que o maior problema do monitoramento aquático no Brasil é a barreira de recursos financeiros (Sousa Júnior *et al.* 2016). Ou seja, a poucos recursos direcionados ao monitoramento hídrico e a falta de coordenação de distribuição de recursos financeiros para projetos que estejam direcionados ao monitoramento desses ambientes. Isto demonstra que existe projetos com mesmo intuito no mesmo lugar e muito semelhantes entre si. Logo, a existe uma falta de eficiência na execução desses projetos, o que leva a projetos definidos em curto espaço de tempo, o que gera descontinuidade de dados. Então, a cooperação interinstitucional é parte fundamental para a realização de projetos de monitoramento mais duradouros (Miranda & Reynard 2020). Isso tudo demonstra uma problemática maior a fragmentação de governança nos assuntos de monitoramento hidrológico (Du Plessis 2023).

O monitoramento hidrológico tem diversas barreiras para sua completude de realização, passando por problemas inerentes a sua governança. O sensoriamento remoto, como ferramenta auxiliar de monitoramento, como exemplo as imagens orbitais, é útil para integrar e preencher dados não observados pelo monitoramento hídrico de campo (Yang *et al.* 2022). Então, o sensoriamento remoto permite a avaliação e o monitoramento eficazes de parâmetros da qualidade da água em escalas espaciais e temporais amplas, sendo uma alternativa viável frente às limitações financeiras e logísticas dos métodos convencionais de coleta em campo em condições de escassas de recursos financeiros ou onde há problemas de governança relacionado a isto (Adjovu *et al.* 2023). Essa ferramenta, dentro desse escopo, nos direciona a entender a dinâmica e comportamento de diversas variáveis aquáticas, desde a sua altura, temperatura, movimento de massa d'água e componentes opticamente ativos, como sedimentos, clorofila e outros.

O monitoramento hidrológico por meio do sensoriamento remoto, está relacionado as propriedades ópticas da água inerente à sua composição. Isto possibilita a pesquisa e o

monitoramento dos ambientes aquáticos. No sensoriamento remoto, a cor da água é uma área de estudo que permite extrair informações dos ambientes aquáticos com ampla cobertura espacial e temporal (Zhang *et al.* 2017). Essa linha de pesquisa tem diversas áreas, entre elas estão relacionadas a estudos de medição e modelagem de propriedades bio-ópticas (Guillaume *et al.* 2023), correção atmosférica e incertezas de dados (Zhang *et al.* 2022), algoritmos de sensoriamento remoto para estimar clorofila-a, (Kupssinskü *et al.* 2020), matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM) (Qiang *et al.* 2023), qualidade e ecologia da água (Pan *et al.* 2022), sedimentos suspensos totais (TSS) (Ye *et al.* 2014) e concentração de sólidos suspensos em superfície (SSSC) (Fassoni-Andrade & Paiva, 2019).

Diversos estudos sobre cor da água e seus componentes opticamente ativos utilizaram coletas de água de campo para validar ou calibrar os resultados de estimativas de concentração de sedimentos em suspensão (SS) a partir de dados orbitais. Estudos sobre sólidos suspensos - SS e suas frações na Amazônia através de dados orbitais têm utilizado sensores de alta e média resolução como o trabalho de Fassoni-Andrade & Paiva, (2019). Atualmente a maior barreira para entender processos hidrodinâmicos e dinâmica dos componentes opticamente ativos da água está no estabelecimento de amostragem de campo contínua, entretanto, sensores orbitais como MODIS presentes nos satélites TERRA e AQUA da National Aeronautics and Space Administration (NASA) geram dados quase diariamente de um mesmo lugar (1-2 dias para o recobrimento do globo). Os sensores citados, já são amplamente empregados na literatura, e aplicados no contexto de monitoramento da cor da água. No trabalho de Omachi *et al.* (2019) analisaram dados de cor do oceano do MODIS Aqua para avaliar a dinâmica da pluma e estimar a disponibilidade de luz bentônica sobre a plataforma amazônica.

A partir do entendimento que o sensoriamento remoto é uma ferramenta complementar ao monitoramento de ambientes aquático, ele tem seu valor elevado devido as dificuldades impostas pela observação tradicional. Essas barreiras são, entre elas: financeiras, logísticas e de pessoal. Com esse auxílio, é possível compreender os espaços sem respostas gerados da amostragem de água em campo. Com o imageamento satelital, podemos entender a os ambientes aquático a partir de uma maior cobertura espaço-temporal. O estudo de Zhang *et al.* (2017), bem como outros, indicaram que dados de satélite de alta a moderada resolução poderiam ser uma alternativa para obter resultados mais precisos no monitoramento aquático. No entanto, o efeito do atraso entre os sobrevoos de campo e de satélite permanece obscuro. A maioria dos estudos assume que os dados de campo e orbitais foram coletados ao mesmo

tempo. Consequentemente, o impacto das discrepâncias espaciais e temporais entre coleta em campo e o sobrevoo permanece pouco investigado (Gao *et al.* 2023).

Para compreender a cor da água e consequentemente estimar concentrações de SS e suas frações, é impreterível analisar componentes ópticos e variáveis ambientais, especialmente em estuários, onde complexidades como marés, ondas, correntes, fluxos de rios, transporte de sedimentos, erosão, deposição, vento e influências climáticas impactam a hidrodinâmica (Azevedo *et al.* 2023).

Este trabalho examinará as técnicas empregadas para determinar variações espaciais e temporais da reflectância bem como análise de estimativas de concentrações de SSSC e TSS. Para tal, utilizou ferramentas geoestatísticas para analisar a variação espacial e ferramentas estatísticas para analisar a variação temporal. Apresenta métricas e indicadores derivados das respectivas técnicas e demonstrará como eles informam a determinação das variações sob investigação dos agentes ambientais atuantes no estuário.

2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no estuário formado pela confluência dos rios Pará (rio Tocantins e 5% do rio Amazonas), Guamá e Acará, a jusante da cidade de Belém, próximo à ilha de Tatuoca (Figura 1). Esta ilha está localizada entre duas importantes baías, Marajó e Santo Antônio, que por sua vez apresentam morfologias de fundo distintas que influenciam as correntes regionais.

A ilha de Tatuoca, localizada no estuário do rio Pará a 10 km de Belém, atravessa duas estações climáticas distintas: chuvosa (dezembro a maio) e menos chuvosa (junho a novembro). Essa região é afetada por marés meso e macro semidiurnas, alcançando até 3,7 m de altura (Preste *et al.* 2017). A ilha, conta com estrutura propícia à pesquisa e instalação de observatórios, o que abrange logística, pessoal, e estrutura física.

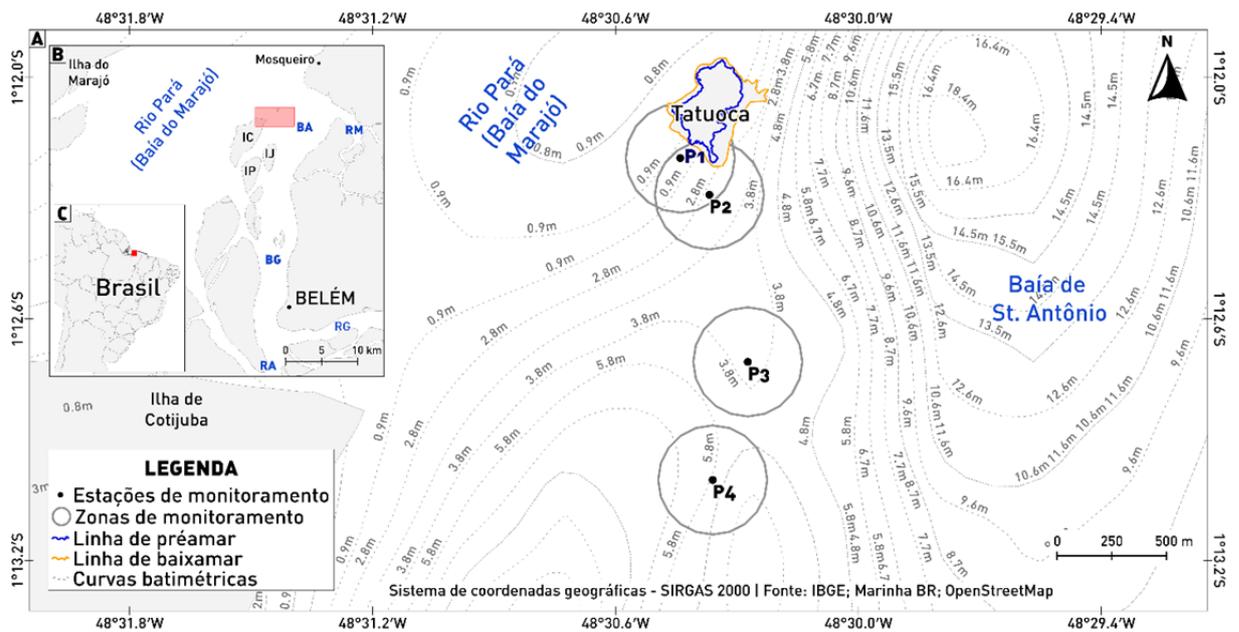


Figura 1 – Localização da área de estudo.

A: região de Tatuoca; B: Localização em Belém; C: Localização no Brasil; AB: Baía de Santo Antônio; GB: Baía do Guajará; IC: Ilha de Cotijuba; JI: Ilha Jutuba; PI: Ilha Paquetá -Açu; TI: Ilha Tatuoca; AR: rio Acará; GR: rio Guamá; RM: rio Maguari.

Nesta região Apesar de estar a 50 km da costa, as marés ainda impactam a região. Os padrões de maré observados no estuário podem ser classificados como marés meso e macro-semidiurnas, com média de maré de 3,2 m. A diferença média entre a preia-mar e a baixa-mar varia de 0,5 m a 1,2 m, com altura mínima da maré baixa de cerca de 2 m (Preste *et al.* 2017).

A ilha tem uma área de cerca de 5 ha e está situada a 10 km do continente de Belém, posicionada entre um canal de 15 metros de profundidade no lado direito e áreas rasas com média de 4 m de profundidade no lado esquerdo. Localizada na zona de mistura do estuário do rio Pará, experimenta intrincadas interações entre o fluxo do rio e as marés, moldando condições ambientais distintas cruciais para a dinâmica dos sedimentos e processos biogeoquímicos.

A Ilha de Tatuoca, administrada pelo Observatório Nacional do Brasil, abriga uma equipe permanente de monitoramento geomagnético. Embora fechado ao público, oferece acesso conveniente (30 minutos de barco), energia solar, acesso à internet e escritório. Com estas características, é adequado para inclusão na rede de observatórios hidrológicos, constituindo uma estação em ambiente estuarino.

Finalmente, essa ilha é candidata a ser uma estação de monitoramento da rede Hybam. Essa rede de monitoramento, tem estações em toda a Amazônia internacional, porém não dispõem de estação em regiões estuarinas e nem próximas a costa. A expansão da rede Hybam é necessária a fim de entender a dinâmica geoquímica, bem como a exportação de sedimentos das principais bacias hidrográficas amazônicas.

3 PROBLEMÁTICA

Este trabalho buscou examinar a variabilidade dos SS nos domínios espacial e temporal na superfície da água, utilizando dados obtidos a partir de imagens de satélite. Esta investigação procura desenvolver técnicas de amostragem adaptadas às condições locais e, mais importante ainda, examinar a discrepância entre a recolha no terreno e as imagens de satélite. Assim, propõe-se que as alterações na cor da água sejam significativamente afetadas pela localização das amostras de campo, devido à complexidade da área em questão. Esta região é uma zona estuarina, sujeita a influências de maré e que apresenta uma resposta acentuada aos caudais dos rios. É, por isso, essencial monitorizar as variações da cor da água para calibrar e correlacionar a reflectância com componentes da água como o TSS e o SSSC. Por conseguinte, é essencial alinhar os pontos de amostragem com as variações espaciais e temporais durante a recolha de amostras de água. Ora, o objeto de estudo desse trabalho está inserido dentro de um contexto maior, no que se refere, a expansão da rede Hybam, na integração da costa Amazônia na área de seu monitoramento. Além disso, a região é deficiente em estações de observação no âmbito da rede de observatórios hidrológicos. O objetivo era iniciar as operações na região antes do estabelecimento da rede Hybam na ilha de Tatuoca.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste estudo é verificar as concentrações de sólidos em suspensão (SS) e examinar as variações espaciais e temporais dessas concentrações. A reflectância é empregada como um indicador fundamental da variação sedimentar em um estuário amazônico. A considerar as influências sazonais e de maré na região da Ilha de Tatuoca. E analisar o possível efeito do monitoramento contínuo na região, no contexto da instalação de um observatório.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a variação espacial da cor da água;
- Analisar a variação temporal de SSSC e TSS;
- Compreender as variações espaciais e temporais em função de maré, vazão e sazonalidade;
- Analisar temas relacionados a governança sobre instalação de observatórios e potencial integrado a dados orbitais.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 OBSERVATÓRIOS DA ÁGUA

De antemão, é importante destacar que os observatórios hidrológicos, integrados a sistemas de observação e modelagem regional e global, aprimoram a precisão das informações e previsões necessárias para o gerenciamento eficaz de ambientes aquáticos seguros e sustentáveis. O acesso público a dados oceânicos sistemáticos e de longo prazo é um fator chave para a Economia Azul, promovendo o crescimento econômico, a criação de empregos e a inovação (Franz *et al.* 2021).

Iniciativas brasileiras envolvendo universidades, empresas privadas, órgãos federais e estaduais, e instituições de todo o país, são fundamentais para a geração de dados hidrológicos, tornando o monitoramento contínuo e integrado. Embora essas ações existam em pequena escala e em iniciativas isoladas e as mais desenvolvidas sejam focadas principalmente na física dos oceanos, há um potencial significativo para ampliar o escopo da biogeoquímica, como o monitoramento realizado pela demonstrado pela rede Hybam, contribuindo assim para a solução de problemas de falta e descontinuidade de dados biogeoquímicos da água e sedimentos (Révelard *et al.* 2022).

A ligação das iniciativas existentes e a promoção de novas iniciativas podem ajudar a preencher as lacunas na cobertura temporal e espacial da monitorização, tanto na vasta área oceânica como nos rios da Amazônia. O alinhamento entre iniciativas nacionais e regionais, bem como entre programas internacionais, pode ser melhorado se houver coordenação por uma entidade nacional, o que otimiza o retorno do investimento público e maximiza os benefícios socioeconômicos. Com base em exemplos internacionais, são discutidos possíveis arranjos institucionais futuros, aproveitando as políticas públicas nacionais existentes e a cooperação internacional da qual o Brasil já participa (Franz *et al.* 2021).

Para o estabelecimento de observatórios hidrológicos exige uma forte governança que facilite a colaboração entre as partes interessadas. Instituições como a rede Hybam no Brasil demonstram que a coordenação de dados entre entidades nacionais e internacionais pode aumentar a eficiência e a precisão das medições de fluxos de água e sedimentos na Amazônia internacional. Isso envolve a criação e uso de políticas hídricas existentes que incentivem a cooperação e o compartilhamento de dados, além de otimizar o retorno sobre o investimento público (Du Plessis 2023).

A integração de iniciativas locais com redes globais, como o *Global Ocean Observing System* (GOOS), pode ser um modelo a seguir para o monitoramento dos rios na Amazônia. Essas iniciativas são frequentemente discutidas em termos de como os dados coletados por diferentes instituições são padronizados e tornados acessíveis para facilitar a análise comparativa em larga escala (Moltmann *et al.* 2019). A coordenação entre governos, ONGs, universidades, institutos de pesquisa e o setor privado é fundamental para promover o monitoramento contínuo e o compartilhamento de informações.

5.2 ESTUÁRIOS

O estudo dos vales incisos teve início nas épocas grega e romana e ganhou impulso no século XIX, contribuindo para o atual discurso em torno da idade da Terra. Nos séculos XIX e XX, surgiram ideias relativas ao grau do rio e aos perfis de equilíbrio fluvial, culminando no desenvolvimento de modelos de fácies fluviais na década de 1960. O estudo dos estuários registou um avanço significativo a partir de meados do século XX, tendo o primeiro modelo abrangente de fácies surgido na década de 1990. Na década de 1980, o conceito de estratigrafia sequencial deu um impulso significativo à investigação sobre estuários e vales incisos. Os modelos de fácies começaram a considerar o controle externo na formação do espaço de acomodação e foram integrados na sequência estratigráfica, enfatizando a necessidade de novos desenvolvimentos na concepção destes modelos (Boyd *et al.* 2011).

Os estuários modernos e os vales incisos são importantes cenários deposicionais, significativos para o uso da terra e a exploração de hidrocarbonetos. Eles são ambientes complexos que combinam a criação de espaço deposicional pela erosão fluvial e seu preenchimento por deposição fluvial, estuarina e marinha. Estuários são definidos geologicamente como transgressivos por natureza, recebem sedimentos de fontes fluviais e marinhas. Eles ocupam a parte voltada para o mar de um vale submerso, contêm fácies influenciadas por marés, ondas e processos fluviais, e se estendem do limite terrestre das fácies de maré até o limite marítimo das fácies costeiras (Boyd *et al.* 2011).

Os estuários se dividem em dois tipos principais: dominados por ondas e dominados por marés. Os modelos de fácies estuarinas mostram um empilhamento retrogradacional de fácies e uma zonação tripartida devido à interação entre processos marinhos e fluviais. Todos

os estuários e vales incisos possuem uma entrada fluvial, e os modelos de fácies refletem o equilíbrio entre processos de ondas e marés (Boyd *et al.* 2011).

Esses ambientes possuem uma estrutura tripartida, com uma porção externa dominada pelo mar, uma zona central de baixa energia e uma parte interna dominada pelo rio. A organização das fácies dentro dos estuários é influenciada pela interação entre processos marinhos (ondas e marés) e fluviais. Estuários dominados por ondas têm uma setorização tripartida clara: corpo de areia marinha, bacia central lamacenta e delta de cabeça de baía. Em estuários dominados por maré, o corpo de areia inclui bancos de areia e planícies de areia, uma zona de meandros estreitos e uma zona interna com um canal único (Dalrymple *et al.* 1992). Dito isso, a região de estudo se encontra em uma zona de mistura, onde a dominância fluvial e marinha é forte. A região de Tatuoca, em especial as áreas estudadas são regiões de hidrodinâmica forte, o que causa a não permanência de sedimentos nessa região, comprovado pela baixa quantidade de argila (Gregório & Mendes 2009).

O rio Pará é um vasto estuário formado por vários rios e baías, contribuindo significativamente com água doce para o oceano. Este ambiente abriga muitas ilhas, das quais 39 pertencem ao município de Belém (Silva *et al.* 2018). No mais, o estuário do rio Pará é bastante largo, variando de cerca de 1 km na cabeceira a aproximadamente 50 km na foz na baía do Marajó, e recebe significativa contribuição fluvial de ambos os lados. Os principais rios tributários, Tocantins, Guamá e Acará–Moju, estão na margem direita. A grande descarga de água doce resulta em uma redução notável da salinidade no estuário. No entanto, a maré se propaga por vários quilômetros para o interior, criando uma ampla zona de transição entre os ambientes fluvial e marinho, influenciada por marés semidiurnas (Gregório & Mendes 2009).

O estuário do rio Pará é um dos maiores do Brasil, apresentando uma foz com cerca de 60 km de largura. Embora denominado "rio", o rio Pará não é um rio no sentido estrito, pois não possui nascente; em vez disso, é uma rede hidrográfica que recebe fluxo de vários corpos d'água. Diferentemente do rio Amazonas, o estuário do Rio Pará apresenta uma intrusão salina, conferindo características estuarinas que se estendem até a plataforma continental (Rosário *et al.* 2016).

A localização da área é de confluência de baías, entre elas, uma das mais proeminentes a baía do Guajará. A baía de Guajará, situada na margem direita do estuário do rio Pará, na Amazônia, é formada pela confluência dos rios Guamá, Acará e Moju. Esta baía apresenta zonas de baixa profundidade (~2 m) e canais profundos (~25 m). No setor oeste, o canal de

vazante causa intensa erosão da margem. No setor leste, encontram-se os canais de enchente e planícies de maré lamosas, que se estendem de sul a norte ao longo da orla de Belém do Pará. A baía contém depósitos sedimentares arenosos no noroeste e lamosos no leste-sudeste, com cerca de 70% do substrato coberto por lamas. A deposição de sedimentos lamosos e a formação de uma barra de pontal no Sul, na foz do rio Guamá, resultam da diminuição da intensidade das correntes de maré ao sul e das correntes fluviais ao norte. O regime hidrodinâmico é elevado, mas os baixos teores de argila nos sedimentos de fundo destacam as fortes correntes de maré nos depósitos arenosos do setor noroeste (Gregório & Mendes, 2009).

5.3 CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS E HIDROGRÁFICAS

Os aspectos geomorfológicos dos ambientes costeiros são moldados por fatores como variação do nível do mar, suprimento de sedimentos, ação das ondas, marés, correntes, descarga fluvial e evolução tectônica. Em alguns casos, eventos tectônicos que ocorreram há milhões de anos continuam a influenciar a morfologia e a hidrodinâmica dos ambientes deposicionais atuais (Silva, *et al.* 2023).

No estuário do rio Pará, a vazão média estimada é 20.946 m³/s. De acordo com o modelo estudado por Prestes *et al.* (2020), a bacia hidrográfica do Araguaia-Tocantins contribui com cerca de 52% desse volume, enquanto a bacia Amazônica contribui com 44%. A análise da série histórica de vazão revelou que as entradas de água doce no rio Pará variam sazonalmente: no primeiro semestre, a maior contribuição vem da bacia do Araguaia-Tocantins, enquanto no segundo semestre, a maior parte da água provém da bacia Amazônica. Inicialmente, a primeira estimativa da magnitude da vazão fluvial do rio Pará é de 20.946 m³/s. A vazão desse sistema atinge seu pico em abril, com $3,8 \times 10^5$ m³/s, e seu ponto mais baixo em outubro, com $9,0 \times 10^3$ m³/s, no mais, o rio Pará é o quinto maior sistema fluvial do mundo (Prestes *et al.* 2020).

A partir dessas constatações, podemos dizer que o sistema hidrológico da região amazônica é singular devido à significativa entrada de água doce proveniente das bacias do Amazonas e Araguaia-Tocantins. No mais, o rio Pará é um sistema estuarino dominado pela maré. O estuário do rio Pará é um sistema complexo e especial na plataforma continental

amazônica, com processos físicos de micro e mesoescala gerados por forças de diferentes fontes (por exemplo, marés astronômicas e vazão fluvial) (Prestes *et al.* 2017).

Correntes bidirecionais e semidiurnas dominam os 350 km de extensão do rio Pará, caracterizando-o como um sistema estuarino onde o aporte de água continental interage com o fluxo barotrópico gerado pelas correntes de maré. Prestes *et al.* (2017) registraram velocidades de correntes superiores a 2,0 m/s no rio Pará, com descargas instantâneas no estuário atingindo $4,0 \times 10^5$ m³/s. O prisma de maré, da ordem de bilhões de metros cúbicos, é responsável pelo transporte de grandes quantidades de água do mar para o rio Pará, alterando significativamente sua vazão em direção à plataforma continental (Prestes *et al.* 2017).

Devido à baixa topografia da bacia sedimentar da Amazônia, às chuvas, entre outros fatores, as marés (macro e hiper) podem submergir grandes áreas (por exemplo, o limite fluvial/estuarino do rio Amazonas ocorre a mais de 600 km de sua foz). Para o Estuário do rio Pará (PRE), esse limite ocorre a mais de 300 km (Azevedo *et al.* 2023).

Esses processos são impreteríveis de serem entendidos para a dinâmica do transporte de sedimentos e consequentemente determinação de concentração. A transferência de sedimentos da terra para o oceano começa nos ambientes costeiros e, em rios de grande porte como o Amazonas, exerce impactos significativos ao longo de milhares de quilômetros, atravessando diferentes condições ambientais. No rio de maré da Amazônia, que permanece relativamente natural, a interação entre processos fluviais e marinhos facilita a transição para o oceano, afetando o transporte e o acúmulo de sedimentos nas planícies de inundação e nas fozes dos afluentes (Nittrouer *et al.* 2021).

Isto leva a compreender os efeitos climáticos relacionados a regime pluviométrico da região, este diretamente relacionada a vazão, por sua vez fator determinante para a compreensão da dinâmica sedimentar. Entretanto, as chuvas em toda a bacia hidrográfica é fator observável sobre o domínio estuarino e alteração de vazão e interferente na dinâmica sedimentar, ou seja, as áreas costeiras são impactadas pelas "pressões" das bacias hidrográficas a montante, tanto em termos de qualidade da água quanto no transporte de sedimentos, logo, a importância das pressões climáticas na dinâmica de sedimentos em larga escala é determinante para o entendimento de transporte de sedimentos (Samaras & Koutitas 2014).

5.4 SENSORIAMENTO REMOTO DA COR DA ÁGUA

O sensoriamento remoto da água representa uma ferramenta fundamental para a investigação de ambientes aquáticos, permitindo a quantificação e o mapeamento espacial de parâmetros cruciais para a avaliação da qualidade da água. Estes incluem, por exemplo, a clorofila, o material em suspensão e a matéria orgânica dissolvida. A técnica baseia-se na interação da radiação eletromagnética com a água e os seus componentes.

O espectro visível e o infravermelho próximo são os mais utilizados devido à sua sensibilidade às propriedades ópticas da água. A propriedade óptica da cor da água, resultante da interação da radiação solar com a massa de água e os seus constituintes, contém informação espectral valiosa sobre a composição da coluna de água (Hafeez *et al.* 2022). A variação da coloração é influenciada pela concentração e natureza das substâncias dissolvidas e partículas em suspensão, que interagem com a radiação incidente, absorvendo-a em determinados comprimentos de onda e dispersando-a noutras direções (Barbosa *et al.* 2019).

A Figura 2 ilustra a trajetória da luz solar à medida que atravessa a atmosfera, atinge a superfície da água, interage com a coluna de água e depois regressa ao sensor orbital. Parte da luz é refletida na superfície da água, enquanto outra parte penetra e, depois de interagir com os vários componentes da água, regressa à superfície, onde pode atingir o sensor. Durante este percurso, a luz sofre atenuação devido a interações com a atmosfera, a superfície da água e a coluna de água. Estes processos têm o potencial de interferir na informação captada sobre a água, uma vez que a radiação solar é influenciada por diversos fatores antes de ser registada pelo sensor (Barbosa *et al.* 2019).

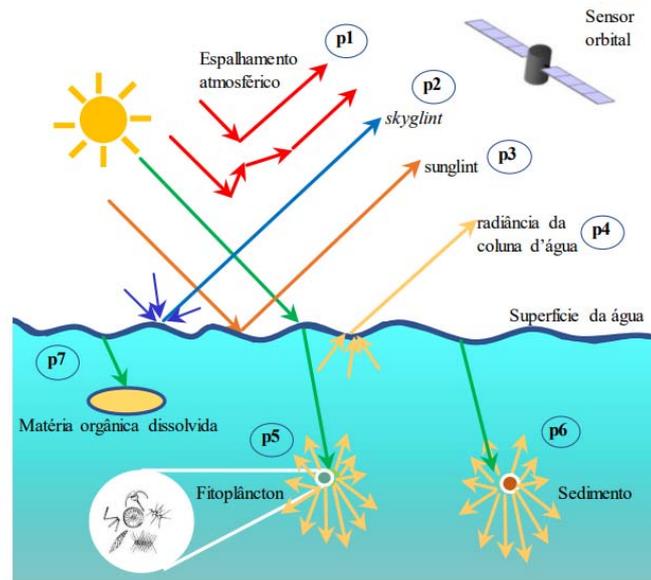


Figura 2 – Trajetória da luz entre fonte (sol), alvo (corpo d'água) e sensor orbital.

(1) processo de espalhamento atmosférico, (2) processo de reflexão especular da luz difusa do céu, (3) processo de reflexão especular da luz solar direta, (4) radiação emergente da coluna d'água, (5) processo de espalhamento e absorção da luz por fitoplâncton, (6) processo de espalhamento da luz por sedimentos, (7) processo de absorção da luz por matéria orgânica dissolvida

Fonte: Barbosa *et al.* (2019).

A interação da luz com a coluna de água é regida por dois processos principais: a absorção e a dispersão. No processo de absorção, a energia do fóton é transferida para uma molécula de água ou para substâncias presentes na água, resultando no desaparecimento do fóton. No processo de dispersão, o fóton interage com um componente do meio, resultando numa mudança de direção de propagação, mantendo a sua existência. A compreensão desses processos é fundamental para interpretar como a luz interage com o corpo d'água e assim extrair informações sobre o sistema aquático (Barbosa *et al.* 2019).

O processo de absorção de luz pelas moléculas implica a transferência de energia de um fóton para a molécula, resultando na excitação dos seus elétrons. Esta energia é distribuída entre os níveis eletrônico, vibracional e rotacional. A região específica do espectro eletromagnético responsável por cada tipo de transição depende da energia do fóton em questão (Buiteveld *et al.* 1994). A absorção de luz na água afeta a cor da água, a penetração da luz e vários processos biológicos (Qiang *et al.* 2023).

O processo de espalhamento refere-se à alteração da direção dos fótons quando estes interagem com o meio em que a luz se propaga. Em ambientes aquáticos naturais, a dispersão

pode ser atribuída a duas fontes primárias: flutuações aleatórias de densidade, que são o resultado de movimentos moleculares, e partículas que estão suspensas na água. As flutuações de densidade dão origem a pequenas flutuações no índice de refração, que por sua vez resultam em desvios na direção dos fótons. Este tipo de dispersão é isotrópico, análogo à dispersão de Rayleigh nos gases (Twardowski & Tonizzo 2018).

A espalhamento de fótons por partículas em suspensão na água ocorre quando os fótons interagem com partículas que são geralmente maiores do que o comprimento de onda da luz visível. Este processo altera a direção dos fótons, fazendo-os seguir trajetórias erráticas que impedem a sua penetração na coluna de água e aumentam a probabilidade de absorção. Uma parte dos fótons é espalhada de volta à superfície, intensificando assim a atenuação da luz. Estes processos de dispersão e absorção são fundamentais para a detecção remota de sistemas aquáticos (Mouw *et al.* 2015).

5.5 CONTEXTO GEOLÓGICO E CLIMÁTICO

Uma parte significativa do território paraense está situada no Domínio Morfoclimático das Terras Baixas Equatoriais Amazônicas, que se caracteriza pela presença de planícies, depressões, aluviões e planaltos. Além disso, a região é predominantemente coberta por uma densa floresta equatorial amazônica de folhas largas.

Belém, PA, situada na região amazônica, apresenta um clima classificado como Af segundo o sistema Köppen-Geiger (Beck *et al.* 2018), tipificado como tropical úmido (equatorial). A cidade recebe uma precipitação média anual de aproximadamente 3500 mm (Figura 3), com a maior parte da precipitação concentrada entre dezembro e maio. Isso se deve à influência da Zona de Convergência Intertropical (INMET 2023). A temperatura permanece relativamente constante ao longo do ano, com mínimas em torno de 23°C e máximas próximas de 32°C. A umidade relativa é notavelmente elevada e Belém recebe uma média de 5 a 7 horas de sol por dia, apesar da elevada frequência de dias de chuva. Porém, é importante frisar que as alterações de vazão dos rios, tem um contexto maior de clima, ou seja, engloba toda a região amazônica, bem como a geologia que é expressa por onde os rios passam. Nesse sentido, não apenas o contexto geológico e climático de Belém, afeta as variações de sedimento e vazão nos rios.

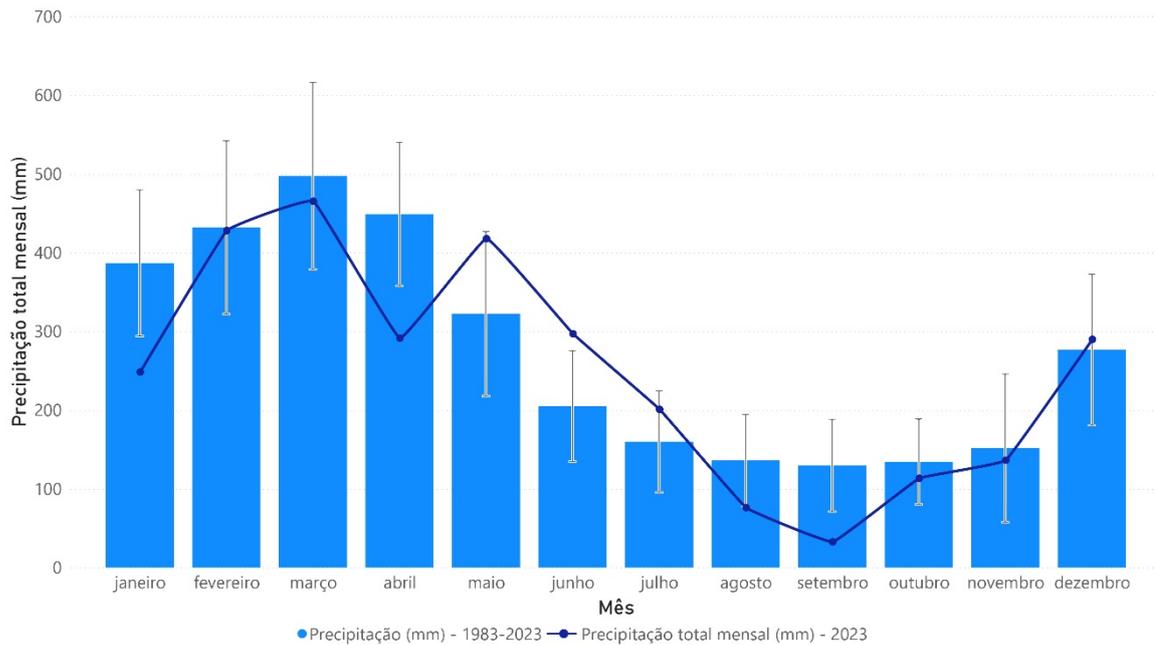


Figura 3 – Precipitação pluviométrica no município de Belém, com o total mensal em 2023 e a média mensal dos últimos 30 anos (1983 a 2023). Dados da estação INMET estação 82191.

A geologia de Belém, Pará, e suas região, o qual compreende a área de estudo, é definida por depósitos sedimentares originários do período Quaternário. Esses depósitos são compostos principalmente por depósitos fluviomarinhos argilosos, depósitos aluviais, depósitos eólicos e depósitos lateríticos (Figura 4). A região é coberta por sedimentos recentes, incluindo argilas, areias, siltes e depósitos orgânicos, que refletem a dinâmica dos ambientes fluviais e costeiros da região amazônica. Os depósitos fluviomarinhos indicam a influência dos ambientes fluvial e marinho, enquanto os depósitos aluviais englobam uma variedade de materiais aluviais, eólicos e lateríticos resultantes de processos de intemperismo e sedimentação. Esses depósitos são ilustrativos das condições sedimentares predominantes e das interações com a extensa rede fluvial e as áreas de várzea nas proximidades da cidade.

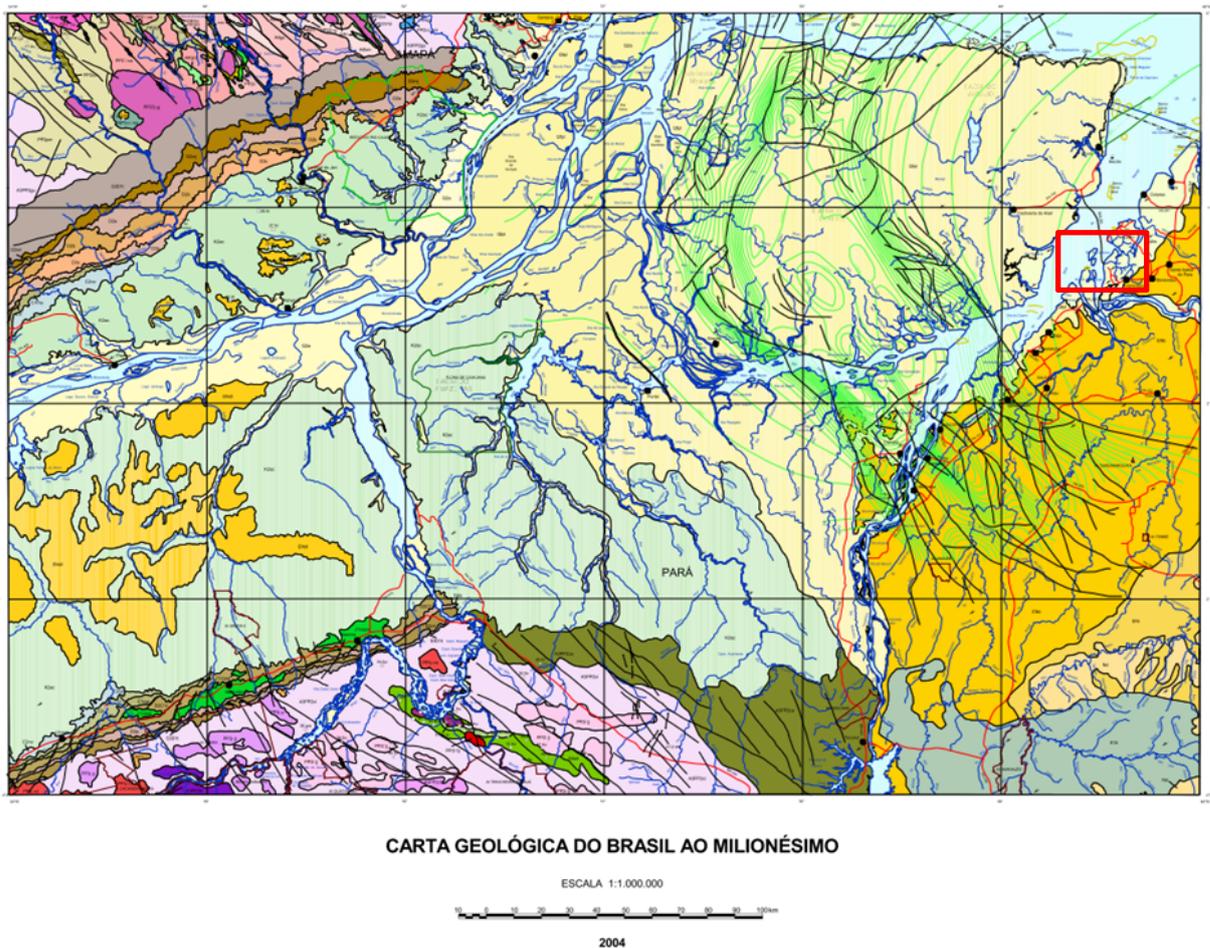


Figura 5 – Carta de unidades geológicas da região de Belém. Fonte: CPRM-SBG (2004).
 Fonte: Adaptado CPRM-SBG (2004).

Quando abordamos o estudo dos estuários, é crucial reconhecer que muitos desses ambientes se encontram ao longo de linhas de falha ou dentro de grabens geológicos. Essas estruturas tectônicas desempenham um papel fundamental na formação e manutenção dos estuários. Linhas de falha, que são fraturas na crosta terrestre ao longo das quais houve movimento relativo, e grabens, que são blocos da crosta que se afundam entre duas falhas paralelas, criam condições favoráveis para a formação de estuários. Essas estruturas podem criar espaços onde a água do mar e os sedimentos podem acumular-se, formando ambientes estuarinos ricos em biodiversidade (Griggs & Reguero 2021).

A subsidência da terra é um fator crucial na dinâmica dos estuários. Subsidência refere-se ao afundamento da superfície terrestre, que pode ser causado por diversos processos

geológicos, como a compactação dos sedimentos ou movimentos tectônicos. Em muitas regiões costeiras, a subsidência tem resultado em um aumento local do nível do mar. Esse fenômeno é significativo para a preservação das características estuarinas, pois o aumento do nível do mar pode inundar áreas costeiras e permitir a formação e manutenção de ambientes estuarinos (Erkens *et al.* 2015, Syvitski *et al.* 2009).

Evidências estruturais e estratigráficas, como a presença de depósitos de sedimentos marinhos em áreas que foram anteriormente terrestres, indicam que a subsidência tem desempenhado um papel importante na preservação desses ambientes costeiros. A análise de perfis estratigráficos e a interpretação de dados sísmicos mostram como as camadas de sedimentos marinhos se acumulam e se preservam em áreas afetadas por subsidência. Esses depósitos, muitas vezes ricos em fósseis e outros indicadores ambientais, fornecem informações valiosas sobre as mudanças no nível do mar e as condições ambientais ao longo do tempo (Stefani & Vincenzi 2005).

Além disso, a interação entre processos tectônicos e climáticos também contribui para a configuração dos estuários. Mudanças no nível do mar relacionadas a variações climáticas podem interagir com a subsidência, exacerbando ou atenuando os efeitos do afundamento da terra. Em áreas onde a subsidência é acompanhada por uma elevação relativa do nível do mar, os estuários podem se expandir e se aprofundar, criando habitats diversos e complexos que são essenciais para muitas espécies aquáticas (Kirwan & Megonigal 2013, Woodroffe 2000).

6 MATERIAL E MÉTODOS

A Figura 6 abaixo apresenta o resumo da metodologia deste trabalho e as seções posteriores detalham cada procedimento adotado.

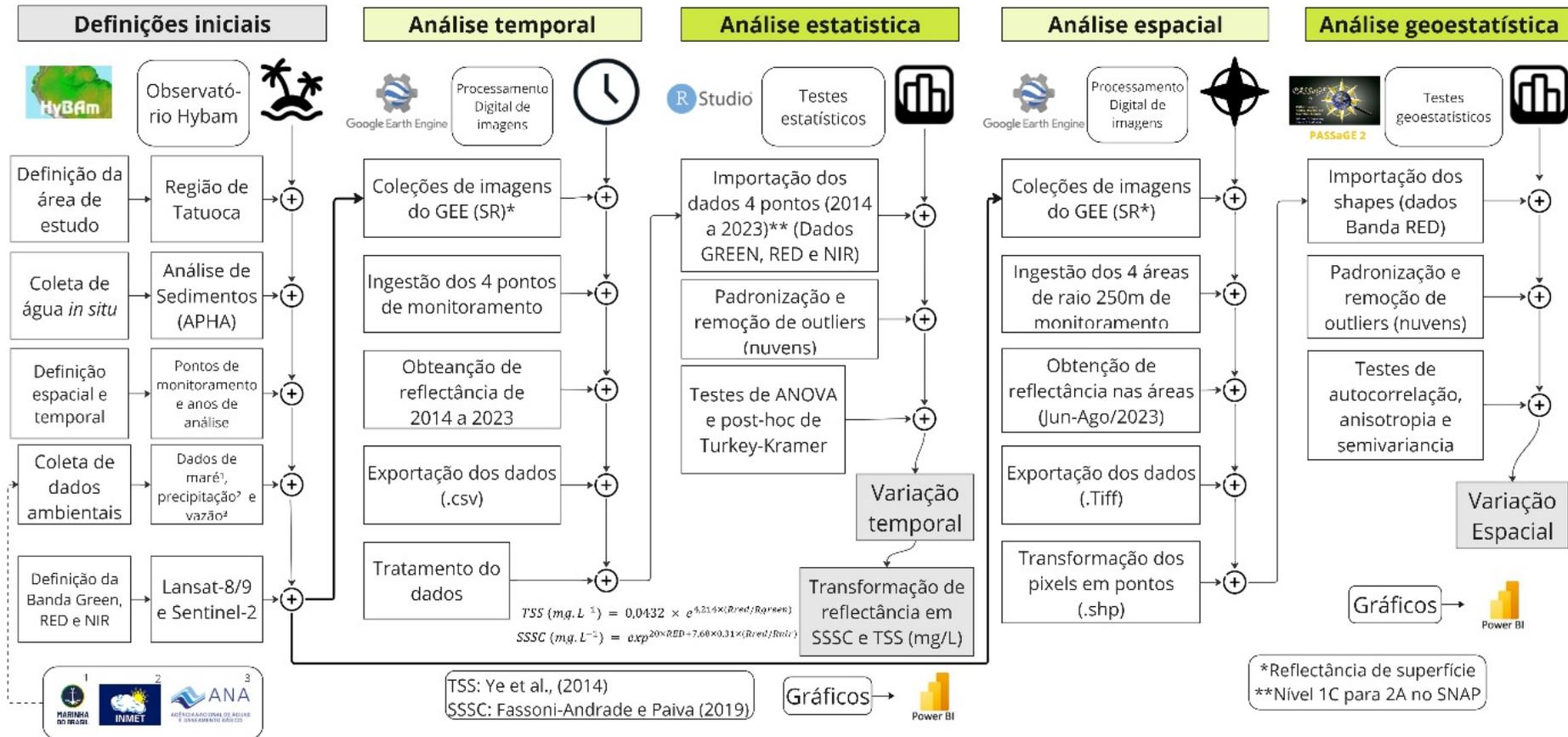


Figura 6 – Resumo metodológico

6.1 AQUISIÇÃO DE IMAGENS

Para a análise espacial foram utilizadas imagens Sentinel-2, nível 2A, disponíveis na plataforma Google Earth Engine - GEE, na coleção (COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED), estas com dados de reflectância de superfície. Na análise espacial foram estudados os meses de junho, julho e agosto de 2023 devido à menor cobertura de nuvens. Selecionamos imagens de maré alta e baixa nas mesmas condições, ou seja, consideramos a altura e o estado da maré (subida ou baixa) sempre que possível. Para a análise temporal foram utilizadas coleções de imagens Landsat-8/9 nível 2 e Sentinel-2 nível 2A disponíveis na plataforma GEE nas coleções (LANDSAT/LC08/C02/T1_L2, LANDSAT/LC09/C02/T1_L2 e COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED, COPERNICUS/S2_HARMONIZED), estes com dados de reflectância de superfície (SR), exceto 'COPERNICUS/S2_HARMONIZED'. Os anos analisados foram de 2014 a 2023.

Todos os sensores utilizaram a banda verde (GREEN) (533-590 nm), vermelha (RED) (636-673 nm) e infravermelho próximo (NIR) (833-879 nm), essas bandas foram escolhidas devido à sua sensibilidade aos componentes inorgânicos da água. As resoluções espaciais diferiram, com imagens Landsat a 30 m e imagens Sentinel a 10 m. As plataformas desses sensores passaram pela região em horários semelhantes por volta das 10h30 (UTC -3). Novas imagens foram capturadas a cada 15 dias pelo Landsat-8 e 9 e a cada 5 dias pela constelação Sentinel-2.

O processamento de nível 2A de imagens Sentinel-2 e o processamento de nível 2 de imagens Landsat-8 e 9 incluem correções geométricas para eliminar distorções espaciais e correções radiométricas para padronizar as intensidades de pixel. Isso aumenta a precisão dos dados para diversas aplicações de monitoramento. As imagens Sentinel-2 Nível 1C apresentam apenas correções geométricas, necessitando de transformação de seus dados para SR usando o algoritmo Sen2Cor no software SNAP (ESA 2022).

6.2 AQUISIÇÃO DE DADOS AMBIENTAIS

Obtivemos dados de precipitação do Instituto Meteorológico Nacional do Brasil (INMET) para o período de 2014 a 2023 da estação convencional de Belém (código 82191), compreendendo precipitação total diária em mm. Além disso, obtivemos dados de precipitação de 30 anos da mesma estação para estabelecer uma média histórica. Os dados de

marés em metros foram adquiridos da Marinha do Brasil na estação de Ilha do Mosqueiro (código 10525) para o mesmo período, extraídos apenas nas datas correspondentes às imagens de satélite utilizadas. Por fim, os dados de vazão em m³/s foram adquiridos da Agência Nacional de Águas (ANA) para as estações de Marabá-PA (código 29050000) no rio Tocantins e em Óbidos-PA (código 17050001) no rio Amazonas.

6.3 PROCESSAMENTO DE IMAGENS E AQUISIÇÃO DE DADOS DE REFLECTÂNCIA

Para análise espacial, estabelecemos uma área de influência de 250 m no entorno dos pontos de monitoramento (Figura 1). Dentro dessas áreas, cada pixel das imagens foi convertido em pontos vetoriais. O processamento foi realizado no GEE, onde implementamos máscaras para eliminar pixels contendo nuvens, sombras e efeitos de cirro. Os valores de reflectância na faixa vermelha (ρ_{RED}) foram então extraídos para cada ponto do vetor. A análise temporal também foi realizada no GEE. As imagens foram corrigidas conforme necessário para remover interferências atmosféricas e máscaras foram aplicadas para eliminar pixels com nuvens, sombras e efeitos de cirro. Os valores de reflectância na faixa azul (ρ_{BLUE}), verde (ρ_{GREEN}), vermelha (ρ_{RED}) e infravermelho próximo (ρ_{NIR}) foram extraídos para os quatro pontos de monitoramento.

6.4 GEOESTATÍSTICA E ESTATÍSTICA

As análises foram realizadas utilizando valores de reflectância para eliminar possíveis interferências atmosféricas e padronizar os resultados para garantir consistência entre diferentes sensores e diferentes datas. O processo de padronização de dados de imagem em reflectância visa garantir consistência e comparabilidade entre diferentes conjuntos de dados em uma abordagem multissensor e multidados. Para garantir a integridade e confiabilidade dos resultados, procedeu-se à remoção de outliers utilizando o método dos limites interquartis. O objetivo desta etapa é eliminar valores discrepantes que possam enviesar a análise e as interpretações subsequentes. A presença de outliers em dados utilizados em análises paramétricas pode ter diversos efeitos indesejáveis, como o aumento da variabilidade sem sentido.

6.4.1 Geoestatística

Os dados de ρ_{RED} abrangendo três meses foram obtidos através do processamento de imagens na plataforma GEE. Esses dados foram posteriormente importados para o PASSaGE® (Rosenberg & Anderson 2011) para análise geoestatística, com distâncias de análise adaptadas à resolução da imagem.

Após pré-processamento e definições iniciais, foram avaliadas a variância espacial, a normalidade, o coeficiente I de Moran, a determinação da anisotropia e a estacionariedade antes da construção do semivariograma.

A variância espacial avalia a variabilidade dos dados entre localizações espaciais, revelando padrões de heterogeneidade e autocorrelação espacial. As verificações de normalidade garantem a validade dos testes paramétricos. O coeficiente I de Moran avalia a autocorrelação espacial, indicando correlações entre localidades vizinhas. A determinação da anisotropia examina a direcionalidade da correlação espacial. A estacionariedade testa a consistência das propriedades estatísticas em locais espaciais, garantindo a validade da análise. Essas análises são cruciais para a compreensão de padrões e processos espaciais nos dados (Moran 1948).

Após a identificação dos padrões, os semivariogramas foram plotados no software ArcGIS® e validados cruzadamente para análise dos erros do modelo. Semivariogramas validados auxiliam na identificação da variabilidade espacial, facilitando a determinação de tendências, padrões ou anomalias.

6.4.2 Estatística

Os dados de ρ_{BLUE} , ρ_{GREEN} , ρ_{RED} e ρ_{NIR} coletados ao longo de um período de 10 anos nos pontos de estudo foram submetidos ao processamento de imagens na plataforma GEE e à análise estatística no R Studio.

Após o pré-processamento dos dados, foram realizadas análise de variância unidirecional (ANOVA) e pós-processamento de Tukey-Kramer para identificar variações temporais e agrupamentos. A ANOVA avaliou diferenças significativas entre grupos de dados em diferentes períodos, enquanto o teste de Tukey-Kramer permitiu comparações múltiplas para identificar diferenças estatisticamente significativas entre esses períodos. Essas análises forneceram insights sobre padrões e tendências sazonais ao longo do tempo (Fu *et al.* 2022).

Adicionalmente, foram realizadas análises de normalidade, ANOVA e significância, comparando dados de reflectância com dados mensais de precipitação, vazão e maré. Os índices de significância da análise foram traçados para identificar tendências, padrões ou anomalias ao longo dos anos e variáveis ambientais, como sazonalidade e maré.

6.5 ANÁLISE BIBLIOMÉTRICA

Para a análise da governança de observatórios hidrológicos, utilizamos plataformas de indexação de periódicos para realizar uma revisão abrangente da literatura. Nosso objetivo foi identificar tanto casos de sucesso quanto desafios associados à organização, cooperação, integração e compartilhamento de dados hidrológicos.

A metodologia envolveu a busca de artigos relevantes utilizando palavras-chave específicas relacionadas ao tema. As palavras-chave foram escolhidas para capturar aspectos essenciais da governança de observatórios, incluindo estratégias de gestão, modelos de colaboração, e mecanismos de integração de dados. A revisão dos estudos selecionados permitiu uma compreensão mais aprofundada das melhores práticas e dos problemas comuns enfrentados por redes de monitoramento hidrológico.

A revisão foi conduzida através da busca de artigos científicos em plataformas como Scopus e Web of Science. Utilizamos uma combinação de palavras-chave, no idioma inglês, incluindo "observatórios hidrológicos", "integração de dados hidrológicos", "modelos de colaboração em redes de monitoramento" e "estratégias de gestão em observatórios". A seleção dos artigos foi realizada com base em critérios de relevância, citação e impacto na área. A análise bibliométrica foi feita por meio do pacote Bibliometrix (Aria & Cuccurullo 2017) no R Studio.

7 RESULTADOS

7.1 ANÁLISE ESPACIAL

Para avaliar a variação espacial da reflectância (ρ_{RED}) na região de Tatuoca, aplicamos geoestatística aos dados de reflectância das imagens de satélite, utilizando os pontos de coleta de campo como referência geográfica. Nossa análise revelou que os dados de reflectância exibiram variações espaciais em diferentes direções, alcances e distâncias. Estas variações exibiram respostas distintas à maré, com marés altas e baixas influenciando os dados de reflectância de diferentes maneiras. A análise espacial limitou-se ao exame do período menos chuvoso.

7.1.1 Autocorrelação

A variação espacial de direções, alcances e distâncias foi determinada por meio de geoestatística. Inicialmente, a dependência espacial dos dados foi determinada por meio dos correlogramas I de Moran (Figura 7), que indicam se indivíduos próximos se correlacionam (Moran 1950).

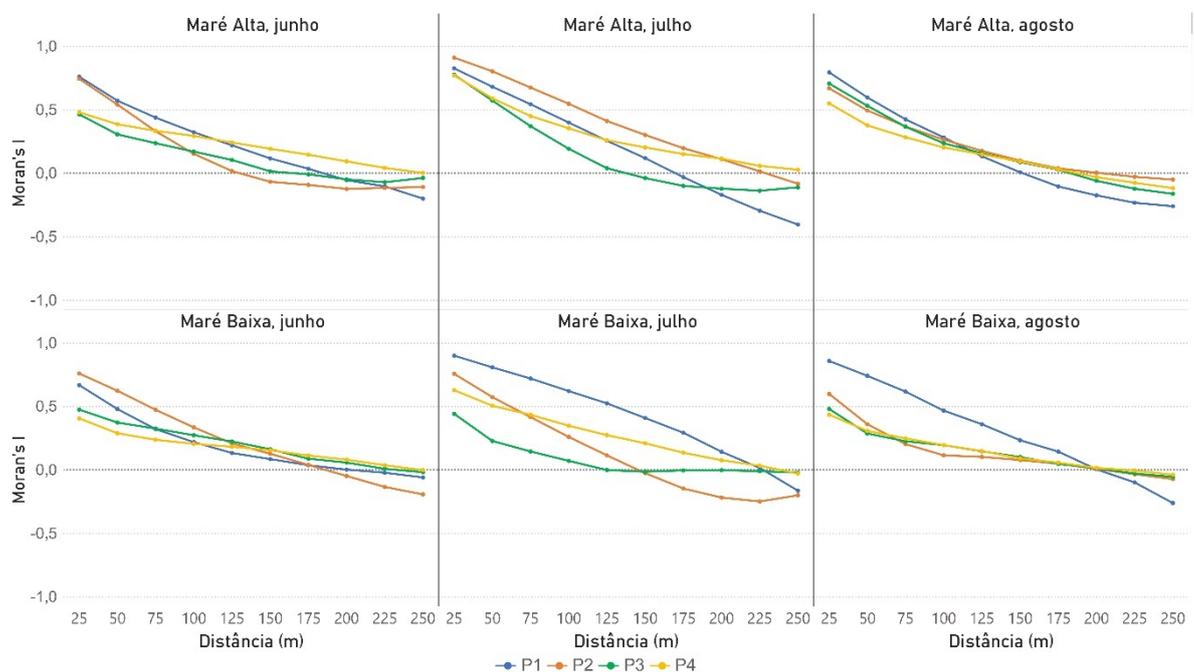


Figura 7 – Correlogramas pelo índice de Moran.
P1: Ponto 1, P2: Ponto 2, P3: Ponto 3, P4: Ponto 4.

Os valores do coeficiente I de Moran são significativamente próximos de +1 em distâncias curtas na maré alta. Isto indica que os valores de reflectância apresentam os seguintes coeficientes de correlação de Moran: a 25 m, $0,75 \pm 0,14$; a 50 m, $0,56 \pm 0,14$. Na maré baixa, os coeficientes de correlação foram de $0,55 \pm 0,20$ a 25 m e $0,43 \pm 0,19$ a 50 m. Os pontos 1 e 2 exibiram os maiores coeficientes de correlação em ambos os estados da maré. Os pontos 3 e 4 apresentaram os menores coeficientes de correlação. Isto sugere que em distâncias curtas (>50 m), podemos correlacionar os dados e aplicar modelos de variação espacial para assumir distâncias de variação na cor da água. Propõe-se, portanto, que amostras geograficamente mais próximas dos pontos de coleta de campo apresentem maior similaridade nos valores de reflectância, enquanto aquelas geograficamente distantes apresentem maior dissimilaridade. Além disso, postula-se que a maré exerce influência significativa no coeficiente de similaridade.

7.1.2 Anisotropia

Correlogramas são omnidirecionais, mas podem exibir variação na autocorrelação espacial em direções específicas. A anisotropia foi avaliada pelo método de correlação angular de Simon, analisando o grau de anisotropia em dados bidimensionais.

A Figura 8 apresenta correlogramas angulares, com o norte geográfico representado pelo ângulo de 90° . Formas circulares em correlogramas angulares indicam direções de correlação preferidas, refletindo variações temporais como maré e mês. É importante ressaltar que as marés nesta região apresentam ciclos semidiurnos com período de aproximadamente seis horas por ciclo.

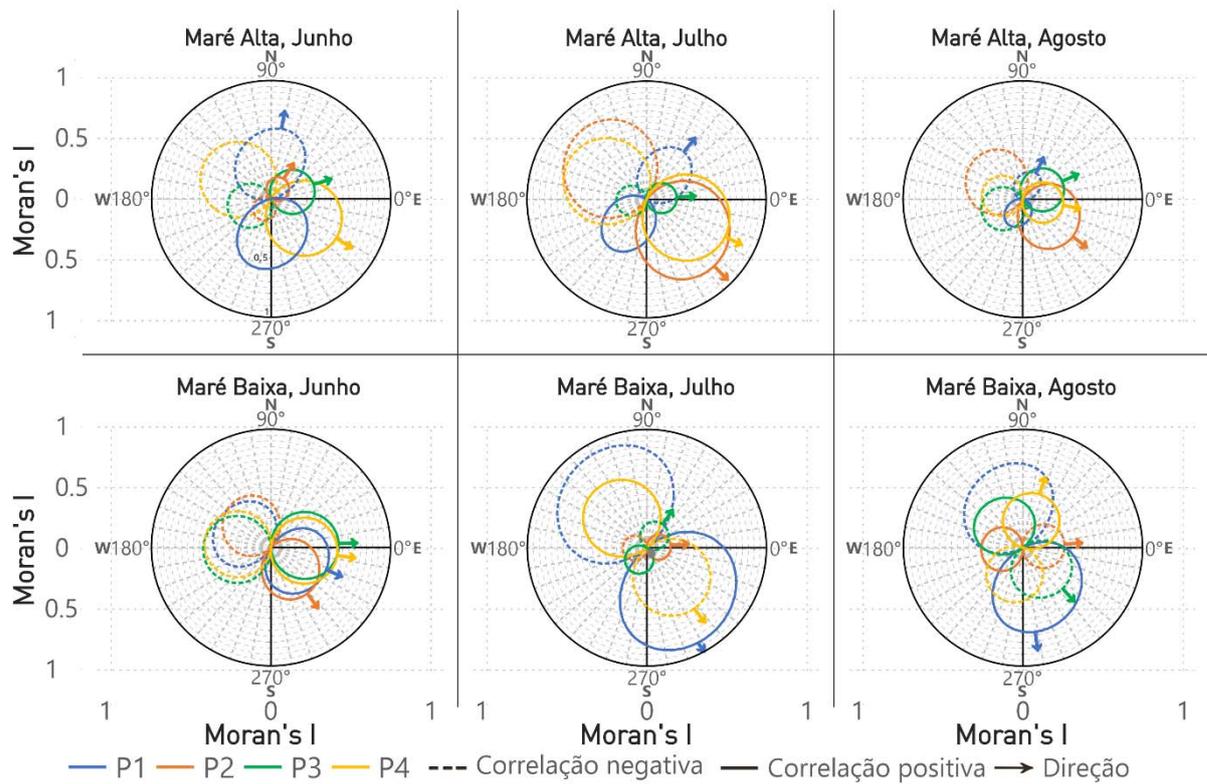


Figura 8 – Correlogramas angulares.
 P1: Ponto 1, P2: Ponto 2, P3: Ponto 3, P4: Ponto 4.

As formas elípticas significam anisotropia, onde a autocorrelação espacial varia entre as direções, implicando anisotropia geométrica com faixas de correlação flutuantes, mas padrões consistentes formados pelas correntes de maré durante a maré alta.

As observações durante a maré alta mostraram predominantemente uma tendência SW-NE, com exceção do ponto 2 em junho, apresentando tendências SW-NE e NW-SE. Por outro lado, durante a maré baixa, o ponto 1 exibiu consistentemente uma direção NW-SE ao longo de todos os meses, enquanto outros pontos não tinham preferências direcionais claras, refletindo a complexa interação de fatores sazonais e localizados na dinâmica estuarina.

O ponto 3 exibiu consistentemente baixa intensidade de correlação em todos os meses e estados de maré, indicando distribuição heterogênea de sedimentos. Fontes locais de sedimentos podem dominar em distâncias curtas, enquanto uma mistura de sedimentos de origens variadas em distâncias maiores resulta em correlação mais fraca devido a diferentes propriedades ópticas.

7.1.3 Semivariância

A Com base nos resultados da autocorrelação espacial e na distância ideal e direção preferida, definimos padrões de referência para testar a variância dos dados de reflectância. Para este teste foram utilizados semivariogramas, principal forma de análise espacial utilizada em geoestatística. As distâncias do correlograma I de Moran e os ângulos de direção do correlograma angular foram utilizados no modelo de semivariograma (Figura 9).

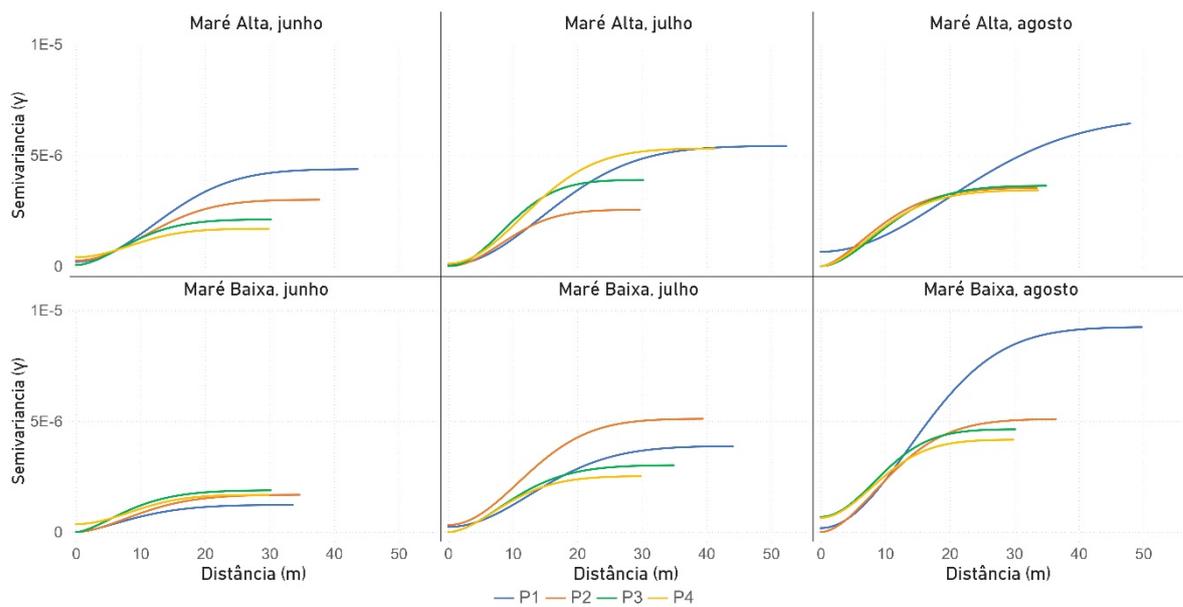


Figura 9 – Gráficos de semivariância anisotrópica.
P1: Ponto 1, P2: Ponto 2, P3: Ponto 3, P4: Ponto 4.

Os semivariogramas ilustraram distâncias variadas (m) e semivariância (γ) entre pontos e estados de maré, com correlogramas angulares representando direções. Foram representados o intervalo de semivariância e a distância máxima com a menor variância espacial, quantificando a variabilidade dos dados em relação à distância (lag) com baixo efeito pepita, sugerindo o uso adequado do modelo (Simon 1997).

Diferentes padrões surgiram durante as marés alta e baixa, com a maré alta apresentando valores de semivariância mais consistentes entre os pontos, indicando distribuição espacial homogênea dos sedimentos ($3,59^{-6} \pm 1,41^{-6}$ na maré alta, $3,45^{-6} \pm 2,24^{-6}$ na maré baixa). O ponto 1 apresentou consistentemente os maiores valores de semivariância nas comparações mensais. No entanto, na maré baixa, a variabilidade aumentou ao longo do tempo, mantendo uma semivariância semelhante.

A distância entre os pontos variou entre as marés alta e baixa (distâncias medianas: 48 m \pm 4,26 na maré alta, 44 m \pm 7,62 na maré baixa), com o Ponto 1 apresentando consistentemente valores de distância elevados em ambos. Geralmente, as distâncias foram mais consistentes na maré baixa, sugerindo uma distribuição espacial mais homogênea, enquanto a maré alta exibiu uma distribuição mais heterogênea. No entanto, a ligeira diferença entre as distribuições pode ser atribuída ao efeito pepita, indicando que os valores observados são estimativas modeladas.

7.2 ANÁLISE TEMPORAL

A análise estatística dos dados de reflectância na região de Tatuoca, utilizando pontos de análise espacial como referência, revelou padrões temporais ao longo do ano. Picos de reflectância foram observados nas zonas centrais dos períodos sazonais, com diminuições nas zonas de transição. As forças ambientais, como marés e sazonalidade, foram avaliadas utilizando variáveis, incluindo precipitação, nível das marés e distinções categóricas entre estações chuvosas e menos chuvosas, e marés altas e baixas com base em médias regionais. Esta análise abrange todos os períodos sazonais, mas há maior quantidade de dados do período menos chuvoso.

A reflectância mediana durante a estação chuvosa ($0,0730 \pm 17,72^{-3}$) foi menor do que na estação menos chuvosa ($0,0885 \pm 23,12^{-3}$), apesar do menor número de imagens sem nuvens durante o período chuvoso. No entanto, os valores de reflectância no período menos chuvoso não superaram significativamente os do período chuvoso, com picos semelhantes observados em ambos.

O comportamento da reflectância variou com as condições das marés. No período chuvoso, a preia-mar apresentou picos em janeiro ($0,0955 \pm 8,77^{-3}$) e março ($0,0960 \pm 17,25^{-3}$), diminuindo em maio ($0,0580 \pm 17,55^{-3}$). Por outro lado, no período menos chuvoso, os picos ocorreram em outubro ($0,1120 \pm 22,07^{-3}$) e novembro ($0,1055 \pm 26,33^{-3}$), diminuindo em junho ($0,0585 \pm 9,42^{-3}$). Na maré baixa, foram observados picos em fevereiro ($0,1075 \pm 9,58^{-3}$) e outubro ($0,0975 \pm 23,19^{-3}$) nos períodos chuvoso e menos chuvoso respectivamente, com decréscimos em maio e junho.

A análise dos dados revelou que a maré alta exibiu valores de pico mais elevados e valores de base mais baixos do que a maré baixa em ambos os períodos sazonais, enquanto a maré baixa exibiu valores de pico mais baixos e valores de base mais elevados do que a maré

alta. Estas observações sublinham a influência significativa dos ciclos sazonais na reflectância da água.

7.2.1 O comportamento da reflectância relacionado às variáveis ambientais

Os níveis de reflectância seguem um padrão cíclico ao longo do ano, atingindo picos durante os períodos sazonais e intervalos entre marés, com níveis mais baixos no primeiro semestre e níveis mais elevados no segundo.

A correlação entre os níveis de caudal do rio a jusante e a reflectância é evidente, apoiada por dados das estações da ANA. Por exemplo, os picos de vazão na estação de Marabá, no rio Tocantins, atingiram 31.000 m³/s, enquanto na estação de Óbidos, no rio Amazonas, os picos de vazão foram de 273.000 m³/s (ANA 2022). A reflectância apresenta uma correlação mais forte com os dados de maré baixa, indicando maior influência fluvial.

As mudanças sazonais afetam o transporte de sedimentos, impactando os níveis de reflectância durante todo o ano. A precipitação local não mostra qualquer correlação direta com a reflectância, mas afeta indiretamente o fluxo e a reflectância através da precipitação a jusante da bacia hidrográfica.

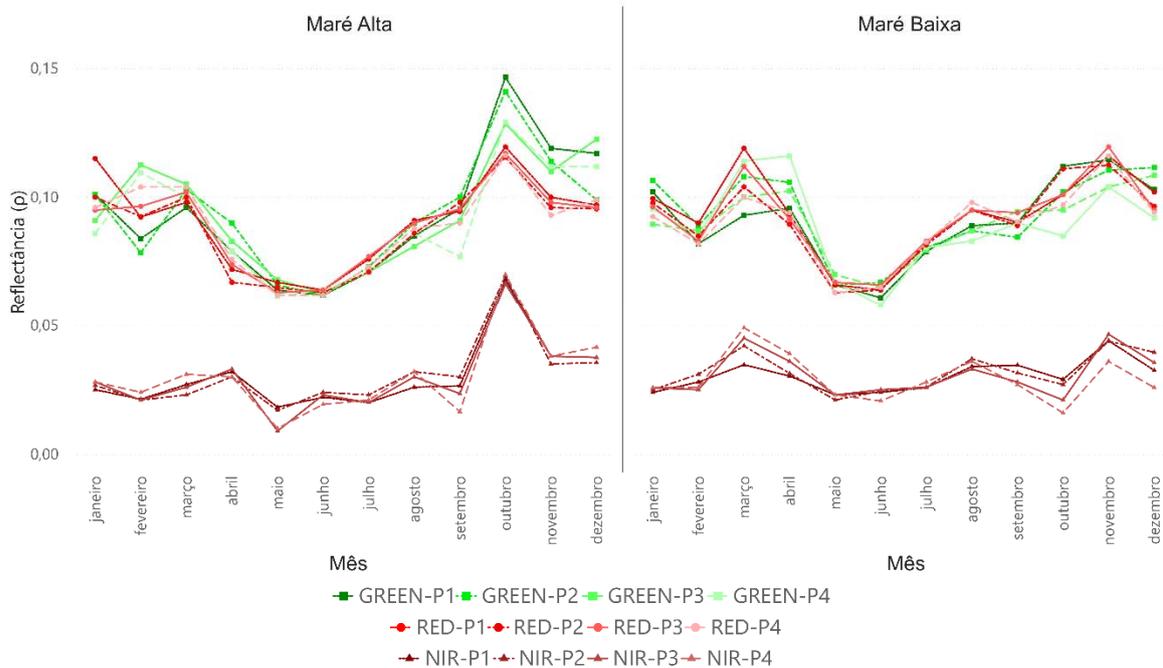


Figura 10 – Reflectância das bandas Azul, Verde e Vermelha pela mediana por mês em diferentes marés.

A Figura 10 exibe gráficos de medianas que ilustram os níveis de reflectância durante as marés alta e baixa, revelando flutuações atribuídas a mudanças sazonais e de fluxo. As medianas de reflectância na maré alta ($0,0845 \pm 22,60^{-3}$) e na maré baixa ($0,0830 \pm 22,22^{-3}$) apresentam variação significativa ao longo do ano devido a mudanças sazonais, fluxos de rios e flutuações no nível da maré. Os picos em maio e outubro, juntamente com os valores mínimos em maio e junho, são evidentes em ambos os estados de maré. As marés sofrem alterações aproximadamente a cada seis horas, exibindo estados distintos que podem contribuir para a variação observada na reflectância. Este fenômeno pode ser empregado para informar interpretações mais amplas.

Houveram picos de concentração de SSSC e TSS apresentaram picos em março e outubro (Figura 11), possivelmente devido à influência sazonal. A descargas dos rios apresentaram correlações fortes com as concentrações estimadas. Outra possível influência sobre os períodos de março-abril e setembro-outubro é o efeito equinocial nas marés, associado ao alinhamento gravitacional do Sol e da Lua durante os equinócios de março-abril e setembro-outubro, gera marés substancialmente mais altas, conhecidas como marés de sizígia. Essas marés mais amplas aumentam significativamente a energia hidrodinâmica nos estuários, como o do rio Pará, contribuindo para maior ressuspensão e transporte de sedimentos suspensos.

Na região amazônica, a influência dessas marés equinociais é potencializada pela macromaré do sistema e pela descarga de grandes volumes de água dos rios, criando condições ideais para a formação de zonas de máxima turbidez (MTZs). Essas zonas são caracterizadas por altas concentrações de sedimentos suspensos, favorecidas pela interação entre correntes fluviais, marés intensificadas e morfologia estuarina, o que pode explicar os picos de concentração de SSSC e TSS (Gomes *et al.* 2021).

Estudos indicam que os períodos de março e outubro correspondem a picos de concentração de sólidos suspensos (SSSC e TSS) devido à combinação entre descargas sazonais dos rios e o aumento da amplitude das marés equinociais. Esses eventos não apenas redistribuem sedimentos internamente, mas também transportam nutrientes e matéria orgânica para zonas costeiras e manguezais, desempenhando um papel crucial na dinâmica sedimentar e ecológica da região (Carneiro *et al.* 2020).

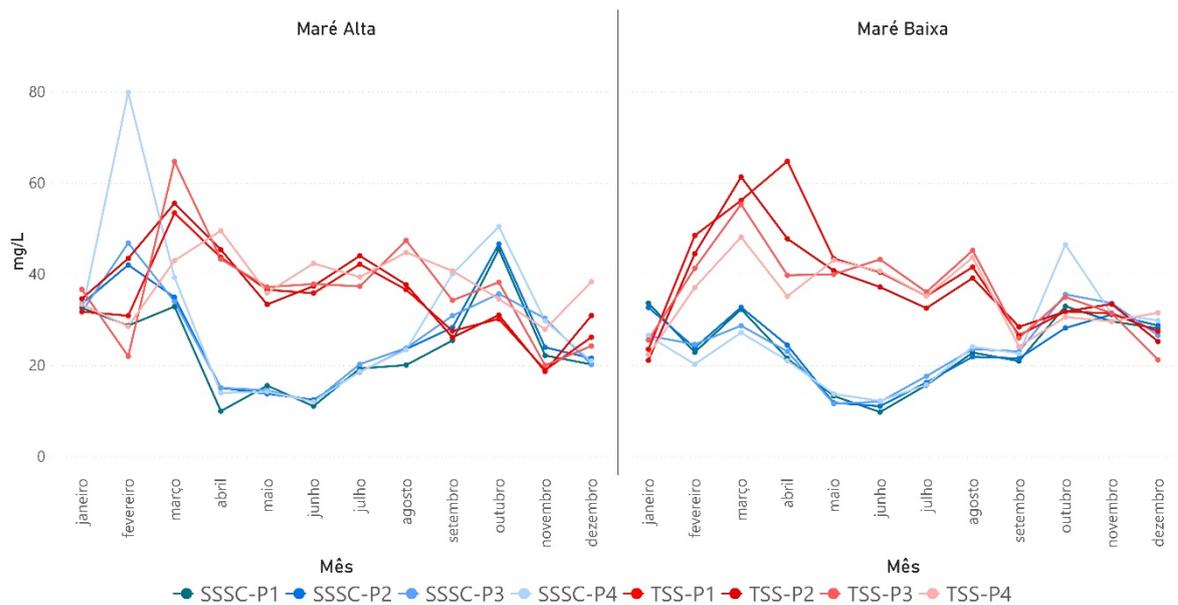


Figura 11 – Concentrações de SSSC e TSS em mg/L, mediana por mês em diferentes marés.

Em resposta às variações de reflectância observadas, realizamos uma análise de variância (ANOVA) para avaliar a variabilidade ao longo dos 12 meses do ano, com resultados detalhados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resumo da ANOVA.

Ponto	Soma quadrática	Média quadrática	Valor F	Pr(>F)
Ponto1	0,05074	0,004612	18,93	<2e-16 ***
Ponto2	0,04938	0,004489	18,32	<2e-16 ***
Ponto3	0,05100	0,004636	20,09	<2e-16 ***
Ponto4	0,04970	0,004518	19,27	<2e-16 ***

A análise estatística, incluindo soma quadrática (Sum Sq), média quadrática (Mean Sq), valor F e Pr (>F) com "*" indicando alta significância ($p < 0,001$), revelou diferenças significativas entre os meses, indicando variabilidade temporal substancial influenciada pelas marés e sazonalidade.

Ao identificar essas disparidades, aplicou-se o teste de Tukey-Kramer para agrupar meses estatisticamente semelhantes. Em todas as ANOVAs, o fator “mês” impactou significativamente os valores dos pontos ($p < 0,05$), significando diferenças mensais significativas. Os meses foram agrupados em seis categorias (a-f), o teste de Tukey-Kramer agrupou os meses da seguinte forma (Figura 12): Grupo a: fevereiro, março, setembro,

outubro, novembro e dezembro; Grupo b: janeiro, fevereiro, março, agosto, setembro, novembro e dezembro; Grupo c: janeiro, fevereiro, março, abril, agosto, setembro e dezembro; Grupo d: janeiro, abril, julho e agosto; Grupo e: abril, maio e julho; Grupo f: maio e julho, cada um compartilhando características de reflectância semelhantes determinadas por análise estatística.

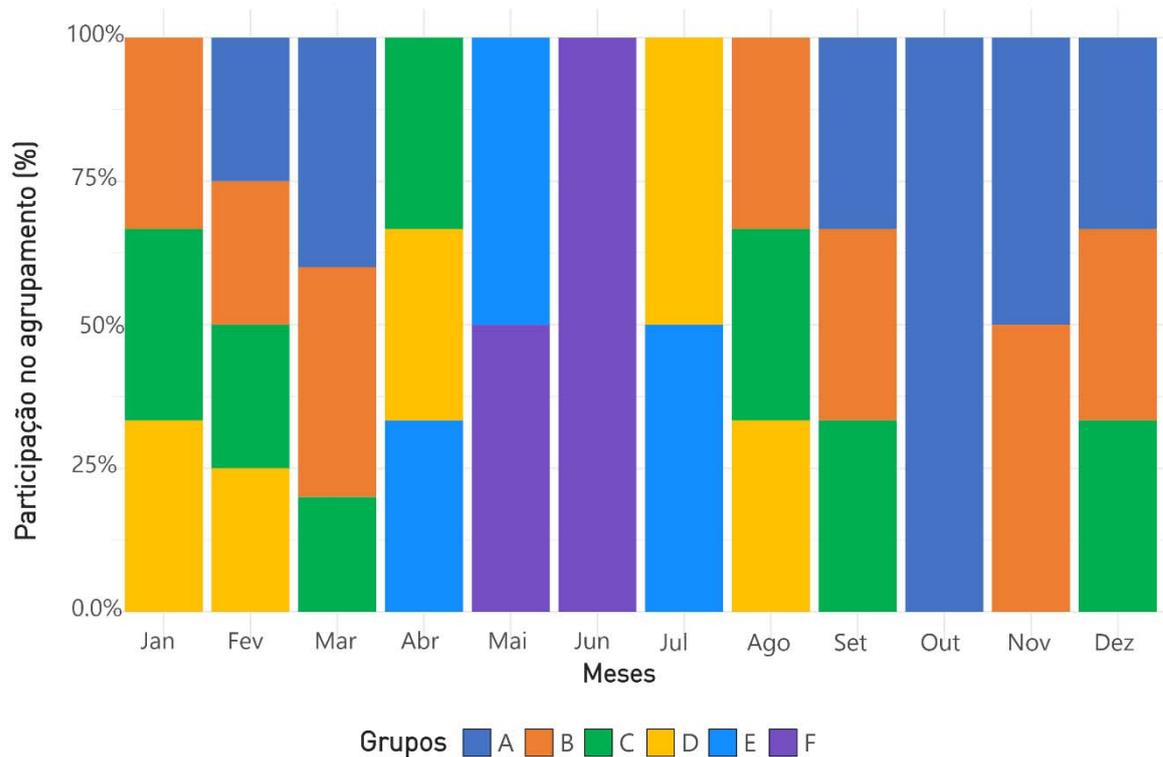


Figura 12 – Agrupamento ANOVA.

Por exemplo, os meses de janeiro não mostraram consistentemente qualquer diferença estatística na reflectância ao longo dos anos, reforçando a fiabilidade das análises e interpretações da variação temporal.

7.2.2 O comportamento da reflectância ao longo de um período de dez anos

A análise da reflectância ao longo do período de dez anos mostra flutuações, com aumentos e diminuições observados de ano para ano. São evidentes variações interanuais notáveis, com alguns anos apresentando padrões de mudança mais pronunciados em comparação com outros. O fluxo do rio e as marés são fatores claramente significativos que influenciam a reflectância, conforme ilustrado na Figura 13.

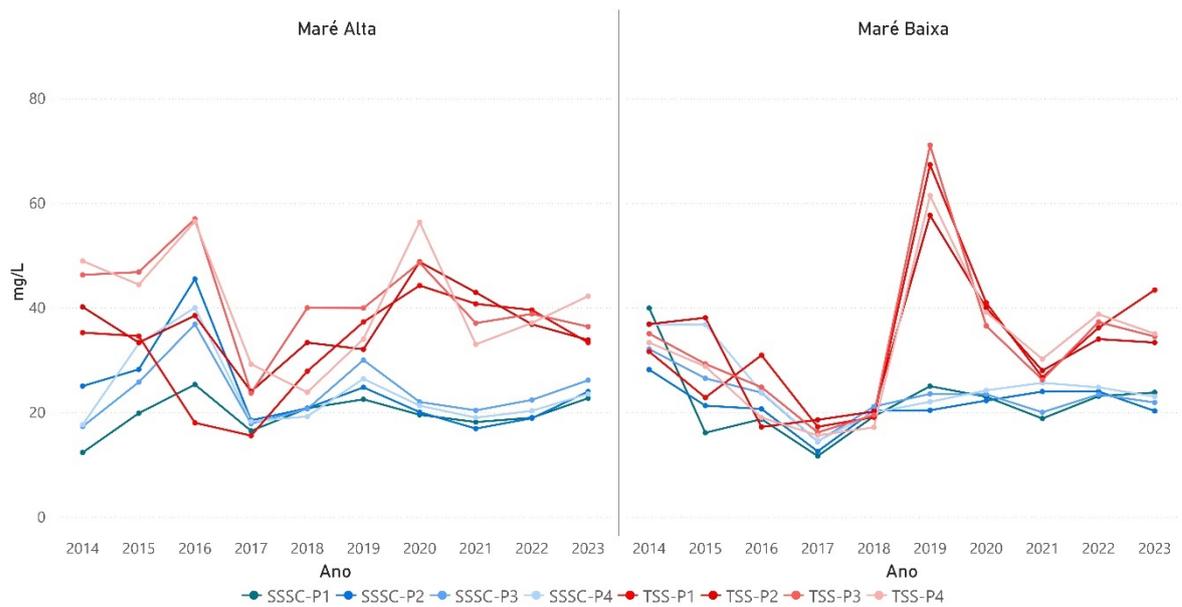


Figura 13 – Estimativas de SSSC e TSS representadas pela mediana por ano.

Entre 2014 e 2023 (Figura 13), o Ponto 1 apresentou o maior aumento (8,96%), enquanto o Ponto 3 apresentou a maior queda (2,35%). Em todas as métricas, o ponto 4 exibiu a tendência recente mais intrigante, iniciando um declínio em 2019, resultando numa diminuição de 5,68% num período de quatro anos. O ponto 4 sofreu um declínio significativo, caindo de $\sim 0,090$ para $\sim 0,080$, durante o declínio mais pronunciado entre 2019 e 2023.

Além disso, o estudo observou eventos pontuais ocasionais, como anos com picos registrados ou maior reflectância, juntamente com períodos de condições mais estáveis. Apesar das flutuações interanuais, houve períodos em que a reflectância mostrou um comportamento relativamente consistente ao longo de vários meses.

Além disso, os pontos em questão estão situados dentro de uma zona de “sombreamento” criada pela ilha de Tatuoca durante a maré alta. Esta ilha funciona como uma barreira de sedimentos, impedindo o influxo de correntes impulsionadas por forças oceânicas dentro do estuário. Além disso, essa área é designada como “zona de bota-fora”, um termo usado em estuários para descrever áreas destinadas à disposição de sedimentos dragados, normalmente provenientes de atividades de manutenção relacionadas a canais navegáveis, portos ou outras intervenções humanas no ambiente estuarino. Estas zonas são selecionadas com base em critérios ambientais, hidrodinâmicos e económicos, com o objetivo de minimizar os efeitos adversos no ecossistema. Além disso, a região caracteriza-se por uma

ausência de deposição de sedimentos. Os sedimentos são transportados através desta região e não se depositam devido ao forte efeito hidrodinâmico, que é mais pronunciado na maré alta. Estas características intrínsecas da região, particularmente evidentes no ponto 1, podem ter contribuído para a redução observada nas concentrações de SSSC e TSS. Adicionalmente, podem ter resultado na super ou subestimação das concentrações dos parâmetros analisados em todos os pontos.

No entanto, durante o período de estudo de dez anos, a reflectância exibiu variabilidade significativa. Embora alguns anos tenham registado aumentos isolados na reflectância, não surgiu nenhuma tendência consistente a longo prazo. A presença de nuvens, especialmente durante o primeiro semestre do ano, pode ter afetado a precisão da recolha de dados.

7.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

7.3.1 Distribuição dos Estudos por Ano (2014-2023):

Observou-se um aumento significativo no número de publicações sobre governança de observatórios hidrológicos ao longo do período analisado. Em 2014, foram identificados 26 artigos, enquanto em 2023, esse número cresceu para 68, com uma taxa de crescimento de 6,32% refletindo um crescente interesse no tema. O gráfico a seguir ilustra a evolução anual do número de publicações.

7.3.2 Principais Periódicos e Autores:

Identificamos os periódicos mais relevantes que publicaram artigos sobre o tema, destacando *Journal of Hydrology*, *Water*, *Remote Sensing*, *Ecological Indicators* e *Hydrology and Earth System Sciences*. Os principais autores da área foram Zhang Y. e Wang J., que contribuíram com um número significativo de publicações e citações.

7.3.3 Análise das Palavras-Chave:

A análise das palavras-chave revelou que os temas mais frequentemente abordados incluem "Hydrological Monitoring", "Water Quality", "Remote Sensing", "Climate Change", e "Environmental Monitoring". Essa distribuição indica uma ênfase nas práticas de gerenciamento e colaboração entre redes de monitoramento integrados a sensoriamento remoto.

7.3.4 Casos de Sucesso e Desafios:

Os estudos analisados destacaram vários casos de sucesso, como o próprio observatório Hybam, que demonstram modelos eficientes de integração de dados e cooperação interinstitucional. No entanto, também foram identificados desafios comuns, como a falta de padronização de dados e dificuldades na interoperabilidade entre diferentes sistemas.

7.3.5 Tendências Emergentes:

As tendências emergentes na governança de observatórios incluem o uso crescente de tecnologias avançadas, como a inteligência artificial e a análise de big data, para melhorar a coleta e a análise de dados hidrológicos.

8 DISCUSSÃO

O estudo teve como objetivo foi identificar a oportunidades na integração da região de Tatuoca ao restante da Amazônia, em relação ao monitoramento hidrogeológico. Com a expansão da rede Hybam para a região costeira/estuarina amazônica, buscou-se entender os desafios do monitoramento a longo prazo. Neste estudo, constatou-se que existe ausência de padronização e falta de coordenação em relação a governança interinstitucional.

Outro ponto deste estudo, é o histórico do observatório Hybam, usar ferramentas de sensoriamento remoto a partir dos dados de monitoramento, estes fundamentais para a calibração e validação de estimativas de interesse das Geociências, a partir de dados de sensoriamento remoto. Com isto, de uma forma a corroborar com isto, este trabalho explorou a variação espaço-temporal da cor da água na região da Ilha de Tatuoca, bem como estimou concentrações de SSSC e TSS, considerando a sazonalidade, vazão e os efeitos das marés. A análise revelou padrões distintos, com distâncias de amostragem variadas durante diferentes níveis de maré e uniformidade sazonal consistente ao longo dos anos de estudo. Essas descobertas oferecem informações valiosas sobre a dinâmica local da cor da água e concentração de sedimentos, informando estratégias de amostragem e monitoramento.

A análise espacial revelou diferenças nas distâncias amostrais, com mediana de 48 m $\pm 4,26$ na maré alta e 44 m $\pm 7,62$ na maré baixa, refletindo a influência da dinâmica das marés no comportamento da cor da água. Foram inferidas distâncias de amostragem espacial semelhantes de 31 m na maré alta e 27 m na maré baixa.

A análise temporal apresentou variações mensais na uniformidade da cor da aquarela ao longo de uma década, indicando um padrão consistente ao longo dos meses. Porém, a variação diária não foi capturada devido à resolução temporal da imagem (mínimo de 5 dias). Inferiu-se que a determinação da amostragem temporal é semelhante ao longo dos meses, dada a baixa variação observada ao longo das séries analisadas.

Essa característica representa uma limitação significativa em um ambiente altamente dinâmico, onde as condições podem variar consideravelmente em escalas temporais curtas, como ao longo de dias ou semanas. Essas variações estão diretamente associadas às oscilações de maré, sendo que as marés de sizígia, com amplitudes aproximadamente duas vezes maiores que as de quadratura, intensificam os processos hidrodinâmicos e sedimentares (Lin *et al.*, 2024).

8.1 OBSERVATÓRIOS E MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

Os principais temas abordados nos trabalhos pesquisados, discutem sobre a integração de projetos de monitoramento oceânico, estes mais evoluídos, quanto a integração interinstitucional, compartilhamento de dados e padronização de metodologias e afins (Franz *et al.* 2021). Estes casos demonstram como a organização pode resultar em ampla cobertura espacial e temporal de monitoramento de parâmetros hidrogeoquímicos. Esses parâmetros são fundamentais para estudos de entendimento da dinâmica dos processos hidrológicos, concentrados nas áreas da física, química e biologia em estudos dos ambientes aquáticos (Adjovu *et al.* 2023).

Dentre esses ambientes aquáticos estudados, a bacia Amazônica se destacada por ser dos maiores sistemas de rios do planeta. Os rios amazônicos têm comprimento e seções transversais grandes, o que exige elevado emprego de recurso humano e financeiro, para seu o monitoramento completo (Sousa Júnior *et al.* 2016). Uma das possíveis soluções desse problema, está na cooperação interinstitucional, desde instituições públicas, corporações, governo e universidades para o monitoramento das diversas áreas. Nessa cooperação, pressupõem, que todos tem interesses distintos, porém necessitam de um início comum, uma base de dados continua no tempo e com cobertura espacial geográfica ampla.

No mais, esta solução, esbarra em outro problema, o de governança e aplicações de políticas voltadas a fins comuns ao monitoramento. Está problemática passa pela forma atual de financiamento da pesquisa no Brasil. O financiamento se dá de forma a concessões de editais em tempos determinados o que gera descontinuidade de dados, quando se trata de monitoramento (Franz *et al.* 2021). Apesar de o Brasil contar com a ANA, os dados muitas vezes não são contínuos espacial e temporalmente. Logo, alterações de compreendam as necessidades do monitoramento contínuo é fundamental para entendimento de fenômenos e dinâmica dos processos hidrogeoquímicos.

8.2 VARIAÇÃO ESPACIAL

No estudo de aplicação deste trabalho, a maré emergiu como a principal influenciadora da variação espacial da cor da água, apoiada por fortes correlações e resultados de semivariância na maré alta em comparação com a maré baixa. A forte e consistente hidrodinâmica da região foi um fator determinante sobre a distribuição de materiais em

suspensão e no seu transporte, por conseguinte, as variações espaciais de distribuição dos sedimentos, de forma geral, tivessem altas variações na superfície. Além disso, a influência da morfologia de fundo da região desempenhou papel importante na distribuição de sedimentos e diferentes regiões com diferentes velocidades de corrente. Esses fatores causados pela entrada do rio e pelo regime de marés, contribui para os padrões espaciais observados, onde sobre zonas profundas e com alta velocidade, houve menores concentrações de sedimentos. Estudos anteriores de Silva *et al.* (2020) corroboram esses achados, destacando o papel da influência das marés na alteração da turbidez da água e da distribuição dos sedimentos.

8.2.1 As alterações na vazão fluvial

Além da maré, a vazão fluvial, que também sobre influência do barramento dos oceanos, teve papel importante no entendimento da distribuição e variação espacial da cor da água. Durante o período menos chuvoso, caracterizado por menor vazão fluvial em comparação com o período mais chuvoso, a vazão do estuário foi de aproximadamente 13.000 m³/s, significativamente inferior à média do período mais chuvoso de cerca de 28.000 m³/s (Prestes *et al.* 2020).

Essa redução na vazão do rio impacta notavelmente o transporte e a dispersão de sedimentos no estuário do rio Pará, permitindo que a cunha de sal penetre mais profundamente, alterando a cor da água dependendo da fase da maré.

A entrada de água do rio Pará muda de rios ricos em sedimentos, como o Amazonas e o Guamá, para o rio Tocantins, que tem menor concentração de sedimentos. Prestes *et al.* (2020) constataram que a bacia do rio Araguaia-Tocantins contribui com 52% da vazão do rio Pará, com a bacia amazônica contribuindo com 44%. As variações sazonais mostram que o rio Tocantins contribui mais no primeiro semestre do ano, enquanto a Bacia Amazônica contribui mais no segundo semestre. Apesar da redução da descarga fluvial, o transporte de sedimentos permanece substancial durante a maré baixa devido à forte descarga de água que continua a empurrar a água do mar, resultando num aumento da turbidez e dispersão de sedimentos na superfície (Gensac *et al.* 2016).

8.2.2 Dinâmica das marés e seu impacto na cor da água

Durante a maré alta, o estuário do rio Pará testemunha um influxo substancial de água do mar anualmente, ocupando o quinto lugar mundial com 664 km³ (Prestes *et al.* 2020). Por outro lado, a maré baixa vê um fluxo significativo de água do rio e sedimentos em direção ao

mar, alterando o volume estuarino, a direção da corrente (NE) e a cor da água. A dominância do rio durante a maré baixa retarda as correntes, impactando o transporte de sedimentos (Azevedo *et al.* 2023).

Esses efeitos se manifestam no volume, na direção da corrente (sudoeste) e na cor da água. Um maior volume de água altera as correntes, resultando em zonas de cores distintas influenciadas pelas correntes dos rios e pelas forças oceânicas. Correntes mais lentas durante a maré baixa aumentam a sedimentação, mas levam a uma cor da água mais uniforme devido à dispersão fina dos sedimentos.

Em áreas de correntes de maré de baixa energia, zonas menos turvas estão dentro dos canais, enquanto zonas turvas se formam devido ao relevo subaquático e às correntes de maré (Figura 14). A mistura mínima permite distinções espaciais claras (Azevedo *et al.* 2023). Zonas turvas em áreas rasas contrastam com zonas menos turvas em áreas mais profundas, influenciadas pelas correntes fracas e pela composição geológica da região (Corrêa 2005).

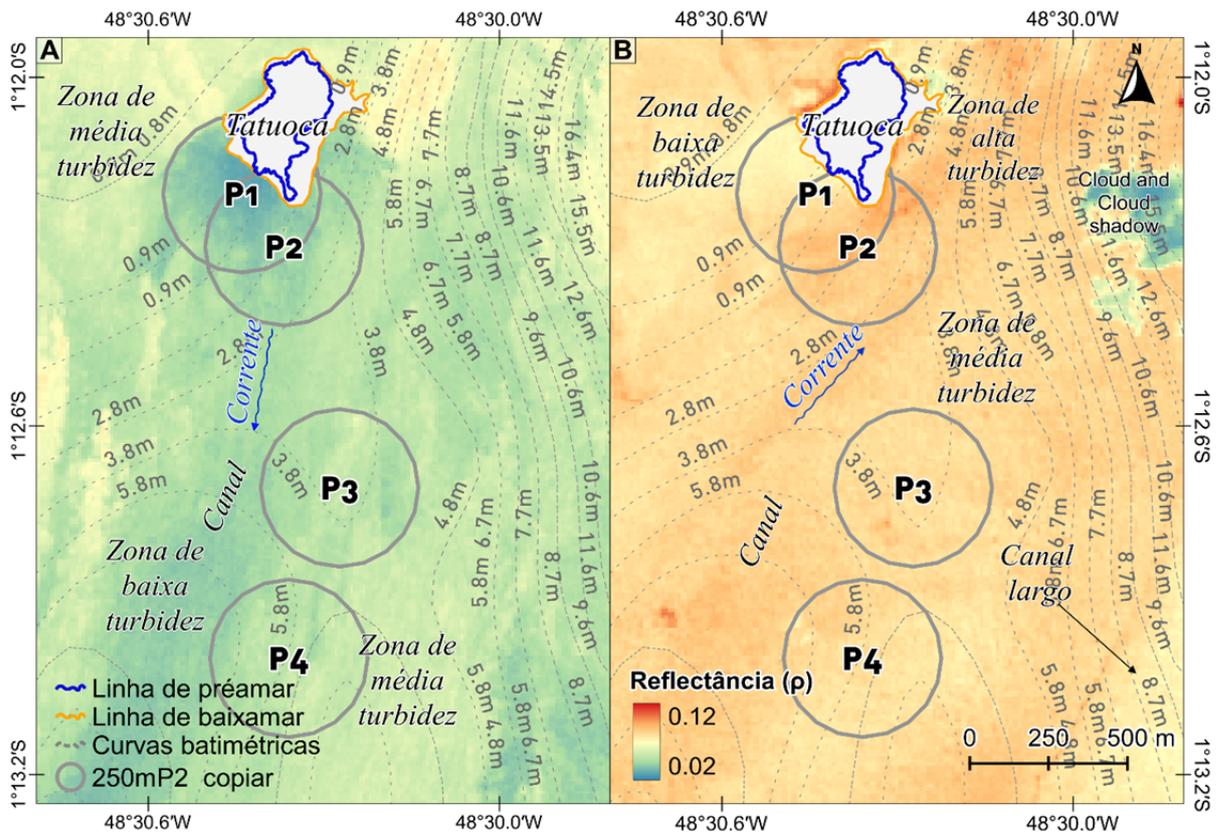


Figura 14 – Zonas de turbidez de acordo com a maré.

A: Maré alta, Sentinel-2 (04/07/2023); B: Maré baixa, Sentinel-2 (09/12/2023); TI: Ilha Tatuoca. Fatiamento linear em cores falsas da banda vermelha.

As distinções na superfície da água entre as zonas de cores turvas e menos turvas criam transições nítidas, influenciadas pelos padrões atuais, impactando a reflectância devido aos níveis variáveis de sedimentos suspensos, e conseqüentemente as estimativas de SSSC e TSS (Zhan *et al.* 2019). Visualmente, a cor da água é influenciada pelos componentes opticamente ativos. Dentre estes, o mais característico nessa região são os sedimentos em suspensão, que dão um tom específico as cores da água da região. Logo, áreas com maior concentração de material em suspensão terá menos transparência e conseqüentemente a cor é distinta, formando assim, as zonas de cores na água.

Com a mudança de maré da alta para a baixa, existe a persistência de formação de zonas de cores. Nesse estado da maré, a distribuição do material em suspensão é bem distribuída e predominantemente uniforme por toda a região. Alguns agentes, como maré de enchente, picos de velocidade e intrusão de água costeira são causadores das formações de zonas de cores, agora podem ser menos proeminentes, porém ainda interferem na cor da água superficial durante a maré alta.

Dentre os agentes, são eles a topografia de fundo variadas, a alteração das velocidades de corrente, estas por sua vez contribuem para a dispersão e/ou ressuspensão de sedimentos, com áreas de relevo mais elevado promovendo deposição de sedimentos e aumento de turbidez. Entretanto, a região da área de estudo é uma área muito dinâmica, o que gera a não permanência dos sedimentos mais finos nessa área, fazendo que eles estejam sempre em transporte.

Outro agente importante no entendimento dos resultados, é a localização das estações de monitoramento, elas se encontram em uma zona de “sombra”. A zona de sombra é o efeito de represamento da Ilha Tatuoca, na maré alta, especificamente, as estações ficam atrás da ilha, quando pensamos em direção de correntes. Isto aumenta o acúmulo de sedimentos na porção oposta aos pontos, resultando zonas de cores uniforme da água e amplo espectro de dispersão de sedimentos (Gregório & Mendes 2009). Os sedimentos suspensos elevados alteram significativamente os níveis de reflectância dentro destas zonas (Toniolo *et al.* 2018).

Durante as fases de enchente e vazante, os picos de velocidade das correntes são particularmente importantes, uma vez que a ressuspensão de sedimentos contribui significativamente para a turbidez e o transporte de material particulado. Estudos mostram que essas fases podem atingir velocidades de corrente superiores a 1,5 m/s em áreas estuarinas

similares, causando aumento temporário nos níveis de sedimentos suspensos e afetando diretamente a refletância e a cor da água (Gomes *et al.* 2021).

Além disso, o ciclo sizígia-quadratura desempenha um papel relevante na modulação das marés, alterando significativamente os padrões de circulação e os níveis de turbidez. Durante as marés de sizígia, as forças gravitacionais combinadas do Sol e da Lua resultam em marés mais altas e correntes mais intensas, o que intensifica tanto o transporte de sedimentos quanto a formação de zonas de cor da água. Por outro lado, durante as marés de quadratura, a redução das forças gravitacionais combinadas leva a correntes mais fracas e uma sedimentação mais pronunciada (Santos *et al.* 2021).

As marés equinociais, que ocorrem nos períodos de março-abril e setembro-outubro, têm um impacto substancial devido à amplitude consideravelmente maior nessas épocas do ano. Nessas marés, a intrusão de água costeira e a ressuspensão de sedimentos são mais pronunciadas, levando à formação de zonas de cor mais intensas e maior variação na turbidez. Dados observacionais sugerem que os períodos equinociais podem intensificar a dispersão de sedimentos e aumentar a área de influência das zonas de alta turbidez (Gregório & Mendes, 2009, Toniolo *et al.* 2018).

8.2.3 Implicações das marés nas métricas de variação espaciais

A análise espacial destacou as configurações das marés que influenciam a dependência espacial e a variabilidade da cor da água nas áreas de monitorização.

A maré alta apresentou menor dependência espacial e maior variabilidade em distâncias mais curtas, enquanto a maré baixa apresentou maior dependência espacial e menor variabilidade (Amaral *et al.* 2013). Diferenças significativas nos dados coletados foram observadas durante a maré alta, com dependência espacial em distâncias maiores e menor variabilidade, enquanto a maré baixa apresentou diferenças menores, atribuídas à homogeneidade de cores das interações hidrodinâmicas (Farzaneh *et al.* 2022).

As correntes de maré influenciaram significativamente os fenômenos sedimentares, impactando as métricas de variabilidade espacial e gerando resultados distintos. O teste de sazonalidade é crucial para compreender as mudanças nas características geométricas da cor da água, afetando potencialmente as correlações e a dependência espacial. Zonas de cores distintas formadas devido à entrada de água oceânica e ao redirecionamento da corrente pela

Ilha de Tatuoca, influenciadas pela sua presença alterando a direção da corrente e a distribuição de sedimentos (Toniolo *et al.* 2018).

As diferentes cores das águas decorreram das velocidades das correntes de maré influenciadas pela geomorfologia do fundo, particularmente dos canais e suas geometrias, que distribuíram de forma desigual os sedimentos transportados ou suspensos. As velocidades médias das correntes apoiaram a formação de zonas de turbidez distintas devido ao influxo de água oceânica (Azevedo *et al.* 2023).

8.3 VARIAÇÃO TEMPORAL

8.3.1 Efeitos sazonais na reflectância

A sazonalidade e fenômenos climáticos surgem como os principais impulsionadores da variação da concentração de SSSC e TSS, evidenciada por respostas espectrais alinhadas com os ciclos sazonais. Os testes de variância confirmam agrupamentos distintos dos dados de reflectância mensal, refletindo padrões sazonais. A variação de SSSC e TSS são influenciados pela sazonalidade, impactando as características da água e a dinâmica estuarina

Os ciclos de marés e sazonais influenciam conjuntamente a concentração de sedimentos. A maré alta durante a estação chuvosa diminui a concentração deles devido ao aumento do influxo de água e da diluição de sedimentos (Zhan *et al.* 2019). Por outro lado, a maré alta no período menos chuvoso eleva a concentração devido à maior concentração de sedimentos. Picos de concentração de SS durante o período menos chuvoso devido à redução do volume de água estuarina (Gensac *et al.* 2016).

Variações bruscas e significativas, possivelmente ligadas a eventos climáticos como a baixa reflectância mediana de 2021, sublinham o impacto das mudanças nos ciclos sazonais (Morera *et al.* 2017). As fortes chuvas, especialmente na primeira metade do ano, levam ao aumento da cobertura de nuvens, potencialmente distorcendo as análises devido a conjuntos de dados menores da estação chuvosa (Fu *et al.* 2022).

Embora a incidência de nuvens esteja correlacionada com as chuvas regionais, ela impacta indiretamente a reflectância, alterando o fluxo do rio e a cor da água ao longo do tempo. Mudanças significativas nas propriedades da água, impulsionadas por fatores como descarga e estratificação de água doce, moldam a dinâmica sazonal dos sedimentos (Zhan *et al.* 2019).

Uma compreensão abrangente da dinâmica do transporte de sedimentos necessita de modelagem de sedimentos ao longo do ciclo sazonal, enfatizando a necessidade de diferenciar os períodos sazonais para obter resultados estatísticos precisos.

8.3.2 Implicações dos sedimentos na reflectância

As mudanças sazonais impactam profundamente o volume e o fluxo do rio, alterando a cor da água devido a mudanças nas chuvas e no subsequente escoamento. Variações na cor da água refletem mudanças na concentração de sedimentos, afetando a reflectância através da dispersão da luz.

As flutuações no volume de água contribuem para mudanças de reflectância, influenciadas pelas marés que afetam o transporte de sedimentos. As oscilações de reflectância correlacionam-se com as flutuações de concentração de sedimentos nas escalas lunar e sazonal, com aumento da reflectância de sedimentos suspensos. A reflectância apresenta variações diárias e trimestrais devido ao ciclo das marés e à sazonalidade (Gardner *et al.* 2021).

A compreensão da variação temporal é complexa devido às variações na tonalidade e opacidade da água, influenciadas pela carga de sedimentos e pela dinâmica das marés. O ciclo lunar impacta significativamente a concentração de sedimentos, levando a diversas alterações de reflectância. A dinâmica das marés influencia fortemente a concentração de sedimentos, afetando o transporte e a dispersão (Carneiro *et al.* 2020).

Propõe-se testar a resposta em todos os estágios da maré em diferentes períodos sazonais para compreender as variações na concentração de sedimentos e suas implicações na reflectância

8.3.3 Implicações dos fenômenos climáticos ao longo da década na reflectância

A reflectância exibiu variabilidade anual e sazonal ao longo da década analisada, com estabilidade geral. Pequenas flutuações interanuais foram potencialmente influenciadas por variações de temperatura ligadas aos fenômenos El Niño e La Niña no Oceano Pacífico (Morera *et al.* 2017), impactando a circulação atmosférica global, o transporte de umidade e os padrões de precipitação.

Os fenômenos ENSO influenciam a frequência relativa da precipitação, afetando as flutuações anuais de reflectância. O aumento das taxas de precipitação pode elevar a descarga

de água do rio, aumentando a capacidade de transporte de sedimentos (Morera *et al.* 2017), impactando conseqüentemente os valores de reflectância (Toniolo *et al.* 2018). A monitorização da água a longo prazo deverá ter em conta estes fenómenos climáticos.

Compreender as influências climáticas na cor da água, incluindo padrões de fluxo, volume e temperatura, é crucial para interpretar variações de reflectância, particularmente padrões de descarga de sedimentos

8.3.4 Implicações estatísticas para métricas temporais

O teste ANOVA revelou diferenças estatisticamente significativas entre os meses, indicando distribuição de reflectância distinta ao longo do ano. O teste de Tukey-Kramer confirmou ainda mais esses resultados, revelando três grupos distintos: períodos chuvosos, menos chuvosos e de transição, apoiando interpretações da variação sazonal da reflectância.

No entanto, a igualdade da ANOVA e as restrições de ordem podem introduzir heterogeneidade na distribuição dos dados ao longo do tempo (Fu *et al.* 2022). É aconselhável empregar métodos mais robustos para identificar influências do transporte de marés e sedimentos nos aglomerados. Em relação às implicações amostrais, os resultados da ANOVA sugerem consistência no comportamento da cor da aquarela no mesmo mês em todas as séries analisadas. A cobertura de nuvens durante a estação chuvosa representou desafios na identificação de tendências, complicando a análise e a determinação do nível de reflectância (Fu *et al.* 2022). As tendências de variação diária não puderam ser estabelecidas devido às limitações da escala de tempo da imagem.

Sugerindo uma abordagem multisensor com resolução temporal diária. Para abordar a heterogeneidade dos dados e a variabilidade temporal, são recomendados métodos estatísticos robustos, como análise de séries temporais ou modelos mistos. Além disso, a utilização de múltiplas bandas, como as bandas AZUL, VERDE e NIR, demonstrou ser uma abordagem eficaz para análise de sedimentos. A utilização exclusiva da faixa vermelha restringe o escopo da análise ao estabelecimento de concentrações e ao fornecimento de dados de variação mais precisos. No entanto, a compreensão da variação da luz é essencial para aplicações mais específicas, como a estimativa da concentração de sedimentos.

9 CONCLUSÃO

Este estudo demonstra que a cor da água na região da Ilha de Tatuoca apresenta significativa variação espacial e temporal, influenciadas por marés, relevo subaquático e hidrodinâmica. A sazonalidade, fenômenos climáticos globais e a nebulosidade também impactam a cor da água.

A análise da variação espacial da cor da água na região da Ilha de Tatuoca revela a influência das marés, principalmente nas interações maré de enchente e vazante, Sízigi e Quadraturae além dos efeitos das marés equinociais, primacialmente entre março-abril e setembro-outubro. Ora, o relevo subaquático e a ativa hidrodinâmica da região também foram agentes influenciadores nas variações captadas. As implicações para a coleta de dados são significativas e devem ser consideradas para garantir a qualidade e representatividade dos resultados.

A análise da variação temporal da cor da água na região da Ilha de Tatuoca revela a influência da sazonalidade, dos fenômenos climáticos globais e da nebulosidade. As implicações para a recolha de dados e monitorização a longo prazo da cor da água são significativas e devem ser consideradas para garantir a qualidade e representatividade dos resultados.

Recomenda-se que a distância e a frequência da amostragem sejam ajustadas de acordo com as variações de marés e de sazonalidade para garantir que os dados sejam recolhidos com os efeitos da variação sobre eles. Além disso, utilizar métodos estatísticos avançados e correções atmosféricas específicas para ambientes aquáticos para garantir a qualidade dos dados para as análises estatísticas e estatísticas. Por fim, recomenda-se a utilização de ferramentas estatísticas robustas que considerem a heterogeneidade dos dados para melhor compreender a influência sazonal na reflectância. Além disso, é aconselhável o uso de correções atmosféricas, como por exemplo do tipo Empírica (*Empirical Line Method - ELM*), para fins de estudo da óptica aquática. Por fim, são necessários dados em menor escala espaço-temporal para delimitar essas variações em menor escala, o que não foi possível com os dados orbitais disponíveis.

REFERÊNCIAS

- Adjovu G.E., Stephen H., James D., Ahmad S. 2023. Overview of the application of remote sensing in effective monitoring of water quality parameters. *Remote Sensing*, **15**(7): e1938. <https://doi.org/10.3390/RS15071938>.
- Amaral L. de P., Ferreira R.A., Watzlawick L.F., Longhi S.J., Sebem E. 2013. Influência da floresta alterada na distribuição espacial de três espécies da Floresta Ombrófila Mista avaliada pela geoestatística. *Revista Árvore*, **37**(3):491–501. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300012>.
- Agência Nacional de Águas-ANA. 2022. *Dados das séries históricas das estações convencionais da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*. Disponível em: <https://github.com/anagovbr/hidro-dados-estacoes-convencionais>. Acesso em: 26 abr. 2024.
- Aria M. & Cuccurullo C. 2017. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, **11**(4):959–975. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2017.08.007>.
- Azevedo T.N.A., El-Robrini M., Saavedra O.R. 2023. Assessment of tidal current potential in the Pará River Estuary (Amazon Region – Brazil). *Cleaner Energy Systems*, **6**: e100091. <https://doi.org/10.1016/J.CLES.2023.100091>.
- Barbosa C.C.F., Novo E.M.L.M., Martins V.S. (ed). 2019. *Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações*. 1. ed. São José dos Campos: [INPE]. Disponível em: <https://www.dpi.inpe.br/labisa/livro/>.
- Beck H.E., Zimmermann N.E., McVicar T.R., Vergopolan N., Berg A., Wood E.F. 2018. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, **5**(1):1–12. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>.
- Boyd R., Dalrymple R.W., Zaitlin B.A. 2011. Estuarine and incised-valley facies models. *Facies Models Revisited*, **6**(84):171–235. <https://doi.org/10.2110/PEC.06.84.0171>.
- Carneiro A.G., Prestes Y.O., Rollnic M. 2020. Estimates of suspended solid transport in the Pará River Estuary. *Ocean and Coastal Research*, **68**:e20281. <https://doi.org/10.1590/S2675-28242020068281>.
- Corrêa I.C.S. 2005. Aplicação do diagrama de Pejrup na interpretação da sedimentação e da dinâmica do estuário da baía de Marajó-PA. *Pesquisas em Geociências*, **32**(2):109–118. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.19551>.
- Dalrymple R.W., Zaitlin B.A., Boyd R. 1992. Estuarine facies models: conceptual basis and stratigraphic implications. *Journal of Sedimentary Research*, **62**(6):1130–1146. <https://doi.org/10.1306/D4267A69-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- Du Plessis A. 2023. Fragmented water governance, institutional problems and questionable decisions. *In: South Africa's Water Predicament: Freshwater's Unceasing Decline*. Cham: Springer International Publishing. p. 67-87. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24019-5_4.
- Erkens G., Bux T., Dam R., de Lange G., Lambert J. 2015. Sinking coastal cities. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, **372**:189–198. <https://doi.org/10.5194/PIAHS-372-189-2015>.

European Space Agency-ESA. 2022. *Sen2Cor – STEP*. Disponível em:

<https://step.esa.int/main/snap-supported-plugins/sen2cor/>. Acesso em: 20 abr. 2024.

Farzaneh G., Khorasani N., Ghodousi J., Panahi M. 2022. Application of geostatistical models to identify spatial distribution of groundwater quality parameters. *Environmental Science and Pollution Research*, **29**(24):36512–36532. <https://doi.org/10.1007/S11356-022-18639-8>.

Fassoni-Andrade A.C. & Paiva R.C.D. 2019. Mapping spatial-temporal sediment dynamics of river-floodplains in the Amazon. *Remote Sensing of Environment*, **221**:94–107. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2018.10.038>.

Franz G., Garcia C. A. E., Pereira J., de Freitas Assad L. P., Rollnic M., Garbossa L. H. P., da Cunha L. C., Lentini C. A. D., Nobre P., Turra A., Trotte-Duhá J. R., Cirano M., Estefen S. F., Lima J. A. M., Paiva A. M., Noernberg M. A., Tanajura C. A. S., Moutinho J. L., Campuzano F., Pereira E. S., Lima A. C., Mendonça L. F. F., Nocko H., Machado L., Alvarenga J. B. R., Martins R. P., Böck C. S., Toste R., Landau L., Miranda T., dos Santos F., Pellegrini J., Juliano M., Neves R., Polejack A.. 2021. Coastal Ocean Observing and Modeling Systems in Brazil: Initiatives and Future Perspectives. *Frontiers in Marine Science*, **8**:681619. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.681619>.

Fu Q., Moerbeek M. & Hoijtink H. 2022. Sample size determination for Bayesian ANOVAs with informative hypotheses. *Frontiers in Psychology*, **13**:947768. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2022.947768>.

Gao S., Dong G., Jiang X., Nie T., Guo X. 2023. Analysis of factors influencing spatiotemporal differentiation of the NDVI in the upper and middle reaches of the Yellow River from 2000 to 2020. *Frontiers in Environmental Science*, **10**:1072430. <https://doi.org/10.3389/FENVS.2022.1072430>.

Gardner J.R., Yang X., Topp S.N., Ross M.R.V., Altenau E.H., Pavelsky T.M. 2021. The Color of Rivers. *Geophysical Research Letters*, **48**(1):e2020GL088946. <https://doi.org/10.1029/2020GL088946>.

Gensac E., Martinez J.M., Vantrepotte V., Anthony E.J. 2016. Seasonal and inter-annual dynamics of suspended sediment at the mouth of the Amazon river. *Continental Shelf Research*, **118**:49–62. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2016.02.009>.

Gomes V.J.C., Asp N.E., Siegle E., Gomes J.D., Silva A.M.M., Ogston A.S., Nittrouer C.A. 2021. Suspended-sediment distribution patterns in tide-dominated estuaries on the eastern Amazon coast. *Water (Switzerland)*, **13**(11):1568. <https://doi.org/10.3390/W13111568>.

Gregório A.M.S. & Mendes A.C. 2009. Characterization of sedimentary deposits at the confluence of two tributaries of the Pará River estuary. *Continental Shelf Research*, **29**(3):609–618. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2008.09.007>.

Gregório A.M.S. & Mendes A.C. 2009. Batimetria e sedimentologia da Baía do Guajará, Belém, Estado do Pará, Brasil. *Amazônia: Ciência & Desenvolvimento*, 9:53.

Griggs G. & Reguero B.G. 2021. Coastal Adaptation to Climate Change and Sea-Level Rise. *Water*, **13**(16):2151. <https://doi.org/10.3390/W13162151>.

- Hafeez S., Wong M.S., Abbas S., Asim, M. 2022. Evaluating Landsat-8 and Sentinel-2 Data Consistency for High Spatiotemporal Inland and Coastal Water Quality Monitoring. *Remote Sensing*, **14**(13):3155. <https://doi.org/10.3390/RS14133155/S1>.
- Kirwan M.L. & Megonigal J.P. 2013. Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise. *Nature*, **504**(7478):53–60. <https://doi.org/10.1038/nature12856>.
- Kupssinskü L.S., Guimarães T.T., Souza E.M. de, Zanotta D.C., Veronez M.R., Gonzaga L., Mauad F.F. 2020. A Method for Chlorophyll-a and Suspended Solids Prediction through Remote Sensing and Machine Learning. *Sensors*, **20**(7):2125. <https://doi.org/10.3390/S20072125>.
- Lin Y., Liu D., Liang M., Zhang T., Huang E., Zhu Z., Jia L. 2024. Characteristics and Mechanisms of Spring Tidal Mixing and Sediment Transport in a Microtidal Funnel-Shaped Estuary. *Journal of Marine Science and Engineering*, **12**(8):1420. <https://doi.org/10.3390/JMSE12081420>.
- Miranda G.M. & Reynard E. 2020. Integrated Water Resources Management in Federations: The Examples of Brazil and Switzerland. *Water*, **12**(7):1914. <https://doi.org/10.3390/W12071914>.
- Moltmann T., Turton J., Zhang H.M., Nolan G., Gouldman C., Griesbauer L., Willis Z., Piniella Ángel M., Barrell S., Andersson E., Gallage C., Charpentier E., Belbeoch M., Poli P., Rea A., Burger E.F., Legler D.M., Lumpkin R., Meinig C., Zhang, Y. 2019. A Global Ocean Observing System (GOOS), delivered through enhanced collaboration across regions, communities, and new technologies. *Frontiers in Marine Science*, **6**(June):434259. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2019.00291/BIBTEX>.
- Moran P.A.P. 1950. Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika*, **37**(1/2):17. <https://doi.org/10.2307/2332142>.
- Moran P.A.P. 1948. The Interpretation of Statistical Maps. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, **10**(2):243–251. <https://doi.org/10.1111/J.2517-6161.1948.TB00012.X>.
- Morera S.B., Condom T., Crave A., Steer P., Guyot J.L. 2017. The impact of extreme El Niño events on modern sediment transport along the western Peruvian Andes (1968–2012). *Scientific Reports*, **7**(1):1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-12220-x>.
- Mouw C.B., Greb S., Aurin D., DiGiacomo P.M., Lee Z., Twardowski M., Binding C., Hu C., Ma R., Moore T., Moses W., Craig S.E. 2015. Aquatic Color Radiometry Remote Sensing of Coastal and Inland Waters: Challenges and Recommendations for Future Satellite Missions. *Remote Sensing of Environment*, **160**:15. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.001>.
- Nittrouer C.A., DeMaster D.J., Kuehl S.A., Figueiredo A.G., Sternberg R.W., Faria L.E.C., Silveira O.M., Allison M.A., Kineke G.C., Ogston A.S., Souza Filho P.W.M., Asp N.E., Nowacki D.J., Fricke A.T. 2021. Amazon Sediment Transport and Accumulation along the Continuum of Mixed Fluvial and Marine Processes. *Annual Review of Marine Science*, **13**:501–536. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV-MARINE-010816-060457/CITE/REFWORKS>.
- Omachi C.Y., Asp N.E., Siegle E., Couceiro M.A.A., Francini-Filho, R.B., Thompson, F.L. 2019. Light availability for reef-building organisms in a plume-influenced shelf. *Continental Shelf Research*, **181**:25–33. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2019.05.005>.

- Pan Y., Gong J., Li J. 2022. Assessment of Remote Sensing Ecological Quality by Introducing Water and Air Quality Indicators: A Case Study of Wuhan, China. *Land*, **11**(12):2272. <https://doi.org/10.3390/LAND11122272>.
- Preste Y.O., Silva A.C., Rollnic M., Rosário, R.P. 2017. The M2 And M4 Tides in the Pará River Estuary. *Tropical Oceanography*, **45**(1):26–37. <https://doi.org/10.5914/TROPOCEAN.V45I1.15198>.
- Prestes Y. O., Borba T. A. da C., Silva A. C. da, Rollnic M. 2020. A discharge stationary model for the Pará-Amazon estuarine system. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **28**: 100668, 1 Apr. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100668>.
- Prestes Y. O. Silva A. C., Rollnic M., Rosário R. P. 2017. The M2 And M4 Tides in the Pará River Estuary. *Tropical Oceanography*, **45**(1): 26–37, 7 May 2017. <https://doi.org/10.5914/TROPOCEAN.V45I1.15198>.
- Qiang S., Song K., Shang Y., Lai F., Wen Z., Liu G., Tao H., Lyu Y. 2023. Remote sensing estimation of CDOM and DOC with the environmental implications for Lake Khanka. *Remote Sensing*, **15**(24): 5707, 1 Dec. 2023. <https://doi.org/10.3390/RS15245707/S1>.
- Révelard A., Tintoré J., Verron J., Bahurel P., Barth J. A., Belbéoch M., Benveniste J., Bonnefond P., Chassignet E. P., Cravatte S., Davidson F., Deyoung B., Heupel M., Heslop E., Hörstmann C., Karstensen J., Le Traon P. Y., Marques M., McLean C., Williams B. 2022. Ocean integration: The needs and challenges of effective coordination within the ocean observing system. *Frontiers in Marine Science*, **8**: 737671, 25 Jan. 2022. <https://doi.org/10.3389/FMARS.2021.737671/BIBTEX>.
- Rosário R. P., Borba T. A. C.z Santos A. S., Rollnic M. 2016. Variability of salinity in Pará River estuary: 2D analysis with flexible mesh model. *Journal of Coastal Research*, **1**(75): 128–132, 1 Mar. 2016. <https://dx.doi.org/10.2112/SI75-026.1>.
- Rosenberg M. S. & Anderson C. D. 2011. PASSaGE: Pattern analysis, spatial statistics and geographic exegesis. *Methods in Ecology and Evolution*, **2**(3): 229–232, 1 Jun. 2011. <https://doi.org/10.1111/J.2041-210X.2010.00081.X>.
- Samaras A. G. & Koutitas C. G. 2014. Modeling the impact of climate change on sediment transport and morphology in coupled watershed-coast systems: A case study using an integrated approach. *International Journal of Sediment Research*, **29**(3): 304–315, 1 Sep. 2014. [https://doi.org/10.1016/S1001-6279\(14\)60046-9](https://doi.org/10.1016/S1001-6279(14)60046-9).
- Serviço Geológico Brasileiro-CPRM-SGB. *Repositório Institucional de Geociências: Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Belém*. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/4969?mode=full>. Acesso em: 22 set. 2024.
- Silva A. M. M., Asp N. E., Gomes V. J. C., Ogston A. S. 2023. Impacts of inherited morphology and offshore suspended-sediment load in an Amazon estuary. *Estuaries and Coasts*, **46**(7): 1709–1722, 1 Nov. 2023. <https://doi.org/10.1007/S12237-023-01253-3/FIGURES/9>.
- Silva S. B., Galvão J. R., Pastana J. C., Silva D. R., Almeida K. C., Souza F. J. L., Nascimento I. S. B. 2018. Influência das águas do estuário do Rio Pará na fertilidade do solo das ilhas de várzea em Belém, Pará. *Biotemas*, **31**(4): 15–21, 29 Nov. 2018. <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2018V31N4P15>.

- Simon G. 1997. An angular version of spatial correlations, with exact significance tests. *Geographical Analysis*, **29**(3): 267–278, 1 Jul. 1997. <https://doi.org/10.1111/J.1538-4632.1997.TB00962.X>.
- Sousa Júnior W., Baldwin C., Camkin J., Fidelman P., Silva O., Neto S., Smith T.F. 2016. Water: Drought, Crisis and Governance in Australia and Brazil. *Water*, **8**(11): e493. <https://doi.org/10.3390/W8110493>.
- Stefani M. & Vincenzi S. 2005. The interplay of eustasy, climate and human activity in the late Quaternary depositional evolution and sedimentary architecture of the Po Delta system. *Marine Geology*, **222**(1–4):19–48, 15 Nov. 2005. <https://doi.org/10.1016/J.MARGEO.2005.06.029>.
- Syvitski J. P. M., Kettner A. J., Overeem I., Hutton E. W. H., Hannon M. T., Brakenridge G. R., Day J., Vörösmarty C., Saito Y., Giosan L., Nicholls R. J. 2009. Sinking deltas due to human activities. *Nature Geoscience*, **2**(10): 681–686, 20 Sep. 2009. <https://doi.org/10.1038/ngeo629>.
- Toniolo G. R., Guasselli L. A., Arruda D. C. de, Pereira Filho W. 2018. Identificação de constituintes opticamente ativos na água do Lago Guaíba a partir de dados de sensores orbitais e espectrorradiometria de campo. *Pesquisas em Geociências*, **45**(2): e0635–e0635, 18 Dec. 2018. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.88645>.
- Twardowski M. & Tonizzo A. 2018. Ocean color analytical model explicitly dependent on the volume scattering function. *Applied Sciences*, **8**(12): 2684, 19 Dec. 2018. <https://doi.org/10.3390/APP8122684>.
- Woodroffe C. D. 2000. Deltaic and estuarine environments and their Late Quaternary dynamics on the Sunda and Sahul shelves. *Journal of Asian Earth Sciences*, **18**(4): 393–413, 1 Aug. 2000. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(99\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(99)00074-7).
- Yang H., Kong J., Hu H., Du Y., Gao M., Chen F. 2022. A review of remote sensing for water quality retrieval: Progress and challenges. *Remote Sensing*, **14**(8): 1770, 7 Apr. 2022. <https://doi.org/10.3390/RS14081770>.
- Ye H., Chen C., Tang S., Tian L., Sun Z., Yang C., Liu F. 2014. Remote sensing assessment of sediment variation in the Pearl River Estuary induced by Typhoon Vicente. *Aquatic Ecosystem Health & Management*, **17**(3): 271–279, 3 Jul. 2014. <https://doi.org/10.1080/14634988.2014.944475>.
- Zhan W., Wu J., Wei X., Tang S., Zhan H. 2019. Spatio-temporal variation of the suspended sediment concentration in the Pearl River Estuary observed by MODIS during 2003–2015. *Continental Shelf Research*, **172**: 22–32, 1 Jan. 2019. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2018.11.007>.
- Zhang H., Yan D., Zhang B., Fu Z., Li B., Zhang S. 2022. An operational atmospheric correction framework for multi-source medium-high-resolution remote sensing data of China. *Remote Sensing*, **14**(21): 5590, 5 Nov. 2022. <https://doi.org/10.3390/RS14215590>.
- Zhang Y., Giardino C., Li L. 2017. Water optics and water colour remote sensing. *Remote Sensing*, **9**(8): 818, 9 Aug. 2017. <https://doi.org/10.3390/RS9080818>.