

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA (PPGM)
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

LUIZ FELIPE MACHADO FARIA DE SOUSA

DINÂMICA DE TURBIDEZ NA BAÍA DE GUANABARA, RIO DE JANEIRO - BRASIL

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2024

LUIZ FELIPE MACHADO FARIA DE SOUSA

DINÂMICA DE TURBIDEZ NA BAÍA DE GUANABARA, RIO DE JANEIRO - BRASIL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia do Instituto de Geociências do Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Federal do Rio de Janeiro (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ), como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências Meteorologia.

Orientadores: Prof. Lino Augusto Sander de Carvalho, Dr. Sc e Prof. Mauro Cirano, Dr. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2024

DINÂMICA DE TURBIDEZ NA BAÍA DE GUANABARA, RIO DE JANEIRO - BRASIL

Luiz Felipe Machado Faria de Sousa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (IGEO) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM METEOROLOGIA.

Examinada por:

Prof. Lino Augusto Sander de Carvalho, Dr. Sc

Prof. Mauro Cirano, Dr. Sc

Prof. Priscilla Kienteca Lange, Dr. Sc

Prof. Fernanda Silva Soares, Dr. Sc

Prof. Áurea Ciotti, Dr. Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

2024

Em memória de Aurora de Jesus Faria

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por me dar coragem de ir cada vez mais longe e poder acreditar que posso crescer ainda mais como pessoa e como um sonhador que não desiste nunca de suas convicções.

Aos meus pais que dedicam suas vidas em prol de meus sonhos, por me incentivarem com pequenos gestos nos dia a dia, pelo abrigo, pelo amor, pelo carinho e por tudo que fizeram e fazem em minha vida como mais amor do que a si mesmo.

Ao meu irmão que sempre procura me manter feliz, por seu companheirismo e lealdade de sempre, irmão que sempre amarei mais.

À minha namorada e futura esposa, minha base em todos os sentidos e por quem eu acordo cedo todos os dias em busca de nossos sonhos e amor eterno.

Aos meus amigos, orientadores e banca por toda ajuda, conselho, apoio e incentivo para que eu possa alcançar meus objetivos.

*“Gazing through the window at the world outside, wondering will mother earth survive.
Hoping that mankind will stop abusing her, sometime”*

Trecho da música Dreamer - Ozzy Osbourne

Resumo

A Baía de Guanabara (BG) está submetida a uma série de pressões naturais e antrópicas que impõe alto grau de degradação à qualidade de suas águas. Determinada por variáveis meteo-oceanográfico-hidrológicas, a dinâmica espaço-temporal dos constituintes biogeoquímicos presentes na coluna de água ainda carece de maior investigação de forma a compreender seu impacto para a fauna, flora e população humana locais. Este trabalho avalia a dinâmica espaço-temporal da turbidez na BG, como proxy para a variabilidade do material em suspensão presente na coluna de água. Uma série temporal de 20 anos de dados provenientes do sensor MODIS-Terra é utilizada acompanhada de uma metodologia robusta de correção de efeitos de reflexão especular e construção de algoritmo para a estimativa da turbidez via Sensoriamento Remoto Orbital (SRO). De forma a compreender o impacto das marés na dinâmica da turbidez da BG, previsões harmônicas foram geradas para identificar regimes de enchente e vazante, e dados lunares foram usados para determinar os tipos de marés divididos em dois períodos, úmido (Novembro a Abril) e seco (Maio a Outubro). Resultados mostram que algoritmos construídos a partir de regressão polinomial de segunda ordem, apresentaram-se melhores na estimativa de turbidez por SRO. Valores de turbidez são mais altos nas regiões nordeste e noroeste da baía em ambos os períodos, no canal central e na entrada durante o período úmido, sendo maior nas marés de sizígia e menor na quadratura. Ademais, a turbidez não é possível afirmar se a turbidez é maior durante a vazante ou na enchente. A extensão das plumas dos rios foi maior para o período úmido em relação ao período seco, evidenciando a influência da circulação das águas para a distribuição dos sedimentos na baía. Avaliações futuras terão como foco o impacto de eventos meteo-oceanográfico-hidrológicos extremos na dinâmica da turbidez da BG.

Abstract

The Guanabara Bay (GB) is under a series of natural and anthropogenic pressures that impose a high degree of degradation to the water quality. Determined by meteorological-oceanographic-hydrological variables, the spatio-temporal dynamics of the its biogeochemical constituents still require further investigation in order to understand their impact on the local fauna, flora, and human population. This work evaluates the spatio-temporal dynamics of turbidity in GB, as a proxy for the variability of suspended material present in the water column. A 20-year time series of data from the MODIS-Terra sensor is used, supported by a robust methodology for correcting sunglint and skyglint effects and constructing an algorithm for estimating turbidity via Remote Sensing (RS). In order to understand the impact of tides on the dynamics of turbidity, harmonic forecasts were generated to identify flood and ebb cycles, and lunar data were used to determine the stages of tides divided into two periods, wet (November to April) and dry (May to October). Results show that algorithms built from second-order polynomial regression presented better results in estimating turbidity by RS. Turbidity values are higher in the northeast and northwest regions of the bay in both periods and in the central channel and at the entrance during the wet period, being higher at spring tides and lower at neap tides. Furthermore, it is not possible to say whether turbidity is greater during ebb or flood tide. The extent of the river plumes was greater for the wet period compared to the dry period, highlighting the influence of water circulation for the distribution of sediments in the bay. Future evaluations will focus on the impact of extreme meteorological-oceanographic-hydrological events on the dynamics of turbidity from GB.

LISTA DE FIGURAS

- Fig. 1:** Mapa da área de estudo com os nomes dos rios tributários e a batimetria (m) 4
- Fig. 2:** Mapa mostrando os 21 pontos de monitoramento da qualidade da água realizados pelo INEA na Baía de Guanabara. 7
- Fig. 3:** Melhores algoritmos de turbidez para os dados do MODIS(Terra)-INEA, GLORIA e semi-análiticos em cada teste de correção de glint na pela banda *sur_refl_b05* (estrela), *sur_refl_b06* (asterístico) e *sur_refl_b07* (letra x). A combinação banda e melhor modelo estão destacadas em cores distintas. O resultado completo da construção e validação dos algoritmos estão disponíveis nos materiais complementares (A, B e C). 13
- Fig. 4:** Mediana de turbidez nos períodos úmidos (colunas 1 e 2) e secos (colunas 3 e 4) para os regimes de marés enchente (números ímpares) e vazante (números pares) nos tipos de marés de sizígia (linha a), transição (linha b) e quadratura (linha c) entre 21 de dezembro de 2000 a 20 de dezembro de 2023. O valor de n equivale ao número de imagens para qual foi calculada a mediana. Os dois contornos batimétricos em destaque representam as isóbatas de 3 m e 10 m. 15
- Fig. 5:** Diferença entre as marés de enchente e vazante nos períodos úmidos (linha 1) e secos (linha 2) para as marés de sizígia (coluna a), transição (coluna b) e quadratura (coluna c) entre 21 de Dezembro de 2000 a 20 de Dezembro de 2023. As cores azuis (vermelhas) indicam maiores (menores) valores de turbidez para as marés de enchente (vazante) e as cores esbranquiçadas indicam pouca diferença entre os valores de turbidez entre as marés. 18

LISTA DE TABELAS

Tab. 1: Tabela de equações das técnicas de regressão e aprendizado de máquina.	9
Tab. 2: Tabela dos hiperparâmetros procurados pelo <i>GridSearch</i> para os modelos RF e SVR.	10
Tab. 3: Tabela de algoritmos globais de estimativa da turbidez.	12
Tab. 4: Tabela de métricas estatísticas.	12
Tab. 5: Comparação de algoritmos de turbidez	20

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACAS - Água Central do Atlântico Sul

BG - Baía de Guanabara

GEE - Google Earth Engine

GLORIA - GLObal Reflectance community dataset for Imaging and optical sensing of Aquatic environments

MAPE - The Mean Absolute Percentage Error

MODIS - Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

R² - Coeficiente de Determinação

RMRJ - Região Metropolitana do Rio de Janeiro

RMSE - Root Mean Squared Error

SiMCosta - Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira

TSS - Totais de Sólidos em Suspensão

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Dados e Métodos	4
2.1. Área de Estudo	4
2.2. Dados <i>in situ</i>	7
2.2.1. Dados de turbidez medidos pelo INEA na Baía de Guanabara	7
2.2.2. Dados globais da base GLORIA	8
2.3. Métodos	8
2.3.1. Pré-Processamento de imagens na plataforma GEE	8
2.3.2. Modelos de regressão e aprendizado de máquina	9
2.3.3. Algoritmos de estimativa da turbidez	10
2.3.4. Análises estatísticas	12
2.3.5. Avaliações espaços-temporais da turbidez	12
3. Resultados	13
3.1. Escolha do algoritmo de estimativa da turbidez	13
3.2. Distribuição espaço-temporal da turbidez	15
3.3. Diferença entre os regimes de marés	18
4. Discussão	19
4.1. O algoritmo de turbidez	19
4.2. Comparação de algoritmos MODIS (Terra) para regiões estuarinas	20
4.3. Dinâmica de turbidez na Baía de Guanabara	21
4.4. Monitoramento contínuo da turbidez	23
5. Considerações Finais	24
Referências Bibliográficas	26
ANEXOS	33
MATERIAL COMPLEMENTAR	38

1. Introdução

A distribuição sinótica de materiais suspensos em estuários é influenciada principalmente pela confluência das águas de rios e oceanos, variações nas correntes de maré e condições meteorológicas que influem na interação entre os fatores biogeoquímicos (D'Sa et al., 2007; Eleveld et al., 2014; King et al., 2019; Zhang et al., 2020; Yunus et al., 2021; Richardson et al., 2023). A turbidez é reconhecidamente um *proxy* da quantidade de material em suspensão na água, sendo um indicador importante da qualidade da água em estuários. Estudos têm mostrado que a turbidez está associada a uma série de danos ambientais, incluindo a redução da penetração da luz solar, florações de algas tóxicas e o declínio da biodiversidade (Gitelson et al. 2007; Katlane *et al.* 2013; Terauchi *et al.* 2014; Liu *et al.* 2023; Rocher *et al.* 2023; Adjovu et al., 2023).

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), historicamente, desenvolveu-se ao redor da BG, neste sentido, a baía desempenha um importante papel socioeconômico com um intenso zoneamento urbano/industrial que abrange áreas domiciliares, atividades petroquímicas, pontos de estaleiros, marinas, serviços de transportes urbanos como barcas e a ponte presidente Costa e Silva (Rio-Niterói), atividades pesqueiras, práticas de esportes náuticos, praias e outras atividades que impulsionam os setores de serviço, comércio e turismo (Fries et al., 2019). Porém, o crescimento urbano no entorno da BG não foi acompanhado de práticas de desenvolvimento sustentável causando problemas graves de poluição hídrica (Fistarol et al., 2015; Soares-Gomes et al., 2016). Em função disso, a contaminação na baía ocorre principalmente pelo despejo de esgoto doméstico sem tratamento ao longo de sua bacia hidrográfica e através do esgotamento sanitário gerado pelas atividades industriais nas áreas adjacentes e internas, somado ao descarte de óleo por atividades portuárias/marítimas e a lixiviação de resíduos urbanos (da Silveira et al., 2011; Cordeiro et al., 2015; Costa, Pessoa e Carreira, 2018).

A complexidade da baixa qualidade da água na BG é agravada pela entrada majoritária de contaminantes pelos rios tributários, concentrando-se nos setores oeste/noroeste e norte. O setor oeste/noroeste, caracterizado pela maior área urbana do estado e intensa atividade portuária, exhibe altos níveis de eutrofização, presença de metais pesados, microplásticos e contaminação biológica devido ao maior escoamento de água contaminada para a baía (Senez-Mello et al., 2024; Olivatto et al., 2019; Cotovicz et al., 2017; Oliveira et al., 2016; Baptista-Neto et al., 2006). Na região norte, com importantes pólos petroquímicos, incidentes de vazamentos de petróleo têm sido recorrentes, afetando outras áreas da baía, incluindo os manguezais no nordeste (Brito et al., 2009). A região nordeste, que abriga a

Estação Ecológica da Guanabara (ESEC-Guanabara), tende a apresentar melhores condições devido à menor interferência humana, preservação dos manguezais e menor velocidade de escoamento dos rios, com maior retenção dos materiais (Soares-Gomes et al., 2016). No setor leste, com a segunda maior área urbana do estado, apesar da ausência de grandes rios desaguando na baía, pequenos cursos d'água e atividades portuárias contribuem para a eutrofização, contaminação biológica e metais pesados, embora em menor magnitude em relação ao setores oeste/noroeste devido à maior renovação das águas (Senez-Mello et al., 2024; Fries et al., 2019; Fistarol et al., 2015). O canal central, beneficiado pela maior diluição de poluentes devido às maiores velocidades de corrente, profundidades e influência das águas oceânicas, apresenta condições melhores em comparação com os setores oeste/noroeste e leste (Fries et al., 2019; Fistarol et al., 2015). A região de entrada também apresenta melhores condições ambientais devido à sua localização na borda da plataforma oceânica, permitindo uma renovação constante das águas (Soares-Gomes et al., 2016; Fistarol et al., 2015).

Diante de sua importância socioeconômica e ambiental para a sobrevivência de espécies marinhas, a BG é monitorada desde a década de 1980 pela extinta Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (FEEMA) e, posteriormente, pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), com maior frequência de monitoramento a partir de 2012 até o presente, sendo 21 pontos de coleta da água a cada 3 meses. No entanto, diversos estudos associados aos dados da FEEMA/INEA levam em consideração um curto período de tempo, ou análises pontuais com pouca informação espacial (Ribeiro e Kjerfve, 2002; Barros et al., 2003). Ademais, os estudos de séries históricas sobre a turbidez na BG são escassos (Barros et al., 2003), tampouco a compreensão de sua dinâmica espaço-temporal, sendo uma importante lacuna a ser preenchida. Iniciativas do Laboratório de Análises de Satélites Ambientais da Universidade Federal do Rio de Janeiro, por meio da plataforma Alarmes-Água (LASA Alarmes-Água) pretendem diminuir essa lacuna com a hospedagem de uma constelação de satélites para análises de qualidade da água, incluindo a turbidez (<https://alarmes.lasa.ufrj.br/agua/>). Mais recentemente, foi instalado um turbidímetro acoplado à bóia RJ-4 do Sistema de Monitoramento da Costa Brasileira (SiMCOsta), fornecendo uma série inédita de medidas em tempo real da turbidez a cada 30 minutos.

Neste sentido, o sensoriamento remoto é uma ferramenta útil para avaliar a dinâmica de turbidez ou sólidos em suspensão, sobretudo em ecossistemas estuarinos, a exemplo da Baía de Chesapeake (Ondrusek *et al.* 2012; DeLuca et al. 2018; Yunus *et al.* 2021), da Baía de Tampa (Hu et al., 2004; Chen *et al.*, 2007; Moreno-Madrinan et al. 2010), do estuário de Gironde (Doxaran *et al.* 2009; Novoa *et al.*, 2017; Luo et al., 2020), entre várias outras (Chen

et al., 2009; Petus *et al.*, 2010; Katlane et al., 2013; Hamidi et al., 2017; Wang et al., 2019; Balasubramanian et al., 2020; Lee et al., 2021; Ma et al., 2021; Eljaiek-Urzola et al., 2023).

As estimativas de turbidez tradicionalmente adotam a construção de algoritmos empíricos que incluem métodos tradicionais, como regressões lineares, múltiplas, polinomiais e exponenciais (Chen *et al.*, 2007; Petus *et al.*, 2010; Ondrusek *et al.* 2012; Novoa *et al.*, 2017; Hamidi et al., 2017) e mais recentemente o uso de técnicas de aprendizado de máquina, como o *random forest* (Du et al., 2018; Sagawa et al., 2019) ou *support vector regression* (Wang et al., 2018; Gómez et al., 2021). A maioria desses algoritmos são gerados para estimar a turbidez na área de estudo, mas também há algoritmos globais que são capazes de estimar a turbidez em qualquer localidade, como por exemplo, os algoritmos semi-analíticos de Nechad et al., 2009, Dogliotti et al., 2015 e Nechad et al., 2016, que, porém, podem ser menos precisos por não considerar as características intrínsecas à região avaliada.

A evolução do sensoriamento remoto tem superado desafios como o armazenamento e processamento de imagens. Atualmente, a plataforma Google Earth Engine (GEE) é um exemplo notável, permitindo o processamento de imagens na nuvem e oferecendo uma ampla variedade de conjuntos de dados (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>). Entre esses dados, destacam-se os produtos com um maior grau de correção, como os dados do sensor Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer a bordo do satélite Terra (MODIS-Terra). O MODIS-Terra, com resolução temporal de um dia, possibilita estudos temporais e espaciais de longo prazo da qualidade da água, como na BG (Yunus et al., 2021; Katlane et al., 2023). Além disso, métodos robustos para correção de glint podem ser empregados para minimizar os efeitos de reflexão especular, aprimorando a precisão das análises (Hedley et al., 2005). Por outro lado, iniciativas como a comunidade GLORIA (GLObal Reflectance community dataset for Imaging and optical sensing of Aquatic environments) fornecem dados precisos de radiometria e de qualidade da água, integrando informações de sensoriamento remoto não-orbitais e medidas de qualidade da água (Lehman et al., 2023). Esses dados contribuem para a construção de algoritmos mais confiáveis para a estimativa da turbidez, os quais podem ser aplicados na BG.

Este estudo tem como objetivo avaliar a dinâmica espaço-temporal da turbidez em função do regime de maré e dos períodos secos e úmidos para imagens do sensor MODIS (Terra) na BG. Desta maneira, procuramos desenvolver algoritmos de banda-única para estimar a turbidez, utilizando separadamente a reflectância da superfície em 645 nm e ~859 nm. Os algoritmos baseiam-se em modelos de regressão e aprendizado de máquina para diferentes conjuntos de dados, sendo eles: dados de co-ocorrência entre o MODIS

(Terra)-INEA, bem como dados da base GLORIA. Ademais, também testamos a algoritmos semi-análíticos. O algoritmo com a melhor previsibilidade e aquele de fácil aplicabilidade será escolhido para avaliar a dinâmica espaço-temporal da turbidez. Além disso, este estudo também se propõe a apoiar o acervo de imagens da plataforma LASA Alarmes-Água para um monitoramento contínuo de turbidez na BG.

2. Dados e Métodos

2.1. Área de Estudo

A BG (Fig. 1) situa-se na região metropolitana do Rio de Janeiro, com coordenadas geográficas centradas em $22^{\circ}54'0''S$ e $43^{\circ}12'0''W$. A área de estudo possui extensão norte-sul de ~ 30 km e oeste-leste com extensão máxima de ~ 28 km entre as regiões noroeste-nordeste e mínima de $\sim 1,6$ km entre o Forte de São João, a oeste, e o Forte de Santa Cruz, a leste, configurando um perímetro total de ~ 130 km e uma área cujo espelho d'água compreende cerca de ~ 380 km² (Kjerfve et al., 1997).

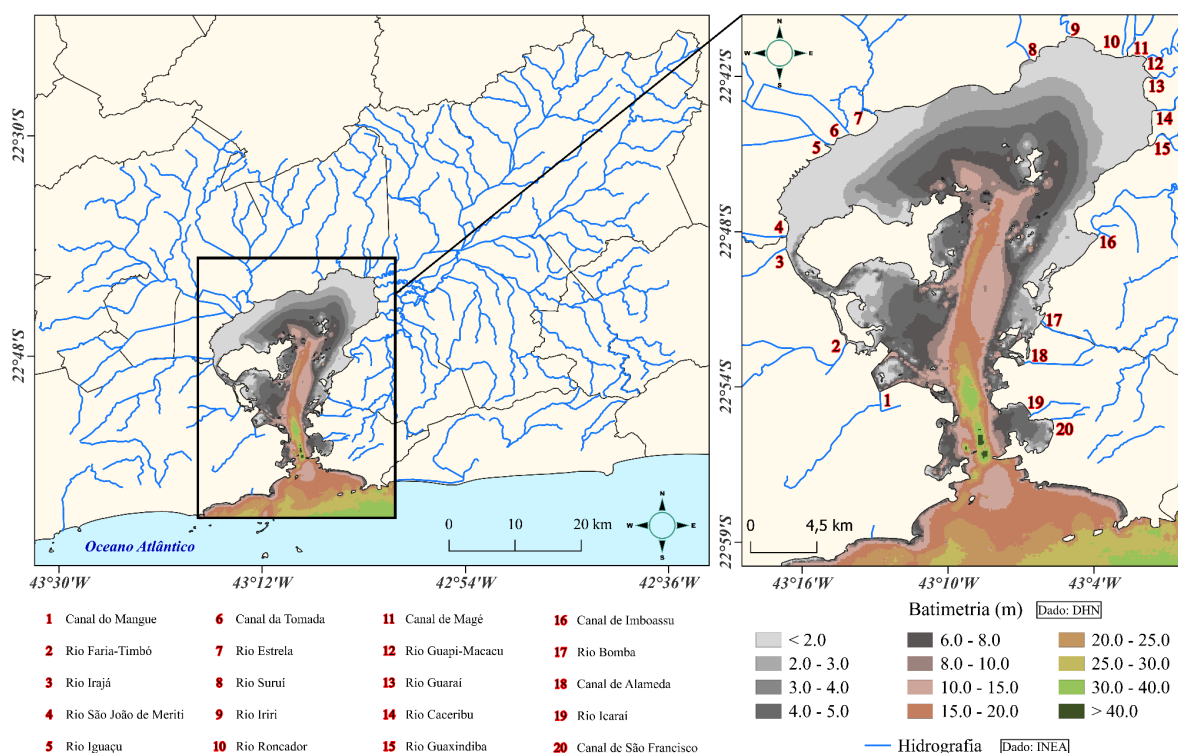


Fig. 1 | Mapa da área de estudo com os nomes dos rios tributários e a batimetria (m).

Em relação à climatologia, a região na qual está inserida a BG incluem um clima tropical úmido que varia de períodos quentes e úmidos entre os meses de outubro e abril, em que a temperatura média fica em torno de $25^{\circ}C$ a $27^{\circ}C$ e a pluviometria mensal entre 300 mm

a 750 mm, até períodos menos quentes e secos entre os meses de maio e setembro, em que a média de temperatura fica em torno de 21°C a 23°C e a pluviometria mensal de até 300 mm (Silva e Dereczynski, 2014). A área da BG também está sob a influência da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). A ZCAS é um sistema meteorológico com duração entre 4 a 10 dias e que provoca chuvas intensas e rajadas de vento mais fortes desde o sul da região Amazônica até a região Sudeste durante os meses de primavera e verão (Carvalho et al., 2004). Assim, a área de estudo pode ser caracterizada em dois períodos sazonais: um período úmido, com maior instabilidade atmosférica e alta precipitação, e um período seco, com maior estabilidade atmosférica e baixa precipitação.

Esses períodos (úmidos e secos) são determinantes para o aporte de água doce ao longo dos mais de 4.000 km² da bacia hidrográfica da BG (Kjerfve et al., 1997), que abrange parcial ou totalmente os municípios de Belford Roxo, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Magé, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Rio Bonito, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti e Tanguá (Fries et al., 2019). A intensa urbanização e industrialização na bacia hidrográfica exigiram a realização de diversas obras de contenção para mitigar as frequentes inundações (Coelho, 2007). Por conta disso, vários trechos dos rios e seus afluentes foram canalizados ou retificados, integrando-se ao sistema de esgoto e as redes pluviais (Amador, 1997). Ademais, o abastecimento de água para a cidade do Rio de Janeiro e da Baixada Fluminense é garantido pelo Sistema Guandu, que transporta águas do rio Paraíba do Sul e que contribui com cerca de 25 m³/s para a BG (Kjerfve et al., 1997). A exceção são alguns rios a nordeste, que por conta da Estação Ecológica da Guanabara, mantiveram parte de seus cursos meândricos originais preservados (Amador, 1997). Dado à influência sazonal para o regime de chuvas na região sudeste em que está situada a área de estudo, um estudo levantou as vazões médias dos principais rios tributários da BG (Porto e Pontes, 2018) e estão disponíveis no anexo I.

Em termos batimétricos, a maior parte da baía tem profundidades mais rasas que de 10 m, sobretudo nas suas margens e nas regiões noroeste e nordeste devido ao intenso processo de sedimentação (Kjerfve et al., 1997). As maiores profundidades são encontradas no canal central entre as Ilhas do Governador e Paquetá em direção à entrada da baía, atingindo seu máximo na região mais estreita com profundidades maiores que 40 m (Fig. 1).

As marés na BG podem ser classificadas como mistas, mas sobretudo semi-diurnas com altura média de 0,7 m, variando entre uma altura de 1,1 m na sizígia e 0,3 m na quadratura (Kjerfve et al., 1997). Os regimes de marés de enchente e vazante estão primariamente relacionados às influências astronômicas e caracterizam-se como marés

estacionárias, onde as velocidades são mínimas durante as estofas e atingem o máximo nas meias-marés (Andrade, Rosman e Azevedo, 2019). Geralmente, as marés de enchente alcançam velocidades mais elevadas ($\sim 1,25$ m/s) em comparação às marés de vazante ($\sim 1,0$ m/s), com picos de velocidade ocorrendo em áreas de estreitamento costeiro significativo (Kjerfve et al., 1997). Variações cinéticas nas correntes também são observadas entre os diferentes tipos de marés, sendo mais intensas durante as marés de sizígia em comparação com as marés de quadratura (Bérgamo, 2006). O padrão dominante de direção das correntes na baía é latitudinal, de Norte a Sul, muito por conta de sua batimetria e com movimento de saída de água estuarina durante a vazante e entrada de água salgada do Oceano Atlântico durante a enchente, com um fluxo estimado em 16×10^3 m³/s (Kjerfve et al., 1997). Movimentos adicionais em menor escala ocorrem em função da descarga fluvial e pelo cisalhamento lateral com as bordas continentais que geram correntes costeiras importantes para a renovação das águas (Andrade, Rosman e Azevedo, 2019; Bérgamo, 2006). Ademais, a intensidade das correntes também podem ser intensificadas pela influência de correntes residuais causadas pelo vento e pela passagem de frentes frias (Andrade, Rosman e Azevedo, 2019).

A salinidade e a temperatura da água são fatores cruciais para a circulação das águas devido às diferenças de densidade que elas provocam. Os padrões de salinidade na BG seguem um gradiente norte-sul bem definido, com águas mais doces ao norte e mais salgadas ao sul. Isso se deve à maior descarga fluvial nas regiões nordeste e noroeste, e à entrada de águas oceânicas pelo sul (Kjerfve et al., 1997). Este gradiente se intensifica sazonalmente, com a maior vazão dos rios durante o período úmido acentuando o gradiente vertical de salinidade (Dyer, 1997). Além disso, durante o período úmido, a ocorrência da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) aumenta a salinidade e diminui a temperatura, podendo penetrar até 15 km na baía, intensificando ainda mais o gradiente de salinidade (Bérgamo, 2006). A diferença de densidade e temperatura entre os períodos úmido e seco caracteriza a influência dos efeitos baroclínicos, que tendem a ser maiores durante o período úmido. Esse efeito contribui para a circulação gravitacional típica de estuários parcialmente misturados, onde camadas de água de diferentes densidades se movem em direções opostas, com águas mais densas entrando na baía durante a maré de enchente e águas menos densas saindo durante a maré de vazante (Andrade, Rosman e Azevedo, 2019; Bérgamo, 2006). O efeito baroclínico também intensifica os movimentos bidirecionais próximo às estofas na fase de transição entre as marés de enchente e vazante (Bérgamo, 2006).

2.2. Dados *in situ*

2.2.1. Dados de turbidez medidos pelo INEA na Baía de Guanabara

O monitoramento da qualidade da água, incluindo a turbidez nos corpos hídricos do Estado do Rio de Janeiro remonta à década de 1980, conduzido inicialmente pelo extinto FEEMA. A partir de 2012, essa responsabilidade foi assumida pelo programa de monitoramento de águas interiores do INEA, que atualmente mantém uma rede de 321 pontos de coleta da água, dos quais 21 são dedicados à BG (Fig. 2).



Fig. 2 | Mapa mostrando os 21 pontos de monitoramento da qualidade da água realizados pelo INEA na Baía de Guanabara.

A água coletada então segue as normas do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras, sendo encaminhada à Gerência de Laboratórios do INEA (GELAB). Na GELAB, a turbidez da água é estimada por análise laboratorial, utilizando o método nefelométrico *SM 2130 A/B do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, expresso em *Nephelometric Turbidity Units* (NTU). Para atender aos requisitos de compatibilidade com os *matchups* do sensor MODIS-Terra, os dados de turbidez foram selecionados no período compreendido entre o início do verão, em 21 de dezembro de 2000, e o fim da primavera, em 20 de dezembro de 2022 (último ano disponibilizado pelo INEA), no hemisfério sul. As estatísticas básicas do monitoramento *in situ* para todos os dados de turbidez FEEMA/INEA entre 1980 até 2022 estão disponíveis do Anexo II.

2.2.2. Dados globais da base GLORIA

A base de dados do *GLobal Reflectance community dataset for Imaging and optical sensing of Aquatic environments* (GLORIA) é uma comunidade científica que reúne 59 instituições em todo o mundo. Esta comunidade fornece um conjunto abrangente de dados de Rrs hiperspectral, cobrindo a faixa de comprimento de onda de 350 a 900 nm com uma resolução de 1 nm. Além disso, disponibiliza dados co-localizados que incluem informações sobre clorofila-a, total de sólidos suspensos, profundidade de Secchi, turbidez, entre outros parâmetros. Ademais, também fornece informações sobre os detalhes metodológicos das medidas *in situ*, as quais são submetidas a um rigoroso controle de qualidade (Lehman *et al.*, 2023). O conjunto de dados da base GLORIA podem ser acessados gratuitamente em: <https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.948492>. As estatísticas básicas para os dados da base GLORIA estão disponíveis no Anexo III.

2.3. Métodos

2.3.1. Pré-Processamento de imagens de sensoriamento remoto orbital na plataforma GEE

Neste estudo, utilizamos os produtos MODIS-Terra, sendo o *MOD09GQ* com resolução espacial de 250 m e o *MOD09GA* reamostrado de 500 m para 250 m, ambos processados na plataforma GEE. A correção atmosférica aplicada nos produtos *MOD09GQ* e *MOD09GA* tem se mostrado adequada para a estimativa de turbidez e sedimentos em suspensão, especialmente em regiões estuarinas e águas interiores (Chen *et al.*, 2007; Doxaran *et al.*, 2009; Petus *et al.*, 2010, Ondrusek *et al.*, 2012; Moreno-Madrinan *et al.*, 2014, Novoa *et al.*, 2017). Neste artigo, foi desenvolvido um método para identificar e selecionar imagens com o céu parcialmente encoberto por nuvens, optando por aquelas em que a porcentagem de nuvens é inferior a 20%, dentro de uma geometria pré-definida, que corresponde à área de estudo. Este método está disponível em: https://github.com/felipefariadesousa/Cloud_filter_for_google_earth_engine.git. A máscara de nuvens utilizada durante o processo de filtragem também foi empregada para identificar e retirar nuvens remanescentes após o processo de filtragem. Essa máscara de nuvens mencionada utiliza métodos de terceiros e está disponível em: <https://github.com/fitoprincipe/geetools-code-editor>. Para o mascaramento de regiões não-água (como embarcações, pontes, ilhas/ilhotas), utilizamos o Normalized Difference Water Index (NDWI) entre as bandas *sur_refl_b04* e *sur_refl_b02*, conforme a metodologia proposta por McFeeters (1996). Os pixels com NDWI abaixo de -0,1 foram identificados como alvos não-água e mascarados. Esse limiar também foi empregado para a delimitação da

linha de costa. Para mitigar os efeitos de reflexão especular (*skyglint* e *sunglint*) aplicamos o método proposto por Hedley et al., (2005) com a informação espectral na região do SWIR para corrigir os efeitos de *glint*. Por fim, dado a complexidade das variações espaciais de turbidez dentro da BG, optou-se por utilizar somente as bandas *sur_refl_b01* (645 nm) e *sur_refl_b02* (~848 nm) do produto *MOD09GQ*, devidamente corrigidas para os efeitos de reflexão especular, na elaboração do algoritmo de turbidez e nas análises espaço-temporais.

2.3.2. Modelos de regressão e aprendizado de máquina

Neste estudo exploramos modelos de regressão correntemente encontrados na literatura (Chen et al., 2007; Petus et al., 2010; Ondrusek et al. 2012; Novoa et al., 2017; Hamidi et al., 2017) além de modelos de aprendizado de máquina, mais recentemente empregados (Du et al., 2018; Wang et al., 2018; Sagawa et al., 2019; Gómez et al., 2021), cuja equações são mostradas na Tab. 1.

Tab. 1 | Tabela de equações da técnicas de regressão e aprendizado de máquina.

Técnicas matemáticas	Modelos	Equação
Regressões	Regressão Linear (RL)	$T = \beta_0 x + \beta_1$
	Regressão Polinomial (RP)	$T = \beta_0 x^2 + \beta_1 x + \beta_2$
	Regressão Exponencial (RE)	$T = \beta_0 \text{Exp}^{\beta_1 x}$
Aprendizado de Máquina	<i>Random Forest</i> (RF)	$T = \hat{y}(x_i) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B T_b(x_i)$
	<i>Support Vector Regression</i> (SVR)	$T = \min(\omega, b, \xi, \xi^*) \frac{1}{2} \omega^T \omega + C \sum_{i=1}^1 \xi_i + C \sum_{i=1}^1 \xi_i^*$

Onde T é a turbidez estimada, β_n equivale aos coeficientes e interseção da reta, R_s é a reflectância nos modelos de RL, RP e RE. Para o RF, B equivale ao número de árvores de decisão, T_b é o nó final da árvore e \hat{y} representa o resultado médio da inferência para as árvores presentes no método RF. Para o SVR, ω representa um vetor de pesos que determina o hiperplano, b representa o viés, ξ_i e ξ_i^* são variáveis de brecha associadas às amostras de calibração nos dois lados do hiperplano, ω^T é o termo de regularização e C é o parâmetro de custo que possibilita a obtenção de um erro de calibração menor (Cervantes et al., 2020; Breiman, 2001). Adaptado de Assunção (2023).

Em relação às entradas dos modelos de aprendizado de máquina, seu desempenho é diretamente influenciado pela escolha dos hiperparâmetros que controlam o processo de aprendizado. A procura dos melhores hiperparâmetros consiste no uso da ferramenta

GridSearch (Pedregosa et al., 2011; Niu et al., 2021). Os hiperparâmetros testados são apresentados na Tab. 2.

Tab. 2 | Tabela dos hiperparâmetros procurados pelo *GridSearch* para os modelos RF e SVR.

Modelo	Hiperparâmetro	Valores testados
SVR	<i>Kernel</i>	<i>Linear, Poly, RBF, Sigmoid</i>
	<i>Gamma</i>	1, 10
	<i>C</i>	500, 1000, 3000, 10000
	<i>Epsilon</i>	1, 2, 5, 10
RF	<i>N estimators</i>	10, 50, 100, 500, 1000
	<i>Max depth</i>	2, 10, 25, 50, 100
	<i>Criterion</i>	<i>Squared error, Absolute error, Friedman mse, Poisson</i>

2.3.3. Algoritmos de estimativa da turbidez

O fluxograma metodológico para a construção dos algoritmos, métricas estatísticas e avaliação da dinâmica de turbidez estão disponíveis no anexo IV.

a. MODIS (Terra)-INEA

Para definir os *matchups* entre os dados do MODIS (Terra)-INEA, cruzamos os valores de Reflectância (R) extraídos das imagens do MODIS (Terra) com as medições de turbidez *in situ* pelo INEA, considerando as datas equivalentes (n) entre os dados. Foi utilizado um intervalo máximo de tempo em ± 3 horas entre o horário de coleta e a passagem do satélite Terra às 13 UTC (10 a.m. horário local). Nos *matchups*, *outliers* podem surgir de erros de medição no campo ou falhas de correções radiométricas e de *glint*. Para detectar e remover esses outliers, calculamos uma diferença normalizada entre as normalizações de R e turbidez e filtramos os dados entre o percentil 25% e 75%. Em virtude do baixo n amostral dos matchups, adotamos o método de Monte-Carlo (MC) para construir o algoritmo de turbidez, seguindo uma abordagem semelhante ao estudo conduzido por Augusto-Silva et al., (2014). Os matchups foram divididos em 70% para treinamento do algoritmo de estimativa de turbidez e 30% para validação pós-treinamento. Para os dados de treinamento, selecionamos aleatoriamente 40% das amostras para serem usadas na calibração do algoritmo. A calibração foi aplicada à modelos matemáticos tradicionais (RL, RP e RE) e de aprendizado de máquina (RF e SVR) calculadas pelas equações apresentadas na Tab. 1. A escolha dos hiperparâmetros (Tab. 2) dos modelos de aprendizado de máquina foi realizada nos dados de treinamento previamente à aplicação do método de MC. Para o método de MC foram adotadas 10 mil repetições. Em cada etapa do processo, registramos os coeficientes das regressões e salvamos os modelos treinados pelas técnicas de aprendizado de máquina. Além disso, registramos para ambas as técnicas os seus respectivos valores do coeficiente de

determinação (R^2). As etapas detalhadas do MC adotado neste estudo estão disponíveis no fluxograma metodológico no anexo IV. A obtenção do algoritmo de estimativa da turbidez consiste no valor modal de R^2 no intervalo mais frequente de R^2 com base em um histograma. Os 30% restantes de cada conjunto de dados das bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* para cada teste de correção *glint* foram usados para validar os respectivos algoritmos obtidos pela calibração através do método de MC. As técnicas de análise estatísticas utilizadas são descritas na seção 2.3.5 (ver fluxograma metodológico no anexo IV).

b. Base de dados GLORIA

Para desenvolver um algoritmo alternativo ao que está sendo elaborado para os matchups INEA-MODIS, utilizamos a base de dados *in situ* de turbidez e Rrs disponibilizada pela comunidade GLORIA (Lehman et al., 2023). As medidas de Rrs foram simuladas para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* com base na função de resposta espectral do MODIS-Terra, adotando a metodologia proposta por Maciel et al., (2019). Posteriormente, multiplicamos as medidas de Rrs (645 nm) por π para obter a mesma unidade medida do MODIS-Terra que é a R. Em nosso estudo, optamos por selecionar dados de turbidez de até 30 NTU, para adequar-se ao ambiente de turbidez encontrado na BG que são em média em torno deste valor. Dada a quantidade de dados da base GLORIA (1084 e 224 para as medidas de 645 nm e 859 nm, respectivamente) o método de MC não foi utilizado, e desta forma, calculamos diretamente os modelos matemáticos de regressão e aprendizado de máquina (Tab. 1) para todo o conjunto de dados da base GLORIA. Previamente, foram determinados os melhores hiperparâmetros (Tab. 2) para os modelos de aprendizado de máquina pelo método *GridSearch*. A validação do algoritmo foi feita com base em todo conjunto de matchups do MODIS (Terra) para as diferentes correções de *glint* (ver anexo IV) utilizando as análises estatísticas descritas na seção 2.2.5.

c. Algoritmos Globais de Estimativa

Em nosso estudo, também avaliamos o desempenho dos algoritmos globais de estimativa propostos por Nechad et al., (2009), Dogliotti et al., (2015) e Nechad et al., (2016). Os algoritmos testados têm formulação teórico-matemática, baseado no desenvolvimento de um algoritmo semianalítico apresentado por Nechad et al. (2009). Os algoritmos de Dogliotti et al., (2015) e Nechad et al., (2016) são versões aprimoradas deste algoritmo, sendo o algoritmo de Dogliotti et al., (2015) adaptado para os sensores MODIS (Aqua e Terra). Os coeficientes de calibração dos algoritmos globais para os mesmos comprimentos de onda do MODIS-Terra, referentes às bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02*, estão detalhados na Tab. 3.

A validação dos algoritmos foram feitas para o todo conjunto de *matchups* do MODIS (Terra) para as diferentes correções de *glint* (ver anexo IV).

Tab. 3 | Tabela de algoritmos globais de estimativa da turbidez.

Algoritmos globais	645 nm	859 nm
Nechad <i>et al.</i> , (2009)	$T = \frac{208,4R}{1 - (\frac{R}{0,1641})}$	$T = \frac{2059,4R}{1 - (\frac{R}{0,2112})}$
Dogliotti <i>et al.</i> , (2015)	$T = \frac{228,1R}{1 - (\frac{R}{0,1641})}$	$T = \frac{3078,9R}{1 - (\frac{R}{0,2112})}$
Nechad <i>et al.</i> , (2016)	$T = \frac{575,27R}{1 - (\frac{R}{0,2360})}$	$T = \frac{2763,9R}{1 - (\frac{R}{0,2113})}$

Onde R é a reflectância da superfície em cada faixa espectral (645 nm e 859 nm).

2.3.5. Análises estatísticas

A validação dos algoritmos de estimativa da turbidez consiste nos cálculos das análises estatísticas do i) Erro Percentual Médio Absoluto (em inglês *Mean Absolute Percentage Error* - MAPE), ii) Raiz do Erro Quadrático Médio (em inglês *Root Mean Squared Error* - RMSE) e iii) viés (em inglês *BIAS*), cuja fórmulas são mostradas na Tab. 4.

Tab. 4 | Tabela de métricas estatísticas.

Métrica estatística	Fórmulas
MAPE	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{ y_i - \hat{y}_i }{y_i} \cdot 100$
RMSE	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$
BIAS	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$

Onde y_i e \hat{y}_i , são os valores esperados e observados, respectivamente.

2.3.6. Avaliações espaços-temporais da turbidez

A avaliação da dinâmica espaço-temporal de turbidez na BG a partir da coleção de imagens (21 dezembro de 2000 a 20 de dezembro de 2003) do MODIS (Terra) para o algoritmo escolhido com melhor desempenho da correção de *glint*, será dividida a partir das seguintes etapas (ver fluxograma metodológico no anexo IV): 1ª) Identificação sazonal em dois períodos (úmido e seco), sendo o período úmido correspondentes ao meses de verão (21 de dezembro a 20 de março) e primavera (22 de setembro a 20 de dezembro), e período seco, correspondente ao meses de inverno (21 de junho a 21 de setembro) e outono (21 de março a 20 de junho). 2ª) Identificação dos regimes de marés (Enchente e Vazante) a partir da análise

harmônica dos dados de nível do mar registrados na Ilha Fiscal durante o ano de 2013. Esses dados foram fornecidos pela Marinha do Brasil, com frequência amostral de 5 minutos. A análise harmônica e a previsão de maré foram geradas através do pacote T_Tide (Pawlowicz, Beardsley e Lentz, 2002) desenvolvido em Matlab. Após a previsão das marés harmônicas, foram determinados os valores máximos e mínimos em intervalos de 8 horas para identificar as marés de enchente e vazante. 3ª) Identificação dos tipos de marés (sizígia, quadratura e transição) com base nas fases lunares, sendo as marés de sizígia no dia anterior e posterior ao dia de lua cheia e lua nova, as marés de quadratura no dia anterior e posterior ao dia de quarto crescente e quarto minguante, e as marés de transição nos dias restantes. 4ª) Aplicação da mediana da série-temporal (2001-2023) para a coleção de imagens do MODIS (Terra) divididas em períodos úmidos e secos em função dos regimes e tipos de marés. 5ª) Cálculo da diferença entre os regimes de enchente e vazante para cada período sazonal (úmido e seco) em função dos tipos de marés. 6ª) Cálculo de desvio padrão para cada período sazonal e tipos de marés.

3. Resultados

3.1. Escolha do algoritmo de estimativa da turbidez

A Fig. 3 apresenta a comparação entre os melhores algoritmos construídos para os diferentes testes de *glint* entre as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* com base na validação dos algoritmos. Os materiais complementares A, B e C mostram os resultados completos para a construção e validação dos algoritmos para os dados do MODIS (Terra)-INEA, GLORIA e semi-análticos, respectivamente.

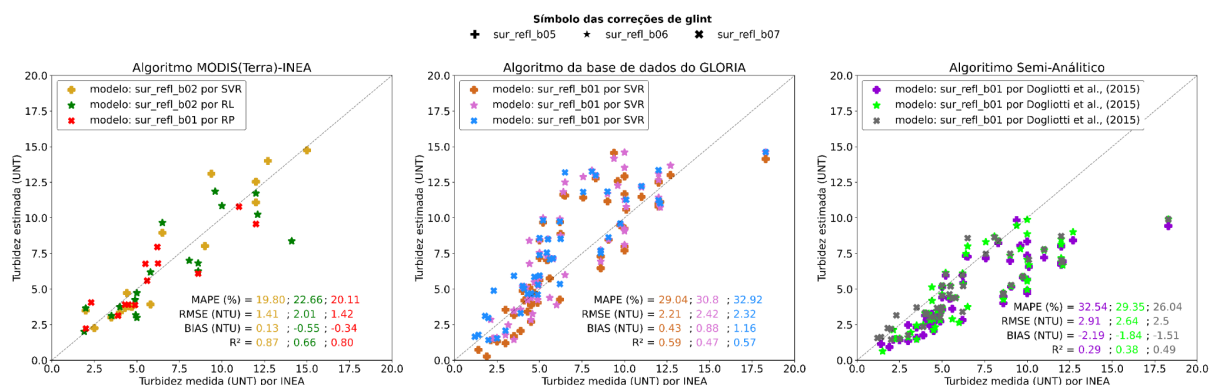


Fig. 3 | Melhores algoritmos de turbidez para os dados do MODIS(Terra)-INEA, GLORIA e semi-análticos em cada teste de correção de *glint* na pela banda *sur_refl_b05* (estrela), *sur_refl_b06* (asterístico) e *sur_refl_b07* (letra x). A combinação banda e melhor modelo estão destacadas em cores distintas. O resultado completo da construção e validação dos algoritmos estão disponíveis nos materiais complementares (A, B e C).

Ao avaliar os algoritmos da base GLORIA, observamos que, apesar de fornecerem medidas de reflectância mais confiáveis por serem medições *in situ*, não apresentaram resultados superiores ao algoritmo local construído com base nos dados do MODIS (Terra)-INEA. Os erros MAPE foram de aproximadamente 30% e o RMSE de cerca de 2 NTU para os melhores algoritmos observados em cada teste de correção de glint, ambos referentes à banda do vermelho no modelo SVR. Dessa forma, por não apresentarem os melhores resultados, os algoritmos da base GLORIA não foram utilizados para avaliar a dinâmica de turbidez. Em relação aos algoritmos semi-analíticos, as métricas estatísticas apontaram o algoritmo de Dogliotti et al. (2015) como o melhor preditor da turbidez em comparação aos algoritmos de Nechad et al. (2009) e Nechad et al. (2016). Assim como os dados da base GLORIA, o desempenho para o algoritmo de Dogliotti et al., (2015) obteve melhores resultados para a região do vermelho para os diferentes conjuntos de dados da correção de glint. No entanto, esses resultados foram inferiores ao algoritmo local construído. As métricas variaram entre 5% e 10% em MAPE e cerca de 1 NTU para o RMSE. Desta maneira, os algoritmos semi-analíticos não foram considerados para avaliar a dinâmica de turbidez. Portanto, a escolha do algoritmo para avaliar a dinâmica de turbidez foi escolhido para os modelos desenvolvidos para os matchups do MODIS (Terra)-INEA.

Avaliando os algoritmos selecionados e construídos para este conjunto de dados, o melhor desempenho entre todos os modelos testados foi para a banda do infravermelho próximo pelo modelo SVR para o conjunto de dados corrigido por glint pela banda *sur_refl_b05* (MAPE:19,04 e RMSE:1,04). Porém, a relação espectral entre a banda do vermelho e a turbidez mostra-se mais adequada para as estimativas em ambientes moderadamente turvos (Dogliotti et al., 2015). A BG apresenta tais condições, por isso, como o segundo melhor resultado não apresentou métricas estatísticas consideravelmente maiores em relação ao modelo anteriormente mencionado, este foi escolhido para avaliar a dinâmica de turbidez na BG. Trata-se do algoritmo polinomial de segunda ordem para o conjunto de dados de correção de glint pela banda *sur_refl_b07* com valores de MAPE em 20,04% e RMSE de 1,15 NTU. Ademais, o algoritmo escolhido atende nosso objetivo de construir um modelo de estimativa da turbidez de fácil aplicabilidade e melhor previsibilidade, mantendo todo o processamento de imagens dentro da plataforma GEE.

3.2. Distribuição espaço-temporal da turbidez

A distribuição espacial da turbidez para os efeitos das marés em períodos úmidos e secos está apresentada na Fig. 4.

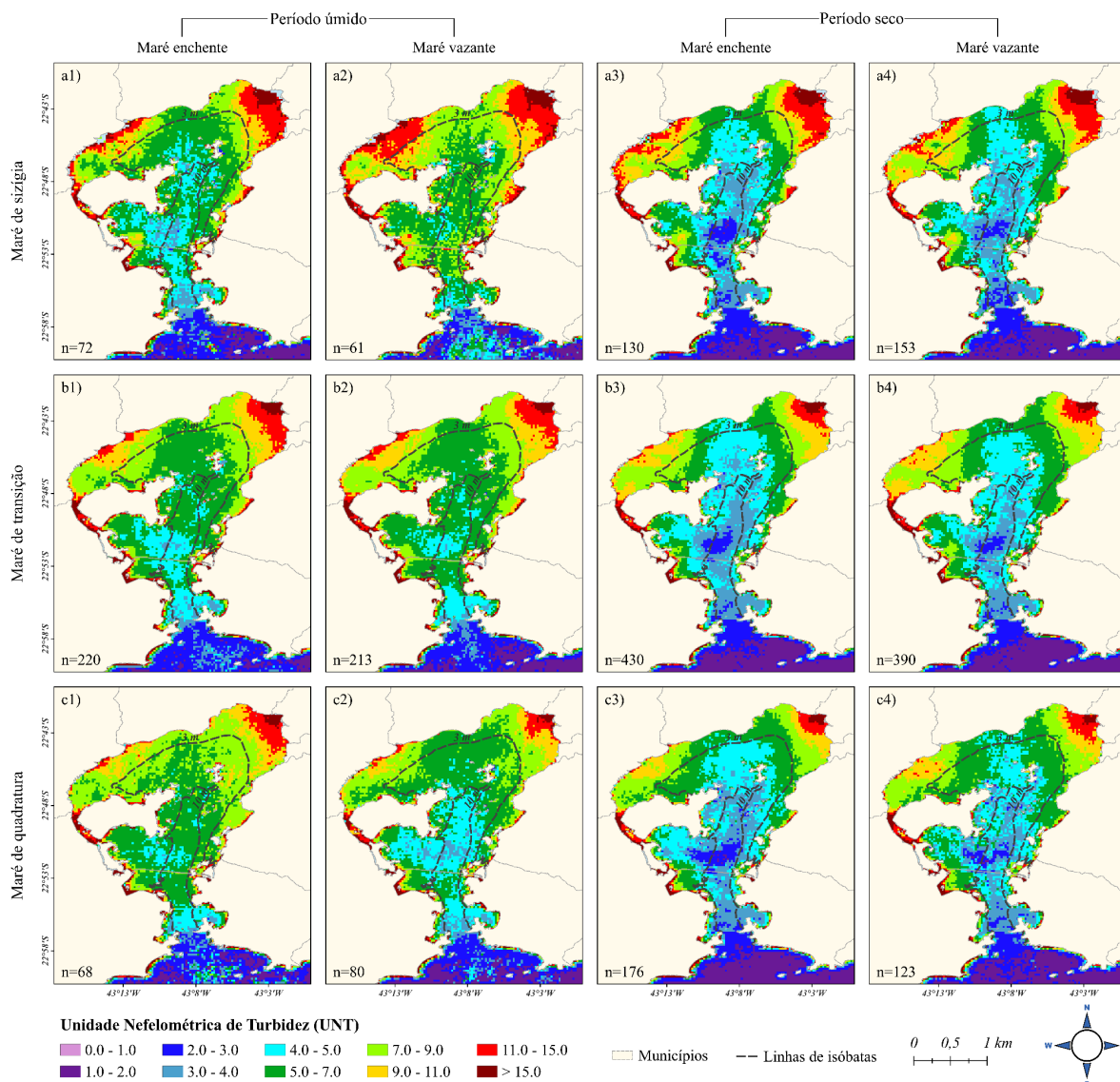


Fig. 4 | Mediana de turbidez nos períodos úmidos (colunas 1 e 2) e secos (colunas 3 e 4) para os regimes de marés enchente (números ímpares) e vazante (números pares) nos tipos de marés de sizígia (linha a), transição (linha b) e quadratura (linha c) entre 21 de dezembro de 2000 a 20 de dezembro de 2023. O valor de n equivale ao número de imagens para qual foi calculada a mediana. Os dois contornos batimétricos em destaque representam as isóbatas de 3 m e 10 m.

A Fig. 4 mostra que a turbidez na BG tende a apresentar um gradiente Norte-Sul (N-S) com valores mais altos a nordeste-noroeste convergindo ao norte em direção à região central diminuindo à medida que se aproxima da entrada.

As tendências espaciais a nordeste da baía mostram uma extensa pluma oriunda dos rios Guapi-Macacu, sendo esta região, a que apresenta as maiores magnitudes de turbidez na área de estudo. Ao compararmos os períodos úmidos e secos, observa-se que os valores de turbidez não variam significativamente entre si (ver mapa de desvio padrão no Material Complementar D), sobretudo nas regiões nordeste e noroeste. Para ambos, os maiores valores da pluma ocorrem logo após a saída dos rios Guapi-Macacu com magnitude acima de 15 NTU, os quais diminuem gradativamente em direção ao canal central até atingirem valores na faixa de 7,0 a 9,0 NTU. Embora não haja diferença de magnitude entre período úmido e seco, há diferenças quanto à extensão da pluma entre os regimes e tipos de marés, sobretudo na maré de quadratura-enchente no período úmido que circunda toda a Ilha de Paquetá e atinge parte da costa Leste-Central (L-C) da baía. Na costa L-C também há influência da pluma dos rios Guapi-Macacu durante as marés de sizígia-vazante, também no período úmido. Em relação ao período seco, um padrão mais nítido foi observado, em que as plumas são mais recuadas em comparação com o período úmido e as marés assumem um papel mais determinante no tamanho das plumas. Durante as marés de sizígia (enchente-vazante) a pluma é mais extensa e próxima da Ilha de Paquetá, e conforme passam para as marés de transição (enchente-vazante) tornam-se mais próximas à desembocadura, sendo ainda mais recuada durante as marés de quadratura (enchente-vazante).

Em relação à pluma dos rios São João de Meriti-Iguaçu, que está localizada a noroeste e acima da Ilha do Governador, apresenta diferenças entre os períodos (úmido e seco) e os regimes e tipos de marés. As marés de sizígia apresentam uma faixa de valores em torno de 11,0 a 15,0 NTU que diminuem ao longo da Ilha do Governador em direção ao norte atingindo valores em torno de 7,0 a 9,0 NTU, sendo a primeira faixa mais extensa na maré de sizígia-vazante em relação a enchente no período úmido e as marés de enchente e vazante no período seco, em que essa faixa de turbidez ocorre mais próximo a desembocadura dos rios. No período seco, a extensão da pluma (São João de Meriti-Iguaçu) tende a ser ligeiramente maior na maré de enchente atingindo a região norte com valores entre 5,0 a 7,0 NTU, enquanto as marés vazante são mais recuadas e não atingem a região norte. Para o período úmido, ocorrem situações contrárias, a maré de sizígia-vazante possui a maior extensão dessa pluma (em todos os casos) que extrapola-se a região norte e encontra a pluma da região nordeste (Guapi-Macacu), mas por outro lado, na maré de sizígia-enchente tem sua menor extensão a comparar somente pelas marés de sizígia. Em relação às marés de transição, esta mostrou-se menos complexa e com menores magnitudes em relação às marés de sizígia, com mais valores entre 9,0 a 11,0 NTU próximos a desembocadura e limiar da pluma próxima ao

norte com valores entre 7,0 a 9,0 NTU em ambos os períodos (úmido e seco). Nas marés de transição, a extensão da pluma é ligeiramente menor durante o período seco em comparação ao período úmido, mas com pouca variação espacial entre os tipos de marés dado esta diferença sazonal. Sobre as marés de quadratura, a magnitude tende a ser menor que a extensão mais recuadas em comparação com as marés de sizígia e transição, respectivamente. A extensão da pluma nos regimes de enchente e vazante durante o período seco são similares entre si, por outro lado, durante o período úmido há uma diferença notável entre os regimes, com a extensão da pluma maior durante a enchente, com tamanho similar ao da sizígia-vazante no mesmo período.

A partir das regiões nordeste e noroeste, as plumas seguem para a região norte em que os valores são normalmente em torno 5,0 a 7,0 NTU durante o período úmido e de 4,0 a 5,0 NTU durante o período seco. A exceção nesses valores ocorre em algumas situações de marés em que a magnitude de turbidez aumenta, como visto na maré de sizígia-vazante e quadratura-enchente no período úmido, em que a faixa de valores está em torno de 7,0 a 9,0 e nas marés de sizígia-enchente e transição-vazante no período seco, em que os valores atingem 5,0 a 7,0 NTU. Para ambos, este aumento ocorre devido ao encontro entre as plumas dos rios São João de Meriti-Iguaçu e Guapi-Macacu.

A região central também apresenta valores mais altos de turbidez durante o período úmido em comparação ao período seco. Durante o período úmido, a turbidez é espacialmente maior para valores entre 5,0 a 7,0 NTU durante as marés de sizígia-vazante, transição-vazante e de quadratura-enchente a partir da região norte, da costa Oeste-Leste (O-L) até a região mais estreita. Ainda no período úmido, para a região mais centralizada da baía foram observados valores entre 4,0 a 5,0 NTU, sendo espacialmente maiores durante as marés de quadratura-vazante. Em relação ao período seco, os valores de turbidez apresentam mais variação da região norte, costa O-L até a região mais estreita em que os valores são em torno de 4,0 a 5,0 NTU e passam para 3,0 a 4,0 NTU e 2,0 a 3,0 NTU conforme aproximam-se da região mais centralizada em ambos os tipos e regimes de marés. Também foi observada uma pluma de turbidez próximo a Ilha do Fundão e o cais do Porto, em que os valores de turbidez não variam significativamente entre período úmido e seco, mas variam em extensão e é maior nas marés de sizígia, seguida da transição e da quadratura.

A partir da região mais estreita da baía até a entrada, os valores de turbidez no período úmido passam de 4,0 a 5,0 NTU para 2,0 a 3,0 NTU, com pequenas extensões espaciais de valores entre 3,0 a 4,0 NTU para todos os tipos e regimes de marés. A exceção ocorre na maré de sizígia-vazante em que a turbidez tem valores próximos da região central entre 5,0 a

7,0 NTU na região mais estreita e parte da entrada da baía. Sobre o período seco, as regiões mencionadas possuem valores similares entre as marés (tipos e regimes) na faixa de 3,0 a 4,0 NTU diminuindo para 2,0 a 3,0 NTU e 1,0 a 2,0 NTU conforme aproximam-se da entrada e da região costeira adjacente, respectivamente.

3.3. Diferença entre os regimes de marés

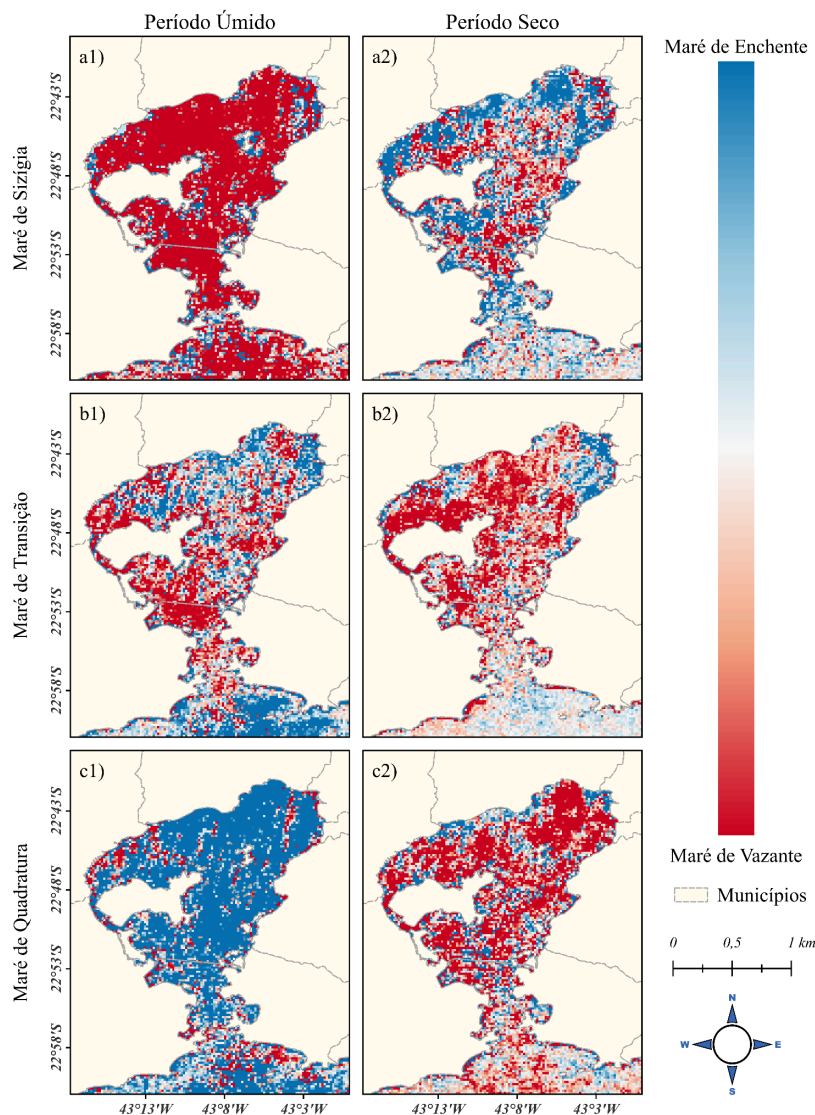


Fig. 5 | Diferença entre as marés de enchente e vazante nos períodos úmidos (linha 1) e secos (linha 2) para as marés de sizígia (coluna a), transição (coluna b) e quadratura (coluna c) entre 21 de Dezembro de 2000 a 20 de Dezembro de 2023. As cores azuis (vermelhas) indicam maiores (menores) valores de turbidez para as marés de enchente (vazante) e as cores esbranquiçadas indicam pouca diferença entre os valores de turbidez entre as marés.

Durante o período úmido, as marés vazantes são predominantes em magnitude de turbidez nas marés de sizígia (Fig. 5a1), enquanto as marés de enchente predominam na quadratura (Fig. 5c1). Durante o período seco, as marés de quadratura (Fig. 5c2) mostram que

as marés de vazante possuem valores de turbidez mais altos em boa parte da baía, enquanto na maré de sizígia (Fig. 5a2), as enchentes mostraram valores de turbidez superiores nas regiões noroeste e nordeste, e nas linhas de costas na baía. No canal central, os valores de turbidez na Fig. 5a2 tendem a ser maiores para as marés de vazante e na entrada da baía, os valores de turbidez tendem a ser similares entre os regimes.

Já para as marés de transição, tanto os períodos úmidos (Fig. 5b1) e secos (Fig. 5b2) mostram que as marés de vazante possuem valores de turbidez maiores na região oeste, sobretudo na região abaixo da ponte Rio-Niterói no período úmido e acima da Ilha do Governador no período seco. Na Fig. 5c1 há mais valores de marés de enchente em que a turbidez é maior que a vazante, sobretudo no norte-nordeste e na entrada da baía, enquanto na Fig. 5c2 há alguns valores a nordeste em que a turbidez é maior para as marés de enchente e similares entre os regimes na entrada.

4. Discussão

4.1. O algoritmo de turbidez

O algoritmo escolhido para avaliar a dinâmica de turbidez na Baía de Guanabara foi o modelo polinomial de segunda ordem para a banda *sur_refl_b01*, construído com base nos matchups entre MODIS (Terra)-INEA, corrigidos por glint pela banda *sur_refl_b07* através do método proposto por Hedley et al., (2005). Algoritmos locais tendem a ser melhor ajustados aos dados de referência, pois atendem às características intrínsecas de uma determinada região (Eljaiek-Urzola et al., 2023; IOCCG, 2019). Em nosso estudo, o algoritmo local desenvolvido mostrou-se mais confiável para a faixa de turbidez entre 0,5 e 12,5 NTU (no vermelho) e 15 NTU (no infravermelho-próximo), conforme demonstrado pelo conjunto de dados de treinamento e validação mostrado na Fig. 2A no Material Complementar A. Esta faixa de valores estão dentro da maior parte da média histórica e mensal de turbidez medidas *in situ* pelo INEA (ver anexo II), em que a turbidez tende a variar no máximo até 21 NTU com desvio padrão de 10 NTU. Isso considera a Baía de Guanabara como um estuário moderadamente turbido. Sendo assim, a utilização da banda do vermelho em 645 nm do MODIS (Terra) é adequada para as estimativas, pois esse comprimento de onda é mais eficiente para essas faixas de valores (Dogliotti et al., 2015). No entanto, valores mais altos de turbidez, levam à saturação do sinal em 645 nm o que dificultaria a estimativa de valores mais elevados de turbidez (IOCCG, 2019; Dogliotti et al., 2015).

4.2. Comparação de algoritmos para a estimativa de turbidez desenvolvidos para regiões estuarinas

A disponibilidade de algoritmos para estimar a turbidez a partir de dados de sensores orbitais na BG é limitada. O estudo conduzido por Barros et al. (2003) desenvolveu um algoritmo de regressão linear de múltiplas bandas espectrais para os sensores TM (Landsat-5) e ETM+ (Landsat-7). Da mesma forma, utilizando a mesma técnica de regressão, Soares (2017) estimou os TSS para os sensores OLI (Landsat-8). Até o momento, não foram encontrados estudos para estimar a turbidez ou TSS para a BG usando dados do sensor MODIS-Terra. Assim, realizamos uma comparação entre os algoritmos mais eficazes de estudos anteriores, conduzidos em diferentes baías e que também utilizaram o sensor MODIS-Terra para estimar a turbidez ou TSS, que assim como neste estudo, utilizaram a banda *sur_refl_b01* para estimar a turbidez, conforme mostra a Tab. 5.

Tab. 5 | Comparação de algoritmos de turbidez.

Locais	Estimativa	Equação	Error	Autores
Baía de Guanabara	NTU < 20	$T = 7181,41R(\lambda)^2 + 140,1R(\lambda) + 1,1$	20,1 (MAPE)	Este estudo
Baía de Tampa	NTU < 10,0	$T = 1203,9Rrs(\lambda)^{1087}$	-	Chen et al. (2007)
Sul da Baía de Biscay	NTU < 70	$T = 26110Rrs(\lambda)^2 + 604,5Rrs(\lambda) + 0,24$	47,00 (NRMSE)	Petus et al. (2010)
Baía de Chesapeake	4 < TSS (mg/l) < 50	$TSS = 3,8813nLw(\lambda)^3 - 13,822nLw(\lambda)^2 + 19,61nLw(\lambda)$	-	Ondrusek et al. (2012)
Baía de Gironde	TSS (mg/l) < 50	$TSS = 511,9\rho_w(\lambda)$	12,18 (NRMSE)	Novoa et al. (2017)
Baía de Chesapeake	TSS (mg/l) < 30	$TSS = 3E - 05Rs(\lambda)^2 - 0,0093Rs(\lambda) + 5,3899$	35,94 (MAPE)	Yunus et al. (2021)

Onde R_s , R_{rs} , ρ_w e nLw representam respectivamente a Reflectância da superfície, a Reflectância de Sensoriamento Remoto, a Reflectância de saída da água e a radiância normalizada de saída da água para o comprimento de onda (λ) igual a 645nm.

Os algoritmos listados na Tab. 5 mostram diferentes metodologias para obter a turbidez e a TSS por meio dos sensores MODIS-Terra de forma eficiente. Chen et al. (2007) desenvolveu um algoritmo exponencial para recuperar a turbidez por meio de calibração vicária entre as bandas do MODIS-Terra de 250 m e 1 km de cor do oceano. No estudo de Petus et al. (2010) os autores utilizaram o código de transferência radiativa 6S e obtiveram a R_{rs} , tendo como melhor resultado para recuperar a turbidez no sul da baía de Biscay, um modelo de regressão polinomial de segunda ordem. Ondrusek et al. (2012) utilizou o processamento de dados NASA SeaDAS e NOAA coastWatch para corrigir os efeitos atmosféricos e obter a nLw , recuperando a TSS por meio de uma regressão polinomial de terceira ordem. Novoa et al. (2017) testou diferentes produtos de correção atmosférica e derivou um algoritmo de TSS com base em uma regressão linear simples para ρ_w (645nm),

embora seu melhor algoritmo para estimar TSS no MODIS-Terra seja uma regressão polinomial de segunda ordem para ρ_w (~859 nm). Por fim, Yunus *et al.*, (2021) utilizou-se das mesmas imagens as quais aplicamos em nosso estudo e também aplicou um algoritmo de regressão polinomial de segunda ordem, porém, para estimar TSS. Para Yunus *et al.* (2021), o algoritmo de Ondrusek *et al.* (2012) que é para a mesma baía (Chesapeake) são treinados e calibrados em 80% dos dados em valores de TSS de até 11,71 mg/l contra 20,7 mg/l treinados e calibrados em seu estudo, indicando uma maior precisão de seu algoritmo. Este fato, reforça que os dados corrigidos para absorção e espalhamento atmosférico do MODIS-Terra disponíveis na plataforma GEE são capazes de estimar a turbidez na BG, como mostrou-se capaz de estimar a TSS na baía de Chesapeake (Yunus *et al.* 2021).

4.3. Dinâmica de turbidez na Baía de Guanabara

Com base na Fig. 4, as regiões em que reúne a maior parte dos rios tributários da BG, os maiores valores de turbidez na BG ocorreram próximo às plumas dos rios Guapi-Macacu, a nordeste, e na pluma dos rios Iguaçú-São João de Meriti, a noroeste, sendo maior em magnitude e extensão na pluma à nordeste. Esperava-se que os valores de turbidez próximos às plumas mencionadas, fossem mais elevados durante o período úmido, devido ao aumento do fluxo dos rios (ver anexo I) e ao maior volume de sedimentos que adentram a baía, mas os valores tendem a ser próximos entre os períodos (dado a diferença de turbidez em cada pluma), variando somente na extensão que é maior no período úmido. Por outro lado, foi confirmado que a variabilidade de turbidez tende a ser maior nestas regiões (nordeste e noroeste) durante o período úmido (conforme mostra o mapa de desvio padrão no Material Complementar D). A similaridade nos valores de turbidez entre os períodos úmidos e secos observada na mediana de imagens (Fig. 4) em cada pluma a nordeste e noroeste pode ser atribuída à batimetria, à taxa de renovação das águas e à regulação da circulação pelos efeitos das marés (Bérgamo, 2006). Essas regiões apresentam profundidades inferiores a 5 m, onde sedimentos tendem a acumular-se, com graves problemas de assoreamento (Kjerfve *et al.*, 1997) e o aumento do fluxo dos rios no período úmido permite uma renovação mais rápida das águas em comparação ao período seco (Bérgamo, 2006). Assim, parte dos sedimentos que poderiam ser sedimentados e/ou ressuspensos por ação eólica ou fricção com o fundo durante o período seco é transportada em maior quantidade para o canal central da baía e para a entrada. Este fenômeno pode ser atribuído quando as plumas (a nordeste e noroeste) que são mais próximas do canal central durante o período úmido, transportam mais eficientemente os sedimentos para este canal, ficando menos retidos em suas respectivas

regiões em comparação ao período seco, quando a pluma são menos extensas e não conectam-se das correntes que transportam materiais para o canal central. Por conta disso, o desvio padrão de determinados constituintes opticamente ativos, como por exemplo, a comunidade fitoplanctônica, cujo proxy é a clorofila-a, tende a ser maior durante o período úmido, dado à maior disponibilidade de luz e nutrientes (Oliveira et al., 2016). O nosso mapa de desvio padrão corrobora com esses resultados (Material Complementar D), uma vez que a variabilidade de turbidez é maior no canal central, reforçando nossa tese de que esta região recebe maiores quantidades de materiais advindos das regiões nordeste e noroeste durante o período úmido. Ademais, o tamanho das plumas ainda varia conforme os tipos de marés, sendo maior nas marés de sizígia, seguida da transição e da quadratura, para ambos os períodos, mas sem um padrão claro entre os regimes de enchente e vazante, ou seja, não é possível determinar em qual regime de maré (enchente ou vazante) a turbidez tende a ser maior ou menor. No período úmido, a região central tem valores de turbidez que tendem a variar mais entre as marés, sendo maior na sizígia-vazante e na quadratura-enchente. No período seco, os padrões de turbidez são mais similares entre os tipos e regimes de marés, possivelmente pelo menor fluxo de sedimentos circulando nesta região, como explicado anteriormente. Ademais, também na região central há a presença da pluma oriunda do canal do Cunha (entre a Ilha do Fundão e o Cais do Porto), em que a magnitude de turbidez também é similar entre os períodos úmidos e secos, porém, também é maior em extensão para as marés de sizígia e menor na quadratura. Novamente, temos um indicativo em relação ao transporte de sedimentos dos rios para o interior da baía, mas neste caso, a pluma do canal do Cunha mostrou-se mais influenciada pelos tipos de marés do que por sua vazão.

Após a região central, na área de maior estreitamento da linha de costa da baía que fica entre as Fortalezas de Copacabana (à esquerda) e Santa Cruz da Barra (à direita), os valores de turbidez tendem a ser menores em comparação ao canal central da baía, dado as diferenças de magnitude entre os períodos. Normalmente, os valores de turbidez seriam maiores devido ao estreitamento das margens, mas isso não ocorre, possivelmente pela maior profundidade nessa parte da baía, que varia entre 40 a 50 m, a maior renovação das águas com o oceano e às maiores velocidades das correntes (Bérgamo, 2006).

Na região de entrada, há troca constante das águas estuarinas com as águas oceânicas, e por isso, essa região tende a valores mais baixos em toda baía. Porém, foi observado na Fig. 4 que para o período úmido a turbidez é maior em magnitude. Isso ficou mais nítido quando a região central apresentou valores de turbidez maiores durante o período úmido, ou seja, nas marés de sizígia-vazante e de quadratura-enchente. Analogamente ao possível maior

transporte de sedimentos das regiões nordeste e noroeste para o canal central nestas situações de marés, os sedimentos devem estar sendo transportados em maiores quantidades da região central para a entrada da baía. Além disso, a região de entrada da baía está mais submetida às águas de ressurgência de Cabo Frio e da intrusão das ACAS que são intensificadas durante o verão (período úmido) carregando mais materiais de fundo para a superfície (Bérgamo, 2006), e conseqüentemente elevando a turbidez na região.

Além disso, não é possível afirmar que mais sedimentos são transportados para o interior da baía durante as marés de sizígia em comparação com as marés de quadratura, nem nos regimes de maré de enchente ou vazante. A Fig. 5 demonstrou que a turbidez pode variar espacialmente entre os regimes de enchente e vazante, com regiões onde a turbidez tende a ser maior na vazante e outras onde é maior na enchente. Isso indica a necessidade de estudar outras variáveis hidrológicas, como mudanças nas direções das correntes devido às marés residuais, rajadas de vento que ressuspendem material de fundo e a chegada de frentes (Andrade, Rosman e Azevedo, 2019). Ao considerar partículas em suspensão além dos sedimentos, é crucial destacar o papel significativo do fitoplâncton, que frequentemente floresce na baía e cuja relação com as marés é previamente conhecida (Paranhos et al., 1998). Os blooms de algas na BG geralmente ocorrem próximo às regiões de maior descarga fluvial durante a maré vazante, quando a diluição da água tende a ser menor, especialmente no período úmido. Nessa época, há maior disponibilidade de luz e temperaturas mais elevadas, combinadas com uma maior diferença de densidade das águas, dificultando a dissolução dos materiais em suspensão (Oliveira et al., 2016).

4.4. Monitoramento contínuo da turbidez na Baía de Guanabara

Este estudo permitiu a escolha de um algoritmo mais adequado para a BG para estimar a turbidez utilizando dados do sensor MODIS (Terra) na banda *sur_refl_b01* (645 nm) corrigida por *glint* pela banda *sur_refl_b07* (2141 nm) utilizando o método de Hedley et al., (2005) e usando um modelo simples e facilmente aplicável de regressão polinomial. O algoritmo que teve como base de referência os dados de turbidez medidos *in situ* pelo INEA (órgão ambiental do estado do Rio de Janeiro), garante o monitoramento contínuo para as condições de céu claro ou parcialmente encoberto por nuvens. Recomendamos ao órgão ambiental, como o próprio INEA, a utilização deste produto de sensoriamento remoto como forma de complementação de seu sistema de monitoramento atualmente implementado, diminuindo a lacuna de tempo entre as datas de coleta, podendo diminuir a quantidade de coletas *in situ* em determinadas regiões de menor preocupação ambiental e com

especialização ampla e confiável em até 18,5 NTU, o que reduziria inclusive, o custo de monitoramento.

Para a sociedade como um todo e órgãos públicos e privados interessados, as imagens deste produto de turbidez podem ser consultados gratuitamente em uma série-espaço temporal de turbidez para o ano de 2023 na plataforma do LASA-Alarmes Água, disponível em: <https://alarmes.lasa.ufrj.br/agua/>. Futuramente, serão incorporados novos produtos de qualidade da água na plataforma com imagens de outros sensores orbitais que futuramente substituirão os sensores MODIS (Terra), tais como: VIIRS e PACE. Além de outros satélites como: Sentinel-2 e 3 (A&B), Série Landsat, PRISMA, EnMAP. Além disso, pretendemos realizar parametrizações do algoritmo com base nas medidas horárias da bóia RJ-4 do SiMCOsta, que além da turbidez, inclui medidas meteo-oceanográficas valiosas para análises da dinâmica como um todo.

5. Considerações Finais

Este estudo propôs avaliar a dinâmica de turbidez na BG. Diferentes algoritmos de regressão e aprendizado de máquina foram construídos tendo como base as medidas *in situ* do INEA e dados oriundos da base GLORIA, separadamente. Além disso, também testamos a possibilidade de utilizar-se algoritmos semi-analíticos. Com base nas métricas estatísticas, nas características de turbidez da área de estudo e na praticidade de uso dentro da plataforma Google Earth Engine, o algoritmo polinomial de segunda ordem com base nos matchups do MODIS(Terra)-INEA para a banda *sur_refl_b01* corrigida por glint pela banda *sur_refl_b07* através do método de Hedley et al., (2005), foi utilizado para as séries espaços-temporais. A comparação do algoritmo escolhido com outros estudos de turbidez ou sólidos em suspensão em estuários, mostrou que as regressões polinomiais são eficientes em obter a turbidez (Petus et al. 2010; Ondrusek et al. 2012; Yunus et al. 2021), inclusive dentro da própria plataforma utilizada para o processamento das imagens (Yunus et al., 2021). Concluímos então, que o algoritmo escolhido é capaz de estimar, com alto grau de precisão, a turbidez entre 0,5 a 18,5 NTU, sendo promissor para o monitoramento contínuo, de fácil aplicabilidade e de baixo custo em relação aos que são utilizados atualmente por órgãos ambientais. Desta forma, recomendamos a utilização deste produto por órgãos públicos e privados interessados no monitoramento contínuo da turbidez na BG, tais como: o próprio INEA que apresenta uma lacuna média de 3 meses em cada monitoramento.

O estudo realizado para uma série espaço-temporal de turbidez com mais de 20 anos (2001-2023) de imagens, abre portas para melhor avaliar a dinâmica de constituintes

ópticamente ativos na BG, que são mais precisos para identificar o estado de degradação das águas na área de estudo. Entre os principais resultados observados, fomos capazes de confirmar a influência da sazonalidade, visto que notavelmente na região central e de entrada na baía a turbidez é maior durante o período úmido, possivelmente pelo maior transporte dos sedimentos oriundos das regiões nordeste e noroeste dado a maior vazão dos rios, mas também por outros fenômenos hidrometeorológicos que atuam mais intensivamente durante o período úmido e precisam melhor ser abordados, tais como: as ZCAS e ACAS. Elucidamos também que as extensões das plumas são maiores durante a maré de sizígia em relação a transição e a quadratura, sendo ainda mais alongadas durante o período úmido para ambos os tipos de marés. Por outro lado, a magnitude da turbidez não variou significante nas plumas a nordeste e noroeste sazonalmente, o que pode estar relacionado ao transporte dos materiais em suspensão em maior quantidade para o canal central durante o período úmido, e menor durante o período seco, com os materiais mais retidos e suspenso/ressuspenso em maior tempo próximo à desembocadura dos rios. Contudo, devemos salientar que a turbidez não especifica determinados sedimentos. Este fato limita análises mais precisas em relação a qualidade da água, sobretudo que a BG possui diversos tipos de materiais orgânicos e inorgânicos suspensos ou dissolvidos, principalmente por ser um ambiente eutrofizado com diferentes atividades fitoplanctônicas em diferentes regiões da baía (Tran et al., 2023; Oliveira et al., 2016). Avaliá-los requer o uso de ferramentas de sensoriamento remoto mais atuais com maior resolução espacial e espectral. Uma série temporal de 2023 de turbidez utilizando o algoritmo construído neste estudo está disponível gratuitamente para consulta na plataforma LASA-Alarmes Água.

Financiamento

Faria de Sousa, L.F.M agradece a contemplação da bolsa de estudo da Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) com recursos proveniente do Ministério de Educação (MEC) da república federativa do Brasil.

Referências Bibliográficas

Adjovu, G. E., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of Total Dissolved Solids and Total Suspended Solids in Water Systems: A Review of the Issues, Conventional, and Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 15(14), 3534. <https://doi.org/10.3390/rs15143534>.

Amador, E. (1997). Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: Homem e Natureza. Rio de Janeiro: Retroarte Gráfica e Editora, 539 p.

Andrade, V. S. de, Rosman, P. C. C., & Azevedo, J. P. S. de. (2019). Evaluation of baroclinic effects on mean water levels in Guanabara Bay. *RBRH*, 24. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.241920180112>.

Assunção, A. F. (2023). Uso do sensoriamento remoto para avaliação da dinâmica espaço-temporal de parâmetros de qualidade da água de um reservatório urbano (Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos), Minas Gerais, 174 p.

Augusto-Silva, P., Ogashawara, I., Barbosa, C., de Carvalho, L., Jorge, D., Fornari, C., & Stech, J. (2014). Analysis of MERIS Reflectance Algorithms for Estimating Chlorophyll-a Concentration in a Brazilian Reservoir. *Remote Sensing*, 6(12), 11689–11707. <https://doi.org/10.3390/rs61211689>.

Barros, R. S., Cruz, C. B. M., Medeiros, A. F. F., & Seabra, V. S. (2003). Estimativa de turbidez e temperatura da água a partir de dados dos sensores TM e ETM+ para a Baía de Guanabara. In Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2003, Belo Horizonte: INPE, pp. 2435-2442.

Balasubramanian, S. v., Pahlevan, N., Smith, B., Binding, C., Schalles, J., Loisel, H., Gurlin, D., Greb, S., Alikas, K., Randra, M., Bunkei, M., Moses, W., Nguyễn, H., Lehmann, M. K., O'Donnell, D., Ondrusek, M., Han, T.-H., Fichot, C. G., Moore, T., & Boss, E. (2020). Robust algorithm for estimating total suspended solids (TSS) in inland and nearshore coastal waters. *Remote Sensing of Environment*, 246, 111768. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111768>.

Baptista-Neto, J. A., Gingele, F. X., Leipe, T., & Brehme, I. (2006). Spatial distribution of heavy metals in surficial sediments from Guanabara Bay: Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geology*, 49(7), 1051–1063. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0149-1>.

Bérgamo, A. L. (2006). Características hidrográficas, da circulação e dos transportes de volume e sal na Baía de Guanabara (RJ): variações sazonais e moduladas pela maré. <https://doi.org/10.11606/T.21.2006.tde-22052007-161032>.

Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>.

Brito, E. M. S., Duran, R., Guyoneaud, R., Goñi-Urriza, M., García de Oteyza, T., Crapez, M. A. C., Aleluia, I., & Wasserman, J. C. A. (2009). A case study of in situ oil contamination in a mangrove swamp (Rio De Janeiro, Brazil). *Marine Pollution Bulletin*, 58(3), 418–423. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.12.008>.

Carvalho, L. M. V., Jones, C., & Liebmann, B. (2004). The South Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17(1), 88–108. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2).

- Cervantes, J., García-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & López, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neurocomputing*, 408, 189–215. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.118>.
- Chen, S., Fang, L., Zhang, L., & Huang, W. (2009). Remote sensing of turbidity in seawater intrusion reaches of Pearl River Estuary – A case study in Modaomen water way, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 82(1), 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2009.01.003>.
- Chen, Z., Hu, C., & Muller-Karger, F. (2007). Monitoring turbidity in Tampa Bay using MODIS/Aqua 250-m imagery. *Remote Sensing of Environment*, 109(2), 207–220. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.019>.
- Coelho, V. M. B. (2007). Baía de Guanabara – Uma História de Agressão Ambiental. Rio de Janeiro: Casa da Palavra, 278 p.
- Costa, L. A. A., Pessoa, D. M. M., & Carreira, R. S. (2018). Chemical and biological indicators of sewage river input to an urban tropical estuary (Guanabara Bay, Brazil). *Ecological Indicators*, 90, 513–518. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.03.046>.
- Cordeiro, R. C., Machado, W., Santelli, R. E., Figueiredo, A. G., Seoane, J. C. S., Oliveira, E. P., Freire, A. S., Bidone, E. D., Monteiro, F. F., Silva, F. T., & Meniconi, M. F. G. (2015). Geochemical fractionation of metals and semimetals in surface sediments from tropical impacted estuary (Guanabara Bay, Brazil). *Environmental Earth Sciences*, 74(2), 1363–1378. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4127-y>.
- Cotovicz, L. C., Knoppers, B. A., Brandini, N., Poirier, D., Costa Santos, S. J., Cordeiro, R. C., & Abril, G. (2018). Predominance of phytoplankton-derived dissolved and particulate organic carbon in a highly eutrophic tropical coastal embayment (Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil). *Biogeochemistry*, 137(1–2), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10533-017-0405-y>.
- da Silveira, R. P., Rodrigues, A. P. de C., Santelli, R. E., Cordeiro, R. C., & Bidone, E. D. (2011). Mass balance in the monitoring of pollutants in tidal rivers of the Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 181(1–4), 165–173. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1821-9>.
- DeLuca, N., Zaitchik, B., & Curriero, F. (2018). Can Multispectral Information Improve Remotely Sensed Estimates of Total Suspended Solids? A Statistical Study in Chesapeake Bay. *Remote Sensing*, 10(9), 1393. <https://doi.org/10.3390/rs10091393>.
- Dogliotti, A. I., Ruddick, K. G., Nechad, B., Doxaran, D., & Knaeps, E. (2015). A single algorithm to retrieve turbidity from remotely-sensed data in all coastal and estuarine waters. *Remote Sensing of Environment*, 156, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.09.020>.
- Doxaran, D., Froidefond, J.-M., Castaing, P., & Babin, M. (2009). Dynamics of the turbidity maximum zone in a macrotidal estuary (the Gironde, France): Observations from field and MODIS satellite data. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 81(3), 321–332. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.11.013>.
- D'Sa, E. J., Miller, R. L., & McKee, B. A. (2007). Suspended particulate matter dynamics in coastal waters from ocean color: Application to the northern Gulf of Mexico. *Geophysical Research Letters*, 34(23). <https://doi.org/10.1029/2007GL031192>.
- Du, C., Wang, Q., Li, Y., Lyu, H., Zhu, L., Zheng, Z., Wen, S., Liu, G., & Guo, Y. (2018). Estimation of total phosphorus concentration using a water classification method in inland water. *International*

Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 71, 29–42. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.007>.

Dyer, K. R. (1997). *Estuaries – A Physical Introduction* (2nd edition). Chichester: John Wiley & Sons, 195 p. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 78(2), 693–693. <https://doi.org/10.1017/S0025315400041825>.

Eleveld, M. A., van der Wal, D., & van Kessel, T. (2014). Estuarine suspended particulate matter concentrations from sun-synchronous satellite remote sensing: Tidal and meteorological effects and biases. *Remote Sensing of Environment*, 143, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.12.019>.

Eljaiek-Urzola, M., Sander de Carvalho, L. A., Betancur-Turizo, S. P., Quiñones-Bolaños, E., & Castrillón-Ortiz, C. (2023). Spatial Patterns of Turbidity in Cartagena Bay, Colombia, Using Sentinel-2 Imagery. *Remote Sensing*, 16(1), 179. <https://doi.org/10.3390/rs16010179>.

Fistarol, G. O., Coutinho, F. H., Moreira, A. P. B., Venas, T., Cánovas, A., de Paula, S. E. M., Coutinho, R., de Moura, R. L., Valentin, J. L., Tenenbaum, D. R., Paranhos, R., do Valle, R. de A. B., Vicente, A. C. P., Amado Filho, G. M., Pereira, R. C., Kruger, R., Rezende, C. E., Thompson, C. C., Salomon, P. S., & Thompson, F. L. (2015). Environmental and Sanitary Conditions of Guanabara Bay, Rio de Janeiro. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01232>.

Fries, A. S., Coimbra, J. P., Nemazie, D. A., Summers, R. M., Azevedo, J. P. S., Filoso, S., Newton, M., Gelli, G., de Oliveira, R. C. N., Pessoa, M. A. R., & Dennison, W. C. (2019). Guanabara Bay ecosystem health report card: Science, management, and governance implications. *Regional Studies in Marine Science*, 25, 100474. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2018.100474>.

Gitelson, A. A., Schalles, J. F., & Hladik, C. M. (2007). Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. *Remote Sensing of Environment*, 109(4), 464–472. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.01.016>.

Gómez, D., Salvador, P., Sanz, J., & Casanova, J. L. (2021). A new approach to monitor water quality in the Menor sea (Spain) using satellite data and machine learning methods. *Environmental Pollution*, 286, 117489. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117489>.

Hamidi, S. A., Hosseiny, H., Ekhtari, N., & Khazaei, B. (2017). Using MODIS remote sensing data for mapping the spatio-temporal variability of water quality and river turbid plume. *Journal of Coastal Conservation*, 21(6), 939–950. <https://doi.org/10.1007/s11852-017-0564-y>.

Hedley, J. D., Harborne, A. R., & Mumby, P. J. (2005). Technical note: Simple and robust removal of sun glint for mapping shallow-water benthos. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10), 2107–2112. <https://doi.org/10.1080/01431160500034086>.

Hu, C., Chen, Z., Clayton, T. D., Swarzenski, P., Brock, J. C., & Muller-Karger, F. E. (2004). Assessment of estuarine water-quality indicators using MODIS medium-resolution bands: Initial results from Tampa Bay, FL. *Remote Sensing of Environment*, 93(3), 423–441. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.08.007>.

IOCCG (2019). *Ocean Optics and Biogeochemistry Protocols for Satellite Ocean Colour Sensor Validation, Volume 4.0. Inherent Optical Property Measurements and Protocols: Best Practices for the Collection and Processing of Ship-Based Underway Flow-Through Optical Data* (eds. Neeley, A. R. and Mannino, A.). Dartmouth, NS, Canada: International Ocean-Colour Coordinating Group (IOCCG), 22 pp. (IOCCG Protocol Series Volume 4.0). <https://doi.org/10.25607/OBP-664>

Katlane, R., El Kilani, B., Dhaoui, O., Kateb, F., & Chehata, N. (2023). Monitoring of sea surface temperature, chlorophyll, and turbidity in Tunisian waters from 2005 to 2020 using MODIS imagery

and the Google Earth Engine. *Regional Studies in Marine Science*, 66, 103143. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103143>.

Katlane, R., Nechad, B., Ruddick, K., & Zargouni, F. (2013). Optical remote sensing of turbidity and total suspended matter in the Gulf of Gabes. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(5), 1527–1535. <https://doi.org/10.1007/s12517-011-0438-9>.

King, E. v., Conley, D. C., Masselink, G., Leonardi, N., McCarroll, R. J., & Scott, T. (2019). The Impact of Waves and Tides on Residual Sand Transport on a Sediment-Poor, Energetic, and Macrotidal Continental Shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), 4974–5002. <https://doi.org/10.1029/2018JC014861>.

Kjerfve, B., Ribeiro, C. H. A., Dias, G. T. M., Filippo, A. M., & da Silva Quaresma, V. (1997). Oceanographic characteristics of an impacted coastal bay: Baía de Guanabara, Rio de Janeiro, Brazil. *Continental Shelf Research*, 17(13), 1609–1643. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(97\)00028-9](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(97)00028-9).

Lee, C. M., Hestir, E. L., Tufillaro, N., Palmieri, B., Acuña, S., Osti, A., Bergamaschi, B. A., & Sommer, T. (2021). Monitoring Turbidity in San Francisco Estuary and Sacramento–San Joaquin Delta Using Satellite Remote Sensing. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 57(5), 737–751. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12917>.

Lehmann, M. K., Gurlin, D., Pahlevan, N., Alikas, K., Conroy, T., Anstee, J., Balasubramanian, S. v., Barbosa, C. C. F., Binding, C., Bracher, A., Bresciani, M., Burtner, A., Cao, Z., Dekker, A. G., di Vittorio, C., Drayson, N., Errera, R. M., Fernandez, V., Ficek, D., ... Yue, L. (2023). GLORIA - A globally representative hyperspectral in situ dataset for optical sensing of water quality. *Scientific Data*, 10(1), 100. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-01973-y>.

Liu, J., Qiu, Z., Feng, J., Wong, K. P., Tsou, J. Y., Wang, Y., & Zhang, Y. (2023). Monitoring Total Suspended Solids and Chlorophyll-a Concentrations in Turbid Waters: A Case Study of the Pearl River Estuary and Coast Using Machine Learning. *Remote Sensing*, 15(23), 5559. <https://doi.org/10.3390/rs15235559>.

Luo, Y., Doxaran, D., & Vanhellemont, Q. (2020). Retrieval and Validation of Water Turbidity at Metre-Scale Using Pléiades Satellite Data: A Case Study in the Gironde Estuary. *Remote Sensing*, 12(6), 946. <https://doi.org/10.3390/rs12060946>.

Ma, Y., Song, K., Wen, Z., Liu, G., Shang, Y., Lyu, L., Du, J., Yang, Q., Li, S., Tao, H., & Hou, J. (2021). Remote Sensing of Turbidity for Lakes in Northeast China Using Sentinel-2 Images With Machine Learning Algorithms. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 9132–9146. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3109292>.

Maciel, D., Novo, E., Sander de Carvalho, L., Barbosa, C., Flores Júnior, R., & de Lucia Lobo, F. (2019). Retrieving Total and Inorganic Suspended Sediments in Amazon Floodplain Lakes: A Multisensor Approach. *Remote Sensing*, 11(15), 1744. <https://doi.org/10.3390/rs11151744>.

McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>.

Moreno-Madrinan, M. J., Al-Hamdan, M. Z., Rickman, D. L., & Muller-Karger, F. E. (2010). Using the Surface Reflectance MODIS Terra Product to Estimate Turbidity in Tampa Bay, Florida. *Remote Sensing*, 2(12), 2713–2728. <https://doi.org/10.3390/rs2122713>.

- Nechad, B., Ruddick, K. G., & Neukermans, G. (2009). *Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of turbidity in coastal waters* (C. R. Bostater, Jr., S. P. Mertikas, X. Neyt, & M. Velez-Reyes, Eds.; p. 74730H). <https://doi.org/10.1117/12.830700>.
- Nechad, B., Ruddick, K. G., & Park, Y. (2010). Calibration and validation of a generic multisensor algorithm for mapping of total suspended matter in turbid waters. *Remote Sensing of Environment*, 114(4), 854–866. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.11.022>.
- Nechad, B., Dogliotti, A., Ruddick, K., & Doxaran, D. (2016). Particulate Backscattering Retrieval from Remotely-Sensed Turbidity in Various Coastal and Riverine Turbid Waters. In *Living Planet Symposium* (Vol. 740, pp. 419).
- Neto, J. A. B., Gingele, F. X., Leipe, T., & Brehme, I. (2006). Spatial distribution of heavy metals in surficial sediments from Guanabara Bay: Rio de Janeiro, Brazil. *Environmental Geology*, 49(7), 1051–1063. <https://doi.org/10.1007/s00254-005-0149-1>.
- Niu, C., Tan, K., Jia, X., & Wang, X. (2021). Deep learning based regression for optically inactive inland water quality parameter estimation using airborne hyperspectral imagery. *Environmental Pollution*, 286, 117534. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117534>.
- Novoa, S., Doxaran, D., Ody, A., Vanhellemont, Q., Lafon, V., Lubac, B., & Gernez, P. (2017). Atmospheric Corrections and Multi-Conditional Algorithm for Multi-Sensor Remote Sensing of Suspended Particulate Matter in Low-to-High Turbidity Levels Coastal Waters. *Remote Sensing*, 9(1), 61. <https://doi.org/10.3390/rs9010061>.
- Olivatto, G. P., Martins, M. C. T., Montagner, C. C., Henry, T. B., & Carreira, R. S. (2019). Microplastic contamination in surface waters in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, 139, 157–162. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.12.042>.
- Oliveira, E. N., Fernandes, A. M., Kappel, M., Cordeiro, R. C., Brandini, N., Vinzon, S. B., Grassi, R. M., Pinto, F. N., Fillipo, A. M., & Paranhos, R. (2016). Assessment of remotely sensed chlorophyll- a concentration in Guanabara Bay, Brazil. *Journal of Applied Remote Sensing*, 10(2), 026003. <https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.026003>.
- Ondrusek, Michael., Stengel, Eric., Kinkade, Christopher. S., Vogel, Ronald. L., Keegstra, Phillip., Hunter, Craig., & Kim, Chunai. (2012). The development of a new optical total suspended matter algorithm for the Chesapeake Bay. *Remote Sensing of Environment*, 119, 243–254. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.018>.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., & Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. *Computers & Geosciences*, 28(8), 929–937. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(02\)00013-4](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(02)00013-4).
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., & Duchesnay, E. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(85), 2825–2830.
- Petus, C., Chust, G., Gohin, F., Doxaran, D., Froidefond, J.-M., & Sagarminaga, Y. (2010). Estimating turbidity and total suspended matter in the Adour River plume (South Bay of Biscay) using MODIS 250-m imagery. *Continental Shelf Research*, 30(5), 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.12.007>.

Porto, A. C & Ponte, L. P. (2018). Análise da Taxa de Renovação e Idade da Água do Sistema Estuarino da Baía de Guanabara (Trabalho de conclusão de graduação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Engenharia Ambiental), Rio de Janeiro, 63 p.

Ribeiro, C. H., & Kjerfve, B. (2002). Anthropogenic influence on the water quality in Guanabara Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Regional Environmental Change*, 3(1), 13–19. <https://doi.org/10.1007/s10113-001-0037-5>.

Richardson, C. M., Young, M., & Paytan, A. (2023). Paired Synoptic and Long-Term Monitoring Datasets Reveal Decadal Shifts in Suspended Sediment Supply and Particulate Organic Matter Sources in a River-Estuarine System. *Estuaries and Coasts*, 46(3), 660–677. <https://doi.org/10.1007/s12237-022-01160-z>.

Rocher, J., Jimenez, J. M., Tomas, J., & Lloret, J. (2023). Low-Cost Turbidity Sensor to Determine Eutrophication in Water Bodies. *Sensors*, 23(8), 3913. <https://doi.org/10.3390/s23083913>.

Sagawa, T., Yamashita, Y., Okumura, T., & Yamanokuchi, T. (2019). Satellite Derived Bathymetry Using Machine Learning and Multi-Temporal Satellite Images. *Remote Sensing*, 11(10), 1155. <https://doi.org/10.3390/rs11101155>.

Senez-Mello, T. M., Martins, M. V. A., de Lima Ferreira, P. A., Figueira, R., Castelo, W. F. L., Damasceno, F. L., Hohenegger, J., Pereira, E., Duleba, W., & Gerardes, M. C. (2024). Assessment of anthropogenic pollution in Guanabara Bay (SE Brazil) through biogeochemical data and stable isotope mixing models. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33144-w>.

Silva, W. L., & Dereczynski, C. P. (2014). Climatological Characterization and Observed Trends in Climatic Extremes in the State of Rio de Janeiro. *Anuário Do Instituto de Geociências - UFRJ*, 37(2), 123. https://doi.org/10.11137/2014_2_123_138.

Soares-Gomes, A., da Gama, B. A. P., Baptista Neto, J. A., Freire, D. G., Cordeiro, R. C., Machado, W., Bernardes, M. C., Coutinho, R., Thompson, F. L., & Pereira, R. C. (2016). An environmental overview of Guanabara Bay, Rio de Janeiro. *Regional Studies in Marine Science*, 8, 319–330. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.01.009>.

Terauchi, G., Tsujimoto, R., Ishizaka, J., & Nakata, H. (2014). Preliminary assessment of eutrophication by remotely sensed chlorophyll-a in Toyama Bay, the Sea of Japan. *Journal of Oceanography*, 70(2), 175–184. <https://doi.org/10.1007/s10872-014-0222-z>.

Tran, M.D., Vantrepotte, V., Loisel, H., Oliveira, E.N., Tran, K.T., Jorge, D., Mériaux, X., Paranhos, R., 2023. Band Ratios Combination for Estimating Chlorophyll-a from Sentinel-2 and Sentinel-3 in Coastal Waters. *Remote Sens*. 15. <https://doi.org/10.3390/rs15061653>

Wang, S., Shen, M., Ma, Y., Chen, G., You, Y., & Liu, W. (2019). Application of Remote Sensing to Identify and Monitor Seasonal and Interannual Changes of Water Turbidity in Yellow River Estuary, China. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(7), 4904–4917. <https://doi.org/10.1029/2019JC015106>.

Wang, X., Gong, Z., & Pu, R. (2018). Estimation of chlorophyll a content in inland turbidity waters using WorldView-2 imagery: a case study of the Guanting Reservoir, Beijing, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(10), 620. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6978-7>.

Yunus, A. P., Masago, Y., & Hijioka, Y. (2021). Analysis of long-term (2002–2020) trends and peak events in total suspended solids concentrations in the Chesapeake Bay using MODIS imagery. *Journal of Environmental Management*, 299, 113550. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113550>.

Zhang, X., Fichot, C. G., Baracco, C., Guo, R., Neugebauer, S., Bengtsson, Z., Ganju, N., & Fagherazzi, S. (2020). Determining the drivers of suspended sediment dynamics in tidal marsh-influenced estuaries using high-resolution ocean color remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 240, 111682. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111682>.

ANEXOS

Anexo I - Tabela com a vazão média dos principais rios tributários da Baía de Guanabara para os meses de verão e inverno. Adaptado de (Porto e Pontes, 2018)

Principais rios tributários	Vazão média (m³/s) - Verão	Vazão média (m³/s) - Inverno
Canal do Manguê	3,88	3,03
Canal do Cunha	7,85	6,37
Rio Irajá	3,19	2,33
Rio São João de Meriti	13,59	10,15
Rio Sarapuí	10,85	7,84
Rio Iguaçú	20,14	11,57
Rio Estrela	9,36	3,94
Rio Suruí	1,80	0,76
Rio Iriri	0,42	0,18
Rio Roncador	2,45	1,03
Canal de Magé	0,44	0,18
Rio Guapi-Macacu	26,83	11,28
Rio Caceribu	17,26	7,26
Rio Imboassú	0,81	0,34
Rio Guaxindiba/Alcântara	4,66	1,96

Anexo II - Estatísticas básicas do monitoramento *in situ* do FEEMA+INEA (1980-2022) para os meses de coleta da água contendo média, desvio padrão e quantidade de coleta para os 21 pontos de coleta na BG.

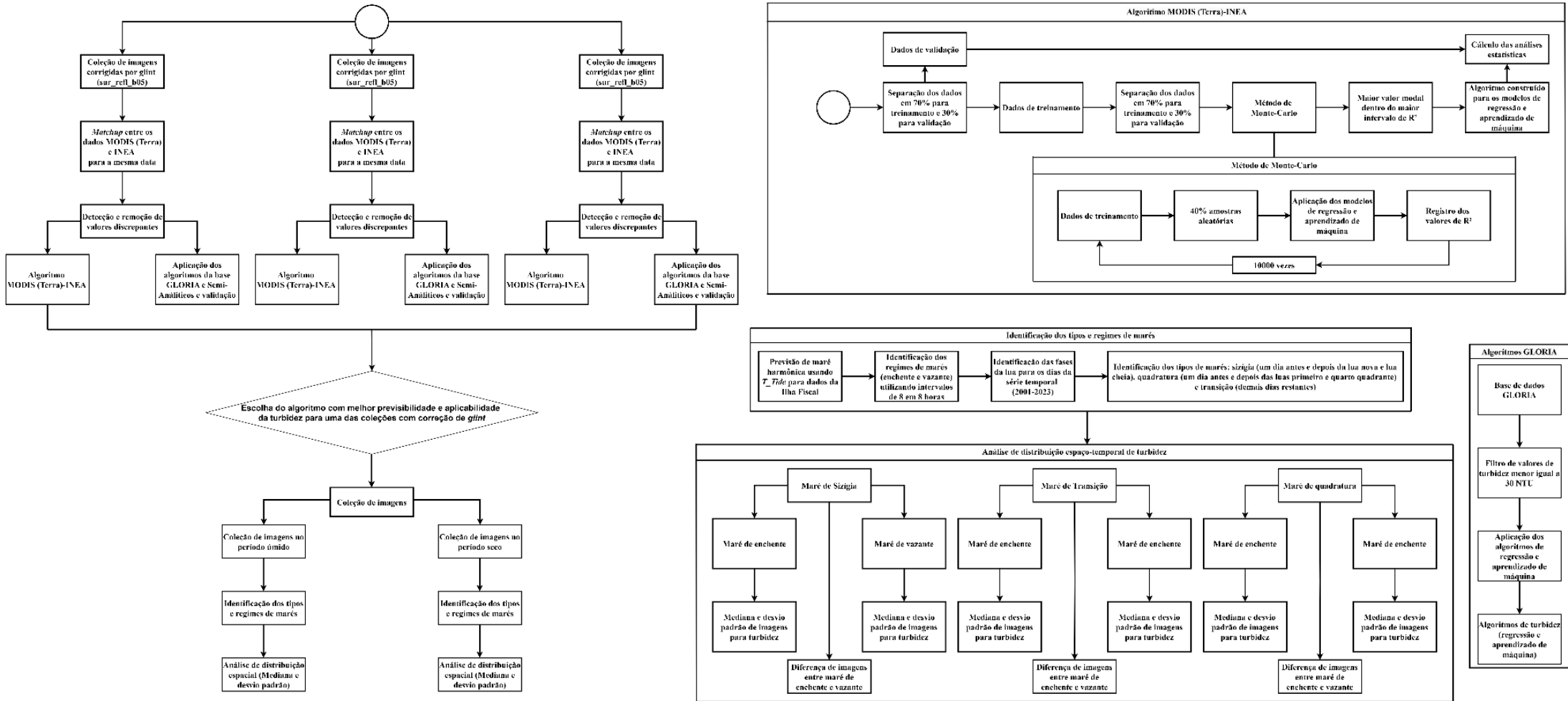
Local	Lon	Lat	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
02RJ10GN0000	-43,11	-22,72	3,42 (n=4)	6,73 ±	6,67 ±	6,44 ±	5,77 ±	6,23 ±	3,06 ±	4,31 ±	7,29 ±	10,64 ±	5,79 ±	7,16 ±	
				6,64 (n=6)	8,74	7,56 ±	5,13								2,43
02RJ10GN0020	-43,23	-22,78	5,02 (n=5)	10,72 ±	7,45	7,4 ± 3,15	8,94 ±	16,07	8,51 ± 4,1	3,08	4,15	5,65	13,52 ±	10,12	8,85
				5,02 (n=5)	(n=10)	(n=12)	3,76 (n=8)	(n=12)	(n=8)	(n=12)	(n=11)	(n=13)	9,02 (n=9)	(n=15)	(n=11)
02RJ10GN0022	-43,2	-22,88	6,58 (n=4)	7,25 ±	2,51	4,4 ± 2,78	3,25	8,07	5,53	3,18 ±	3,92 ± 2,4	4,9 ± 3,46	6,95 ± 7,7	4,87	5,19 ± 2,9
				(n=12)	(n=13)	(n=10)	(n=15)	(n=10)	2,08 (n=8)	(n=12)	(n=12)	(n=12)	(n=15)	(n=11)	
02RJ10GN0024	-43,11	-22,92	(n=2)	4,9 ± 0,56	2,24 ±	2,76 ±	1,64 ±	2,51 ±	1,37 ±	1,5 ±	2,5 ± 2,21	2,18 ±	2,19 ±	2,23 ±	2,54 ±
				1,51 (n=4)	1,49 (n=3)	0,62 (n=3)	1,46 (n=7)	0,44 (n=4)	(n=1)	(n=4)	1,07 (n=3)	0,52 (n=6)	1,57 (n=4)	1,21 (n=4)	
02RJ10GN0025	-43,17	-22,94	(n=2)	3,26 ± 0,8	2,49 ±	1,99 ±	3,78 ±	5,3 ± 6,28	3,44 ±	2,92 ±	2,04 ±	4,74 ±	5,12 ±	3,09 ±	3,76 ±
				2,36 (n=8)	1,25 (n=7)	3,69 (n=5)	(n=8)	2,97 (n=7)	1,36 (n=6)	0,65 (n=5)	5,52 (n=4)	3,76 (n=8)	3,18 (n=6)	2,88 (n=7)	
02RJ10GN0026	-43,13	-22,85	6,31 (n=3)	10,13 ±	2,72	3,2 ± 1,16	4,8 ± 4,06	6,31	11,61	1,12	2,73	4,3 ± 3,31	6,48 ± 4,1	5,86	3,19
				(n=10)	(n=12)	(n=8)	(n=13)	(n=10)	(n=10)	(n=12)	(n=10)	(n=11)	(n=10)	(n=11)	
02RJ10GN0034	-43,16	-22,92	(n=3)	15,61	1,44 ±	1,65 ±	1,62 ±	1,92 ±	1,49 ±	6,22 ±	3,42 ±	2,57 ±	2,58 ±	2,11 ±	7,77 ±
				0,89 (n=4)	1,34 (n=3)	0,99 (n=3)	0,63 (n=6)	0,16 (n=4)	6,99 (n=5)	4,82 (n=7)	1,04 (n=3)	1,13 (n=5)	2,07 (n=4)	9,21 (n=4)	
02RJ10GN0040	-43,27	-22,8	5,74 (n=4)	14,75 ±	15,62 ±	5,21	14,58 ±	21,88	12,73	9,83 ±	11,29 ±	14,25 ±	6,84	4,79	9,98 ±
				7,17 (n=8)	(n=11)	6,04 (n=9)	(n=14)	(n=8)	8,45 (n=9)	9,68 (n=9)	8,3 (n=12)	(n=11)	(n=15)	5,85 (n=9)	
02RJ10GN0042	-43,16	-22,75	3,71 (n=3)	6,73 ±	5,7 ± 3,87	3,9 ± 1,4	8,31 ±	8,35	9,06 ±	4,29 ±	3,46	5,52	14,84	5,31	5,15
				(n=6)	(n=10)	4,01 (n=7)	(n=14)	8,02 (n=8)	2,47 (n=8)	(n=10)	(n=11)	(n=11)	(n=10)	(n=10)	
02RJ10GN0043	-43,23	-22,84	2,33 (n=4)	7,75 ±	6,66 ±	2,97	7,64 ±	8,1 ± 7,09	5,93 ±	4,28 ±	4,46 ±	4,07	8,22	6,7 ± 3,56	7,49 ±
				3,86 (n=7)	(n=10)	3,47 (n=9)	(n=15)	5,37 (n=5)	2,41 (n=9)	2,99 (n=9)	(n=12)	(n=10)	(n=14)	3,53 (n=6)	
02RJ10GN0044	-43,23	-22,76	3,82 (n=2)	16,3 ±	18,1 ±	31,29	13,15 ±	16,03 ±	9,44 ±	6,2 ±	10,13 ±	17,73 ±	10,63	19,11	10,34
				2,69 (n=2)	(n=3)	7,42 (n=2)	8,8 (n=6)	5,74 (n=4)	(n=1)	2,86 (n=4)	4,97 (n=3)	(n=6)	(n=4)	(n=4)	

02RJ10GN0047	-43,12	-22,91	6,7 ± 4,67 (n=2)	2,84 ± 2,3 (n=8)	2,03 ± 0,84 (n=7)	3,76 ± 3,62 (n=5)	5,19 ± 5,93 (n=9)	3,06 ± 2,32 (n=7)	2,48 ± 0,85 (n=6)	2,26 ± 1,11 (n=6)	3,88 ± 4,83 (n=5)	3,64 ± 0,96 (n=8)	2,06 ± 0,91 (n=6)	3,6 ± 2,74 (n=8)
02RJ10GN0048	-43,26	-22,83	14,0 ± (n=1)	11,0 ± (n=1)	9,75 ± 3,75 (n=2)	7,05 ± 4,17 (n=2)	11,26 ± 5,55 (n=6)	7,7 ± 3,25 (n=2)		1,15 ± 1,15 (n=2)	1,2 ± 1,2 (n=2)	3,76 ± 3,76 (n=5)	4,04 ± 4,04 (n=6)	3,44 ± 3,44 (n=2)
02RJ10GN0050	-43,22	-22,87	24,75 ± 8,13 (n=2)	5,53 ± 2,96 (n=4)	11,47 ± 7,9 (n=3)	8,53 ± 8,47 (n=3)	13,42 (n=6)	18,15 ± 8,44 (n=4)		17,52 ± 13,43 (n=4)	18,73 ± 12,3 (n=3)	17,72 ± 11,28 (n=6)	17,26 ± 15,39 (n=6)	9,01 ± 6,47 (n=4)
02RJ10GN0060	-43,08	-22,72	7,53 ± 1,6 (n=2)	7,41 ± 1,12 (n=2)	8,66 ± 1,45 (n=3)	16,85 ± 6,86 (n=2)	9,91 ± 6,38 (n=6)	12,04 (n=4)	15,0 ± 15,0 (n=1)	7,1 ± 1,49 (n=4)	13,9 ± 5,37 (n=3)	14,51 ± 8,25 (n=6)	8,28 ± 6,49 (n=4)	13,14 ± 5,55 (n=4)
02RJ10GN0061	-43,11	-22,77	7,62 ± 2,57 (n=2)	3,88 ± 2,43 (n=2)	5,21 ± 0,67 (n=3)	11,31 (n=2)	4,56 ± 2,23 (n=6)	4,25 ± 2,69 (n=4)	2,3 ± 2,3 (n=1)	3,38 ± 1,0 (n=4)	11,87 ± 8,1 (n=3)	9,33 ± 3,78 (n=6)	4,06 ± 3,8 (n=4)	6,43 ± 3,58 (n=4)
02RJ10GN0062	-43,15	-22,82	6,61 ± 4,4 (n=2)	14,41 (n=3)	3,14 ± 0,84 (n=3)	4,72 ± 3,99 (n=2)	3,48 ± 2,17 (n=6)	2,76 ± 1,71 (n=3)	3,6 ± 3,6 (n=1)	2,73 ± 0,85 (n=4)	6,27 ± 5,95 (n=3)	3,69 ± 1,81 (n=6)	2,47 ± 2,12 (n=4)	7,46 ± 4,91 (n=4)
02RJ10GN0063	-43,15	-22,89	4,28 ± 4,93 (n=2)	2,34 ± 1,51 (n=4)	2,7 ± 2,6 (n=4)	1,46 ± 1,03 (n=3)	2,37 ± 1,11 (n=6)	3,13 ± 0,74 (n=4)	5,71 ± 7,46 (n=4)	2,17 ± 0,4 (n=5)	3,4 ± 2,82 (n=3)	4,01 ± 1,06 (n=5)	2,3 ± 1,95 (n=4)	8,72 ± 9,67 (n=4)
02RJ10GN0064	-43,13	-22,93	8,19 ± 12,6 (n=5)	1,94 (n=12)	0,89 (n=12)	2,97 ± 3,57 (n=6)	5,12 (n=13)	2,03 (n=10)	3,64 (n=12)	2,97 (n=15)	3,37 (n=11)	1,14 (n=11)	1,8 ± 0,9 (n=10)	6,46 (n=12)
02RJ10GN0093	-43,13	-22,97	10,73 ± 18,85 (n=4)	1,0 ± 0,8 (n=3)	1,66 ± 1,87 (n=4)	0,88 ± 0,16 (n=2)	1,66 ± 0,71 (n=5)	2,99 ± 3,01 (n=5)	4,53 ± 6,47 (n=5)	1,81 ± 0,5 (n=6)	1,25 ± 0,52 (n=4)	1,58 ± 0,59 (n=5)	1,22 ± 0,58 (n=6)	13,54 (n=4)
02RJ10GN0306	-43,14	-22,94	14,78 ± 17,19 (n=3)	2,75 ± 2,2 (n=9)	1,76 ± 0,62 (n=7)	3,28 ± 3,93 (n=5)	4,16 ± 4,54 (n=8)	2,77 ± 2,14 (n=8)	4,11 ± 4,96 (n=8)	3,05 ± 4,0 (n=9)	3,04 ± 3,44 (n=6)	3,05 ± 0,71 (n=8)	2,47 ± 2,24 (n=9)	6,78 ± 8,98 (n=8)

Anexo III - Estatísticas básicas gerais de turbidez para os dados da base GLORIA

Faixa de valores	Média	Desvio Padrão	n
Todos os valores	15,83	32,27	1232
Valores de turbidez até 30 NTU	9,04	7,19	1084

Anexo IV - Fluxograma Metodológico



MATERIAL COMPLEMENTAR

Material Complementar A - Construção e validação dos algoritmos MODIS (Terra)-INEA

A construção dos algoritmos MODIS (Terra)-INEA baseia-se no *matchups* entre os dados do MODIS-Terra nas bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* e as medidas de turbidez *in situ* pelo INEA para os testes de correção de *glint* nas diferentes bandas do SWIR (*sur_refl_b05*, *sur_refl_b06* e *sur_refl_b07*) do sensor MODIS-Terra. Adicionamos um mapa (Fig. 1A) com os pontos de monitoramento *in situ* em que ocorreram *matchups* na BG dentro do buffer negativo de 500 m na baía. E uma tabela (Tab. 1A) também é adicionada para mostrar a quantidade de *matchups* nos diferentes testes de correção de *glint*.

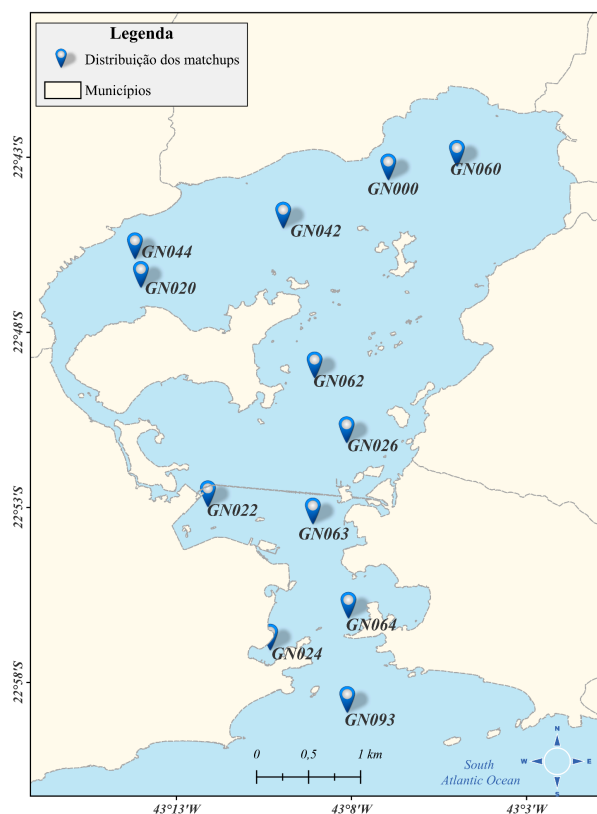


Fig. 1A | Distribuição espacial dos matchups entre os dados do MODIS-Terra e INEA.

Tab. 1A | Tabela de matchups absoluto e percentual para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* com os testes de correção de *glint* nas diferentes bandas do SWIR dos sensores MODIS-Terra.

Teste de <i>glint</i> /Matchup	<i>sur_refl_b01</i> /INEA	<i>sur_refl_b02</i> /INEA
Banda <i>sur_refl_b05</i>	55 (5,6 %)	51 (5,1 %)
Banda <i>sur_refl_b06</i>	63 (6,3 %)	59 (5,9 %)
Banda <i>sur_refl_b07</i>	45 (4,5 %)	52 (5,2 %)

A distribuição dos pontos de coleta (Fig. 1A) para a construção do algoritmo de estimativa da turbidez, abrange diferentes setores da baía. Esta abrangência é importante para a visualização dos padrões de turbidez propostos neste estudo, visto que a BG é um estuário que apresenta complexo sistema de rios e canais que indicam a entrada vários tipos de materiais. Os diferentes números de *matchups* entre as bandas e os testes de *glint* refletem os valores negativos decorrentes da hipercorreção atribuídos à correção de *glint*. A seleção dos dados de treinamento (70% dos dados) e validação (30% dos dados) dos *matchups* (absoluto e percentual) vistos na Tab. 1A são ilustrados na Fig. 2A.

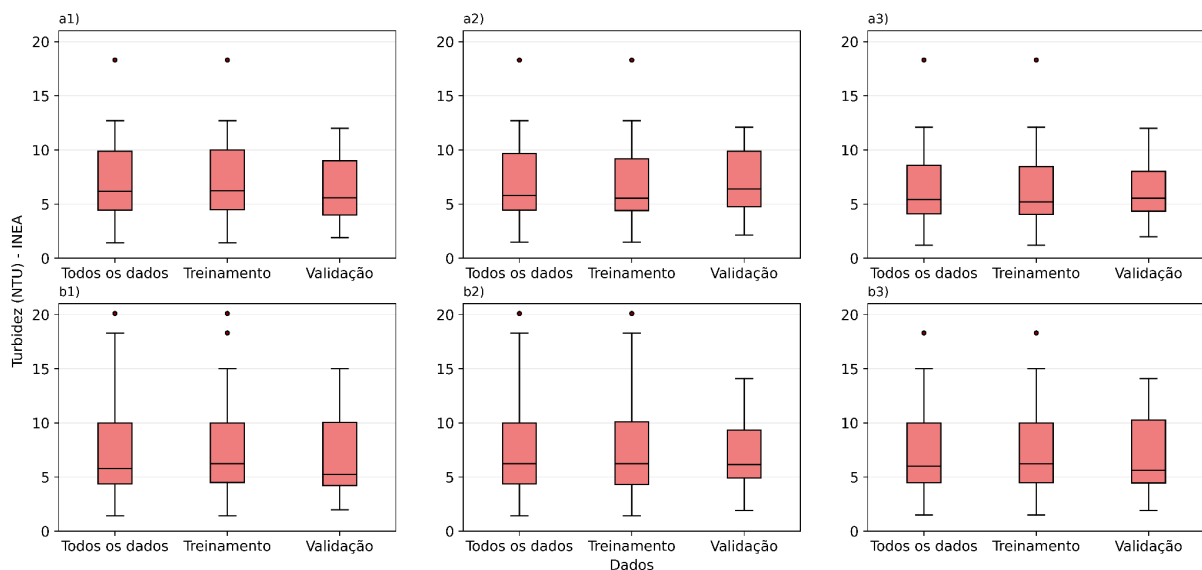


Fig. 2A | Boxplot de distribuição de turbidez (NTU) para os dados de treinamento e validação para as bandas *sur_refl_b01* (linha a) e *sur_refl_b02* (linha b) corrigidas para *glint* pelas bandas *sur_refl_b05*, *sur_refl_b06* e *sur_refl_b07* (coluna 1, coluna 2 e coluna 3, respectivamente).

Avaliando os conjuntos de treinamento e validação para os *matchups* para a banda *sur_refl_b01*, o limite superior e inferior nos conjuntos corrigido por *glint* pela banda *sur_refl_b05* (Fig. 2A-a1), *sur_refl_b06* (Fig. 2A-a2) e *sur_refl_b07* (Fig. 2A-a3) variam em torno de 0,5 a ~12 NTU, tanto para os dados de treinamento, quanto para os dados de validação. Observa-se que mantivemos nos conjuntos de treinamento para banda *sur_refl_b01* um valor discrepante (acima do limite superior) em torno de 18,5 NTU, de modo a garantir um valor mais alto de turbidez seja, embora não haja validação para este valor discrepante. Em relação aos conjuntos de treinamento para a banda *sur_refl_b02* corrigido por *glint* pelas bandas *sur_refl_b01* (Fig. 2A-b1), *sur_refl_b02* (Fig. 2A-b2) e *sur_refl_b03* (Fig. 2A-b3) temos valores de treinamento e validação no limite inferior e superior em torno de 0,5 a 15 NTU, exceto no conjunto de *glint sur_refl_b05* em que os

valores estão entre 0,5 a ~19 NTU. Para os conjuntos de treinamento para a banda *sur_refl_b02* também mantivemos valores acima do limite superior pelo mesmos motivos citados para a banda *sur_refl_b01*.

A construção dos algoritmos envolve a aplicação do método de Monte-Carlo. Antes disso, foi realizada a escolha dos melhores hiperparâmetros dos modelos de aprendizado de máquina para os dados de treinamento através do método *GridSearch*, cujo resultado das buscas estão disponíveis na Tab. 2A.

Tab. 2A | Tabela dos melhores hiperparâmetros encontrados pelo *GridSearch* dos modelos RF e SVR para os dados de treinamento dos MODIS (Terra)-INEA

Modelos	Hiperparâmetros	<i>sur_refl_b05</i>	<i>sur_refl_b06</i>	<i>sur_refl_b07</i>
		<i>sur_refl_b01/sur_refl_b02</i>	<i>sur_refl_b01/sur_refl_b02</i>	<i>sur_refl_b01/sur_refl_b02</i>
SVR	Kernel	sigmoid/rbf	rbf/rbf	rbf/rbf
	Gamma	10/10	10/10	1/10
	C	500/10000	3000/10000	10000/10000
	Epsilon	1/1	1/1	1/1
RF	N_estimators	10/100	10/50	10/50
	Max depth	2/2	2/2	2/10
	Criterion	absolute_error/absolute_error	absolute_error/absolute_error	absolute_error/absolute_error

Com isso, os resultados da calibração por Monte-Carlo para os algoritmos de regressão e aprendizado de máquina nas estimativas da turbidez podem ser consultados na Fig. 3A-a (*sur_refl_b01*) e Fig. 3A-b (*sur_refl_b02*).

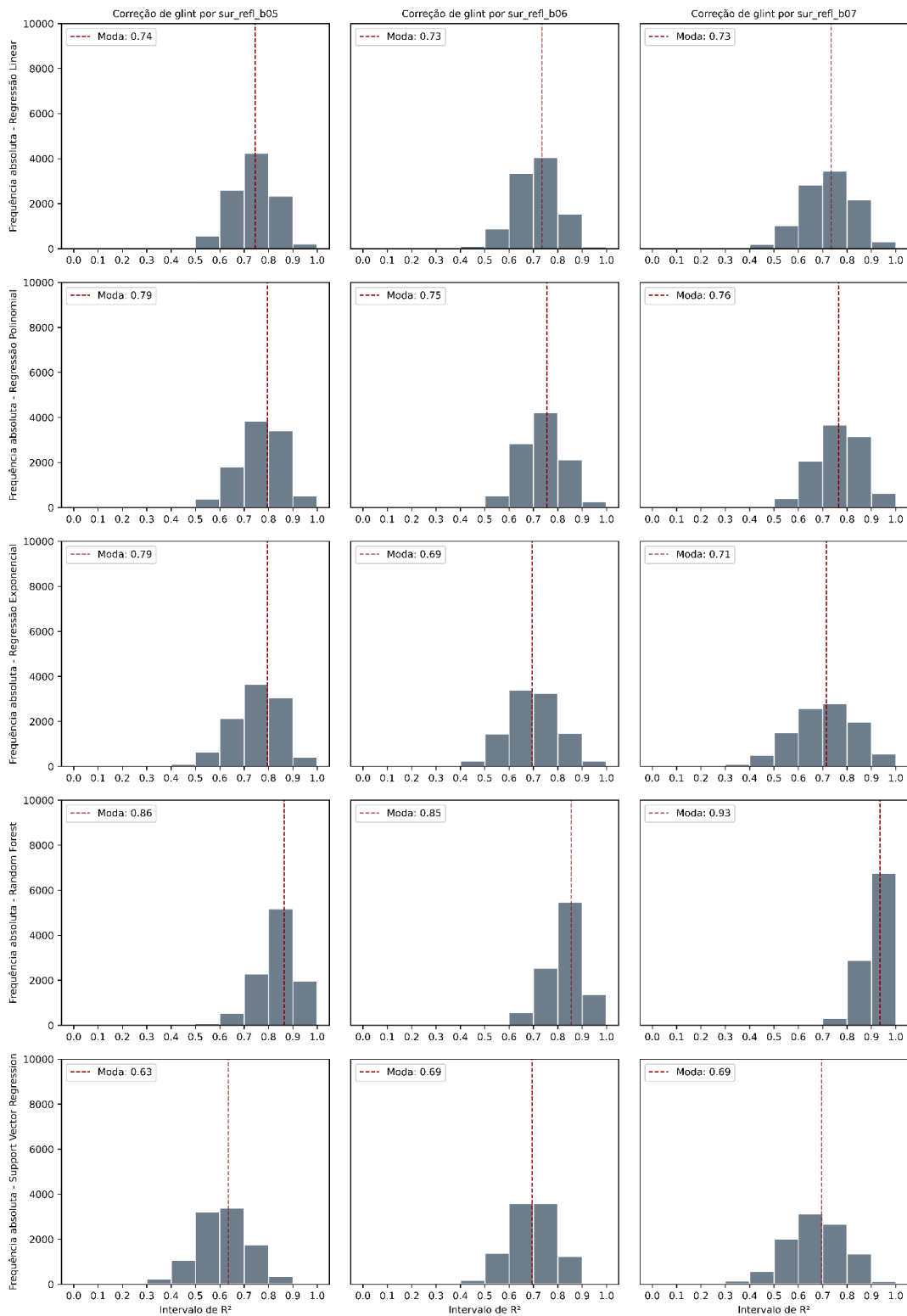


Fig. 3A-a | Histograma de R^2 dos modelos matemáticos tradicionais (RL, RP e RE) e de aprendizado de máquina (RF e SVR) aplicados à banda *sur_refl_b01* em cada teste de correção de *glint*. A linha vermelha tracejada indica o maior valor modal de R^2 dentro dos intervalos de maior frequência.

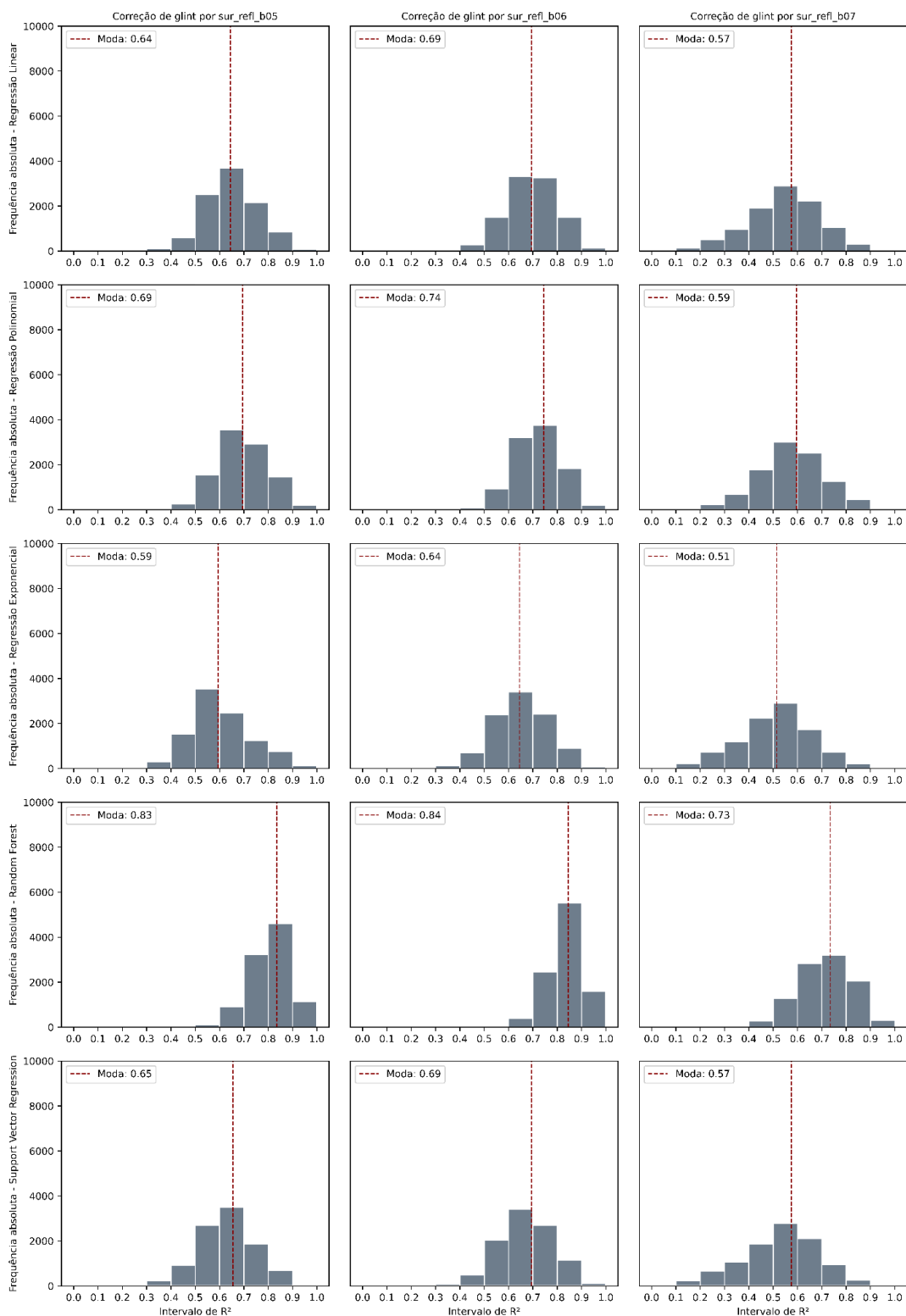


Fig. 3A-b | Histograma de R^2 dos modelos matemáticos tradicionais (RL, RP e RE) e de aprendizado de máquina (RF e SVR) aplicados à banda *sur_refl_b02* em cada teste de correção de *glint*. A linha vermelha tracejada indica o maior valor modal de R^2 dentro dos intervalos de maior frequência.

O intervalo mais frequente de R^2 para os dados de treinamento da banda *sur_refl_b01* (Fig. 3A-a) variou de 0,7 a 0,8 na maior parte dos testes de correção de *glint* para ambos os

modelos matemáticos. No entanto, para o modelo RF, observou-se um intervalo mais frequente de R^2 entre 0,8 a 0,9 nos testes de *glint* das bandas *sur_refl_b05* e *sur_refl_b06*, e entre 0,9 a 1,0 para a banda *sur_refl_b07*. Para os dados de treinamento da banda *sur_refl_b02* (Fig. 3A-b), o intervalo mais frequente de R^2 situou-se entre 0,6 a 0,7 na maioria dos testes de correção de *glint*, considerando os modelos matemáticos utilizados. Novamente, o modelo RF apresentou calibrações superiores, com valores de R^2 entre 0,8 a 0,9 nos testes de correção de *glint* para as bandas *sur_refl_b05* e *sur_refl_b06*, e entre 0,7 a 0,8 para a banda *sur_refl_b07*. As equações resultantes dos modelos de regressão para estimar turbidez nas bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* em cada teste de correção de *glint* são apresentadas na Tab. 3A. Para os modelos de aprendizado de máquina, as equações resultantes foram escritas na tabela devido à elevada quantidade de termos das equações.

Tab. 3A | Tabela de algoritmo de estimativa da turbidez a partir do MODIS-Terra para os modelos de regressão.

Modelos	<i>sur_refl_b01</i> (645 nm)	<i>sur_refl_b02</i> (~859 nm)	Teste de <i>glint</i>
RL	$T = 329,24R + 1,05$	$T = 682,33R + 1,84$	
RP	$T = 2081,04R^2 + 269,54R + 1,59$	$T = -28002,64R^2 + 1228,42R - 1,21$	<i>sur_refl_b05</i>
EP	$T = 1,51e^{(72,41R)}$	$T = 3,13e^{(85,67*R)}$	
RL	$T = 449,41R - 1,38$	$T = 591,69R + 0,98$	
RP	$T = -13507,80R^2 + 826,75R - 2,78$	$T = 6438,66R^2 + 629,44R + 0,29$	<i>sur_refl_b06</i>
EP	$T = 2,94e^{(42,89R)}$	$T = 2,91e^{(71,45R)}$	
RL	$T = 381,13R - 0,67$	$T = 377,99R + 2,89$	
RP	$T = 7181,41R^2 + 140,1R + 1,1$	$T = 1899,35R^2 + 372,71R + 2,85$	<i>sur_refl_b07</i>
EP	$T = 1,55e^{(64,58R)}$	$T = 4,11e^{(67,06*R)}$	

O resultado das métricas estatísticas (Tab. 4A) mostram o desempenho dos algoritmos de estimativa da turbidez para os conjuntos de validação de cada teste de correção de *glint* para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02*.

Tab. 4A | Tabela de validação dos algoritmos de turbidez construídos para o sensor MODIS-Terra, onde os melhores resultados para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02* em cada teste de correção de glint para as métricas estatísticas estão destacados em negrito.

Modelos	<i>sur_refl_b01</i> (645 nm)			<i>sur_refl_b02</i> (~859 nm)			Teste de glint
	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	
RL	23,52	1,72	0,36	34,33	2,56	1,93	
RP	27,25	1,89	0,64	21,36	1,53	0,11	
EP	26,44	2,93	0,03	35,30	3,59	2,29	<i>sur_refl_b05</i>
RF	32,82	2,07	0,56	21,43	1,92	-0,37	
SVR	31,86	1,73	0,43	19,80	1,41	0,13	
RL	30,74	2,32	0,53	22,66	2,01	-0,55	
RP	26,98	1,85	0,27	28,18	2,32	-0,15	
EP	29,68	1,95	0,35	26,93	2,32	-0,94	<i>sur_refl_b06</i>
RF	33,45	2,37	0,63	28,48	2,07	0,21	
SVR	25,20	1,91	-0,42	34,89	2,56	-0,34	
RL	22	1,53	-0,4	34,24	2,27	-0,19	
RP	20,1	1,42	-0,34	33,89	2,2	-0,02	
EP	22,85	1,9	-1,15	52,70	3,05	1,92	<i>sur_refl_b07</i>
RF	29,49	2,1	0,34	33,97	2,35	0,6	
SVR	22	2,1	-1,13	33,69	2,11	0,4	

Material Complementar B - Construção e validação para os dados da base GLORIA

Os algoritmos de estimativa da turbidez para os dados da base GLORIA foram construídos para valores de turbidez abaixo de 30 NTU. Previamente a aplicação dos modelos de aprendizado de máquina, os melhores hiperparâmetros encontrados pelo método GridSearch para os dados da base GLORIA estão disponíveis na Tab. 1B.

Tab. 1B | Tabela dos melhores hiperparâmetros encontrados pelo *GridSearch* dos modelos RF e SVR para os dados da base GLORIA.

Modelos	Hiperparâmetros	R simulada (645 nm)	R simulada (~859 nm)
SVR	Kernel	rbf	rbf
	Gamma	1	10
	C	10000	10000
	Epsilon	1	1
RF	N estimators	10	1000
	Max_depth	10	2
	Criterion	squared error	absolute error

As equações resultantes dos algoritmos de regressão baseado nos dados GLORIA podem ser consultadas na Tab. 2B. Assim como a construção do algoritmo anterior (MODIS(Terra)-INEA), as equações dos modelos de aprendizado de máquina não foram escritas na tabela devido à elevada quantidade de termos das equações.

Tab. 2B | Algoritmos de estimativa da turbidez para os dados da base GLORIA filtrados para valores de turbidez abaixo de 30 NTU.

Modelos	R simulada (645 nm)	R simulada (~859 nm)	Dados
RL	$T = 111,05R + 5,65$	$T = 294,04R + 9,2$	
RP	$T = -976,22R^2 + 249,77R + 3,33$	$T = -5814,9R^2 + 871,77R + 6,42$	NTU <= 30
EP	$T = 7,32e^{(6,5R)}$	$T = 10,57e^{(8,65R)}$	

O resultado das métricas estatísticas (Tab. 3B) mostram o desempenho dos algoritmos da base GLORIA nas estimativa de turbidez para todo o conjunto de *matchups* do MODIS-INEA de cada teste de correção de *glint* para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02*.

Tab. 3B | Tabela de validação dos algoritmos de turbidez construídos para os dados da base GLORIA filtrados para valores de turbidez abaixo de 30 NTU. Os melhores resultados para as reflectâncias simuladas para as bandas do MODIS-Terra em cada teste de correção de *glint* para as métricas estatísticas estão destacados em negrito.

Modelos	R simulada (645 nm)			R simulada (~859 nm)			Teste de <i>glint</i>
	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	

RL	52,91	2,81	0,69	131,89	5,66	4,73	
RP	37,97	2,23	0,50	146,23	7,48	7,03	
EP	67,07	3,35	1,27	133,62	5,66	4,08	<i>sur_refl_b05</i>
RF	29,16	2,44	-0,49	185,72	8,87	8,30	
SVR	29,04	2,21	0,43	139,58	8,15	7,47	
RL	52,20	2,77	0,90	126,93	5,56	4,62	
RP	39,04	2,24	0,78	139,58	7,28	6,82	
EP	65,85	3,31	1,45	129,28	5,59	4,02	<i>sur_refl_b06</i>
RF	31,11	2,45	-0,05	179,10	8,83	8,24	
SVR	30,80	2,42	0,88	132,39	7,88	7,21	
RL	75,50	3,14	1,37	123,69	5,66	4,84	
RP	59,40	2,59	1,20	141,94	7,68	7,14	
EP	93,00	3,72	1,94	123,72	5,53	4,20	<i>sur_refl_b07</i>
RF	42,54	2,76	0,52	178,08	9,13	8,59	
SVR	32,92	2,32	1,16	137,69	8,37	7,57	

Material Complementar C - Validação dos algoritmos semi-analíticos

Em relação aos algoritmos globais de turbidez, o resultado das métricas estatísticas (Tab. 1C) mostra o desempenho dos modelos em todo o conjunto de *matchups* do MODIS-INEA de cada teste de correção de *glint* para as bandas *sur_refl_b01* e *sur_refl_b02*.

Tab. 1C | Tabela de validação dos algoritmos de turbidez dos algoritmos globais de estimativa de turbidez. Os melhores resultados para as reflectâncias em 645 nm e 859 nm para cada teste de correção de *glint* das métricas estatísticas estão destacados em negrito.

Modelos	R (645 nm)			R (~859 nm)			Teste de <i>glint</i>
	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	MAPE (%)	RMSE (NTU)	BIAS (NTU)	
Nechad et al., (2009)	37,15	3,27	-2,6	210,29	18,43	15,1	
Dogliotti et al., (2015)	32,53	2,91	-2,19	363,9	31,48	26,25	<i>sur_refl_b05</i>
Nechad et al., (2016)	67,71	5,62	4,54	316,43	27,44	22,8	
Nechad et al., (2009)	33,69	2,98	-2,27	198,13	17,64	14,43	
Dogliotti et al., (2015)	29,35	2,64	-1,84	345,73	30,3	25,3	<i>sur_refl_b06</i>
Nechad et al., (2016)	78,37	6,26	5,15	300,12	26,38	21,94	
Nechad et al., (2009)	28,96	2,82	-1,93	214,98	18,27	15,01	
Dogliotti et al., (2015)	26,04	2,5	-1,51	370,92	31	26,08	<i>sur_refl_b07</i>
Nechad et al., (2016)	99,63	6	5,23	322,73	27,06	22,66	

Material Complementar D - Mapa de desvio padrão espaço-temporal de turbidez

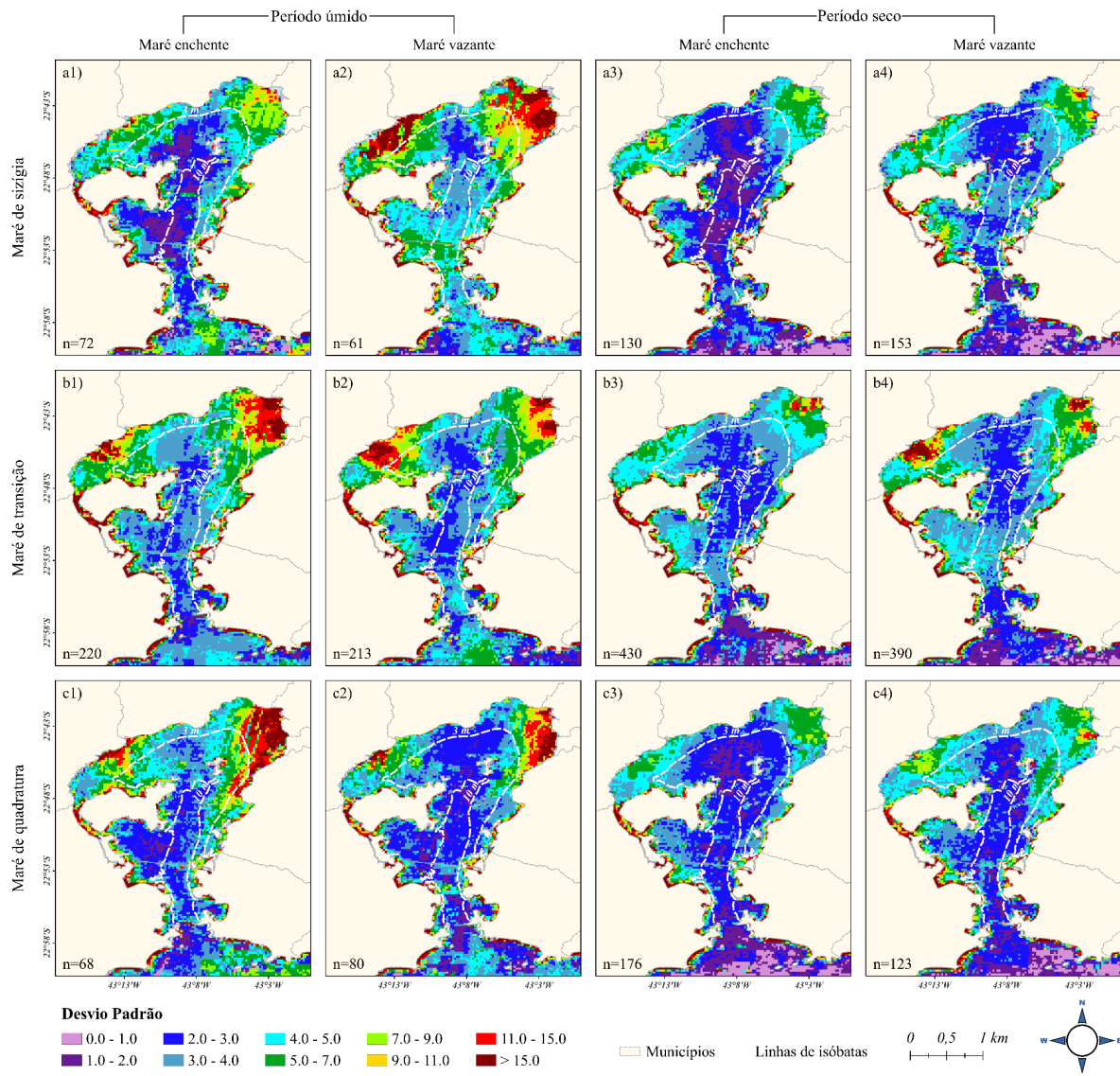


Fig. 1D | Desvio padrão de turbidez nos períodos úmidos (colunas 1 e 2) e secos (colunas 3 e 4) para os regimes de marés enchente (números ímpares) e vazante (números pares) nos tipos de marés de sizígia (linha a), transição (linha b) e quadratura (linha c) entre 21 de Dezembro de 2000 a 20 de Dezembro de 2023. O valor de n equivale ao número de imagens para qual foi calculada a mediana. A linha de isóbatas compreende valores batimétricos de 3 m e 10 m.