

## MONITORAMENTO DE CLOROFILA-A E TURBIDEZ ATRAVÉS DE SATÉLITE NO CEARÁ: UMA ANÁLISE DA BARRAGEM DO BATALHÃO EM CRATEÚS

José Sávio Bezerra<sup>1</sup>, Janine Brandão de Farias Mesquita<sup>2</sup>

### RESUMO

Este estudo aborda o monitoramento da qualidade da água por sensoriamento remoto, visando superar desafios do acompanhamento *in situ*. O objetivo foi desenvolver e validar uma metodologia satelital para estimar clorofila-a e turbidez na Barragem do Batalhão em Crateús, Ceará. A análise, usando imagens Landsat 8 (OLI) e dados COGERH processados no QGIS (com as bandas B3, B4, B5, B6, B7 e correção atmosférica), será expandida para reservatórios maiores (Orós, Jaburu I, Castanhão) para entender suas respostas limnológicas. Resultados preliminares indicaram o algoritmo B4/B6 (RMSE 1,71; R<sup>2</sup> 0,9534) como ideal para clorofila-a e Log (B3/B7) (RMSE 3,25; R<sup>2</sup> 0,988) para turbidez. A clorofila-a (2014-2023) variou de 3,2482 a 346,0530 µg/L; valores acima de 100 µg/L foram possivelmente influenciados por pixels de reflectância atípica na equação. A turbidez (2014-2024) também mostrou extrema variabilidade, com todos os valores acima de 150 NTU, atribuídos a reflectâncias mínimas negativas e anomalias de imagem. Falhas na cobertura de dados satelitais foram observadas. Essas descobertas são cruciais para o monitoramento eficiente de recursos hídricos no Ceará, contribuindo para os ODS 6 (Água Potável e Saneamento) e ODS 15 (Vida Terrestre).

**PALAVRAS-CHAVE:** Clorofila-a. Geotecnologias. Turbidez.

### ABSTRACT

This study addresses water quality monitoring through remote sensing, aiming to overcome challenges of *in situ* monitoring. The objective was to develop and validate a satellite methodology to estimate chlorophyll-a and turbidity at the Batalhão Dam in Crateús, Ceará. The analysis, using Landsat 8 (OLI) images and COGERH data processed in QGIS (with bands B3, B4, B5, B6, B7 and atmospheric correction), will be expanded to larger reservoirs (Orós, Jaburu I, Castanhão) to understand their limnological responses. Preliminary results indicated the B4/B6 algorithm (RMSE 1.71; R<sup>2</sup> 0.9534) as ideal for chlorophyll-a and Log (B3/B7) (RMSE 3.25; R<sup>2</sup> 0.988) for turbidity. Chlorophyll-a (2014-2023) varied from 3.2482 to 346.0530 µg/L; values above 100 µg/L were possibly influenced by atypical reflectance pixels in the equation. Turbidity (2014-2024) also showed extreme variability, with all values above 150 NTU, attributed to negative minimum reflectances and image anomalies. Failures in satellite data coverage were observed. These findings are crucial for the efficient monitoring of water resources in Ceará, contributing to SDG 6 (Clean Water and Sanitation) and SDG 15 (Life on Land).

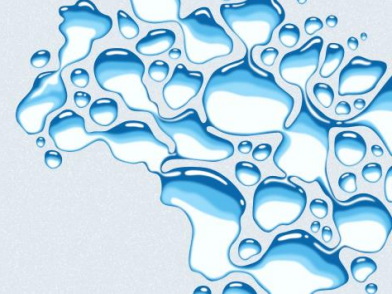
**KEYWORDS:** Chlorophyll-a. Geotechnologies. Turbidity.

### INTRODUÇÃO

A qualidade da água em reservatórios do semiárido brasileiro, especialmente no Ceará, é comprometida pela turbidez elevada e altas concentrações de clorofila-a, indicando eutrofização e impactando o equilíbrio ecológico e a segurança hídrica. Diante da dificuldade do monitoramento *in loco* em larga escala, o sensoriamento remoto emerge como ferramenta estratégica e econômica para estimar esses parâmetros, complementando as coletas de campo e oferecendo uma visão sinótica essencial para a gestão desses ecossistemas (Sagan *et al.*, 2020; Rocha e

<sup>1</sup> Aluno da Universidade Federal do Ceará. Linha de pesquisa: Recursos Hídricos e Geotecnologias. Crateús, CE, Brasil. E-mail: saviobezerra.eng@alu.ufc.br.

<sup>2</sup> Docente no Programa de Pós-Graduação em Gestão e Regulação em Recursos Hídricos (ProfÁgua) na Universidade Federal do Ceará. Crateús, CE, Brasil. E-mail: janine@crateus.ufc.br.

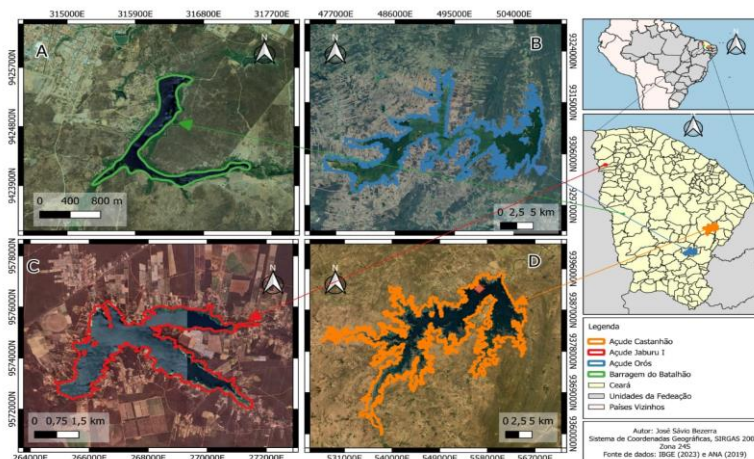


Lima Neto, 2022; Llodrà-Llabrés *et al.*, 2023; Adjovu; Stephen; Ahmad, 2024). O presente estudo tem como objetivo principal desenvolver e validar uma metodologia baseada em sensoriamento remoto para estimar clorofila-a e turbidez em reservatórios do estado do Ceará, visando subsidiar um monitoramento mais eficiente dos recursos hídricos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A validação preliminar do modelo foi realizada na Barragem do Batalhão (A), em Crateús, Ceará (capacidade de 1,8 hm<sup>3</sup>). Posteriormente, a metodologia será aplicada a reservatórios estratégicos de maior porte do estado do Ceará, como os açudes Orós (B), Jaburu I (C) e Castanhão (D) (Figura 1), localizados em domínios climáticos distintos, a fim de compreender a resposta limnológica desses ecossistemas a diferentes cenários ambientais.

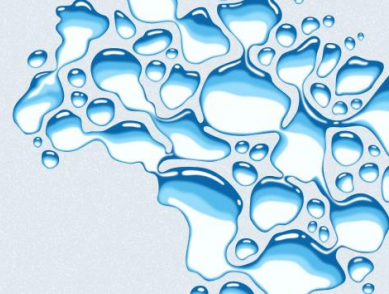
Figura 1 – Mapa de localização dos reservatórios do estudo



Fonte: Autoria própria (2025).

A metodologia consistiu inicialmente na aquisição e organização dos dados. Foram compilados dados de qualidade da água (clorofila-a e turbidez) e de volume na Barragem do Batalhão para o período de 2014 a 2024, provenientes do banco de dados da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e do Portal Hidrológico do Ceará, respectivamente. Em paralelo, foram obtidas imagens do satélite Landsat 8 (OLI) através do portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), selecionando-se cenas com baixa cobertura de nuvens (< 20%) e em datas próximas às coletas de campo da COGERH. As imagens foram submetidas ao pré-processamento no software QGIS 3.28, onde se realizou a correção atmosférica para conversão de níveis de cinza em reflectância no topo da atmosfera (TOA), utilizando o complemento *Semi-Automatic Classification Plugin* (SCP), conforme abordagem similar à de Melo *et al.* (2015) e Bezerra (2024).

A etapa seguinte focou no desenvolvimento dos modelos empíricos. Para cada data com dados *in situ* e imagem de satélite correspondente, foram consideradas as seguintes bandas: B3 (verde), B4 (vermelho), B5 (infravermelho próximo - NIR), B6 (infravermelho médio - SWIR 1) e B7 (infravermelho médio - SWIR 2). A escolha destas bandas se justifica por sua maior sensibilidade às respostas espectrais da clorofila e dos sedimentos, em contraste com as bandas B1 e B2, que são mais suscetíveis à interferência atmosférica. Diante disso, tomando como base o estudo de Prasad *et al.* (2017) e Bezerra (2024), foram testadas 18 variáveis independentes (algoritmos) para a clorofila-a e 15 para a turbidez, as quais incluíam reflectância de bandas individuais, razões entre bandas e combinações algorítmicas.



Por fim, procedeu-se à seleção e validação dos modelos no *Jamovi* (software estatístico). Para cada parâmetro, os algoritmos foram avaliados por meio de regressão, sendo escolhido aquele que apresentou o maior coeficiente de determinação ( $R^2 > 0,8$ ) e a menor Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE). Com o modelo ótimo validado, a equação de correlação gerada — que relaciona os valores preditos (eixo y) com a reflectância do algoritmo (eixo x) — foi utilizada para recuperar a concentração do parâmetro em cada data da série histórica. Este processo culminou na elaboração de mapas de variação espacial para clorofila-a e turbidez, consolidados em formato de mosaico para representar todo o período analisado.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES PRELIMINARES

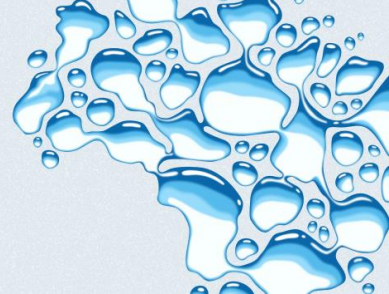
A metodologia revelou o algoritmo B4/B6 como o mais eficaz para estimar clorofila-a (RMSE 1,71;  $R^2$  0,9534) e Log (B3/B7) para turbidez (RMSE 3,25;  $R^2$  0,988). As equações geradas foram usadas para recuperar esses parâmetros via sensoriamento remoto em toda a série histórica, possibilitando a quantificação e a elaboração de mapas de variação espacial.

Os dados de clorofila-a (2014-2023) mostraram dinâmica complexa, variando de 3,2482 a 346,0530  $\mu\text{g/L}$ . Embora predominassem valores baixos na maior parte do tempo, a distribuição heterogênea sugere variação nas comunidades fitoplanctônicas. Valores acima de 100  $\mu\text{g/L}$ , como o registrado em agosto de 2014 (346,0530  $\mu\text{g/L}$ ), podem estar associados a pixels com reflectância atípica (tanto muito baixa quanto muito alta), com base no algoritmo selecionado, que influenciaram a equação de regressão em escala de potência, demandando uma análise mais aprofundada de sua contribuição. As áreas em branco no mosaico do mapa de variação espacial do referido parâmetro indicam falhas na cobertura de dados.

A turbidez (2014-2024) também apresentou extrema variabilidade, com todos os valores recuperados acima de 150 NTU, o que é considerado extremamente elevado, como o de abril de 2021 (1782,1108 NTU), que atingiu o maior valor. Esses resultados podem ser diretamente influenciados pelas reflectâncias mínimas negativas registradas pelo algoritmo selecionado em todas as datas analisadas, bem como por possíveis interferências como erros de sensor, presença de nuvens, sombras ou outras anomalias na imagem de satélite, que podem explicar essas observações. Assim como na clorofila-a, as áreas em branco e preto nas imagens são atribuídas a falhas na coleta de dados satelitais.

## RESULTADOS ESPERADOS

Para outros grandes reservatórios como Orós, Castanhão e Jaburu I, espera-se que os resultados apresentem distinções significativas em relação à Barragem do Batalhão. A expectativa é que a menor incidência de anomalias de reflectância e de outras interferências nas imagens satelitais nesses corpos d'água resulte em valores de clorofila-a e turbidez mais concisos e representativos das condições limnológicas locais. Essa diferenciação é justificada pela inserção desses reservatórios em domínios climáticos e geomorfológicos ligeiramente distintos no Ceará, o que pode influenciar a qualidade dos dados de sensoriamento remoto. Consequentemente, os algoritmos considerados os melhores para a Barragem do Batalhão podem não ser os mais adequados para esses outros ambientes. A complexidade dos ecossistemas aquáticos dificulta a padronização de um único algoritmo para estimar com precisão parâmetros biofísicos em diferentes corpos d'água, exigindo, muitas vezes, calibrações e validações específicas para cada ambiente a fim de garantir a acurácia das estimativas por sensoriamento remoto.



## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) através do Convênio CAPES/UNESP N°. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - Prof<sup>Á</sup>Gua pelo apoio técnico científico aportado até o momento, e estendo meu agradecimento à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) e à Fundação Cearense de Meteorologia (FUNCEME), por meio do Projeto MMCQual - Melhoria da Gestão Hídrica em Ambientes Semiáridos: Monitoramento, Modelagem e Cenarização da Qualidade da Água (Chamada Universal CNPq - Processo No: 409204/2023-4), pelo suporte e disponibilização de dados essenciais para esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ADJOVU, Godson Ebenezer; STEPHEN, Haroon; AHMAD, Sajjad. Application of Machine Learning Algorithms for the Estimation of the Concentration of Total Suspended Solids in the Colorado River Using Landsat 8 Operational Land Imager Data. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2024**. p. 1424-1442.

BEZERRA, José Sávio. Avaliação da qualidade da água no açude Quixeramobim, semiárido cearense, utilizando sensoriamento remoto. Monografia, 2024.

LLODRÀ-LLABRÉS, Joana *et al.* Recuperando a concentração de clorofila-a na água em águas interiores a partir de imagens do Sentinel-2: Revisão da operabilidade, desempenho e caminhos a seguir. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 125, p. 103605, 2023.

MELO, Amanda *et al.* Estimção da concentração de clorofila nos lagos Bolonha e Água Preta através do uso de sensoriamento remoto. **XXI Simpósio de Recursos Hídricos**, Brasília, p.8, 2015.

PRASAD, Satish; SALUJA, Ridhi; GARG, J. K. Modeling chlorophyll-a and turbidity concentrations in river Ganga (India) using Landsat-8 OLI imagery. In: **Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications VIII**. SPIE, p. 356-373, 2017.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro; NETO, Iran Eduardo Lima. Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs. **Journal of Environmental Management**, v. 312, p. 114983, 2022.

SAGAN, Vasit *et al.* Monitoring inland water quality using remote sensing: Potential and limitations of spectral indices, bio-optical simulations, machine learning, and cloud computing. **Earth-Science Reviews**, v. 205, p. 103187, 2020.

WIEGAND, Mário César *et al.* Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. **Journal of arid environments**, v. 184, p. 104321, 2021.