QUALIDADE DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO JABURU I, CEARÁ: DINÂMICA ESPAÇO-TEMPORAL DE CLOROFILA-A UTILIZANDO IMAGENS DE SATÉLITE

José Sávio Bezerra [1]; Janine Brandão de Farias Mesquita [2].

RESUMO – Este trabalho investiga a aplicabilidade do sensoriamento remoto multiespectral no monitoramento da clorofila-*a* no reservatório Jaburu I, Ceará. O objetivo principal foi validar modelos bio-ópticos integrados à variabilidade hidrológica, utilizando uma série temporal de imagens do sensor OLI/Landsat-8 abrangendo o período de 2015 a 2025. A análise evidenciou uma correlação inversa entre o volume acumulado e a biomassa fitoplanctônica (R^2 = 0,8119), revelando que o aporte hídrico promove a diluição de constituintes orgânicos, enquanto a depleção do manancial intensifica a produtividade primária. Dentre os algoritmos avaliados, a razão logarítmica das bandas do infravermelho (Log B5/B6) demonstrou maior precisão preditiva (R^2 = 0,8665), com erro residual reduzido (RMSE = 0,479 µg/L). Embora a espacialização tenha identificado heterogeneidades tróficas condicionadas pelo regime pluviométrico, os índices mantiveram-se em conformidade com os padrões da Classe II da Resolução CONAMA nº 357/2005. Os resultados ratificam a eficácia do monitoramento orbital como uma solução de baixo custo e alta resolutividade para a gestão sistemática de recursos hídricos em regiões semiáridas, fornecendo subsídios para a manutenção da sustentabilidade de mananciais estratégicos.

ABSTRACT– This study examines the applicability of multispectral remote sensing for monitoring chlorophyll-a in the Jaburu I reservoir, Ceará. The primary objective was to validate bio-optical models integrated with hydrological variability, utilizing a time series of OLI/Landsat-8 imagery spanning the period from 2015 to 2025. The analysis revealed an inverse correlation between stored volume and phytoplankton biomass (R^2 = 0.8119), indicating that water inflow promotes the dilution of organic constituents, whereas reservoir depletion intensifies primary productivity. Among the evaluated algorithms, the logarithmic infrared band ratio (Log B5/B6) demonstrated the highest predictive accuracy (R^2 = 0.8665), with a low residual error (RMSE = 0.479 µg/L). Although spatial analysis identified trophic heterogeneities driven by rainfall patterns, the indices remained compliant with Class II standards of CONAMA Resolution No. 357/2005. These results confirm the effectiveness of satellite-based monitoring as a cost-effective, high-resolution solution for the systematic management of water resources in semi-arid regions, providing essential data to support the sustainability of strategic reservoirs.

Palavras-Chave – Qualidade da Água; Clorofila-*a*; Sensoriamento Remoto.

[1]) Mestrando em Gestão e Regulação em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Crateús, engsaviobezerra@gmail.com
[2]) Professora Adjunta, Universidade Federal do Ceará (UFC), Campus Crateús, janine@crateus.ufc.br

1. INTRODUÇÃO

A segurança hídrica em regiões semiáridas é constantemente ameaçada pela vulnerabilidade de reservatórios superficiais ao processo de eutrofização (Raulino *et al*., 2021; Lima Neto, 2025). No semiárido brasileiro, essa degradação é intensificada por elevados tempos de residência da água e balanços hídricos negativos que, sob altas temperaturas, aceleram o acúmulo de nutrientes (Franca, 2021). Embora o monitoramento convencional *in situ* seja essencial, seu elevado custo operacional e baixa capilaridade geográfica dificultam a detecção de heterogeneidades limnológicas e de mudanças rápidas induzidas por eventos climáticos (Pu *et al*., 2019; Coelho *et al*., 2017).

Nesse cenário, o sensoriamento remoto multiespectral surge como uma alternativa promissora para a vigilância sistemática através de dados sinópticos. O sensor OLI/Landsat-8, com resolução radiométrica de 12 bits, oferece a sensibilidade necessária para capturar respostas ópticas da clorofila-*a* (Wulder *et al*., 2021). Todavia, a eficácia de modelos bio-ópticos em reservatórios tropicais depende da integração com variáveis hidrológicas, visto que a variação da fração do volume disponível atua como um regulador primário da estrutura fitoplanctônica e do estado trófico desses ecossistemas (Franca, 2021; Arantes *et al*., 2025).

O reservatório Jaburu I exemplifica essa complexidade, destacando-se por sua localização estratégica na vertente úmida da Serra da Ibiapaba, a 770 m de altitude. Diferente dos mananciais situados no embasamento cristalino, este açude assenta-se sobre os arenitos da Formação Serra Grande (Franca, 2021). Apesar de sua resiliência, o Jaburu I é susceptível a florações recorrentes de cianobactérias, especialmente do gênero *Microcystis sp*, apresentando estados tróficos que oscilam entre oligotrófico e hipereutrófico em resposta direta à depleção volumétrica (Franca, 2021). Essa configuração geológica e limnológica oferece um cenário singular para a validação de algoritmos geoespaciais.

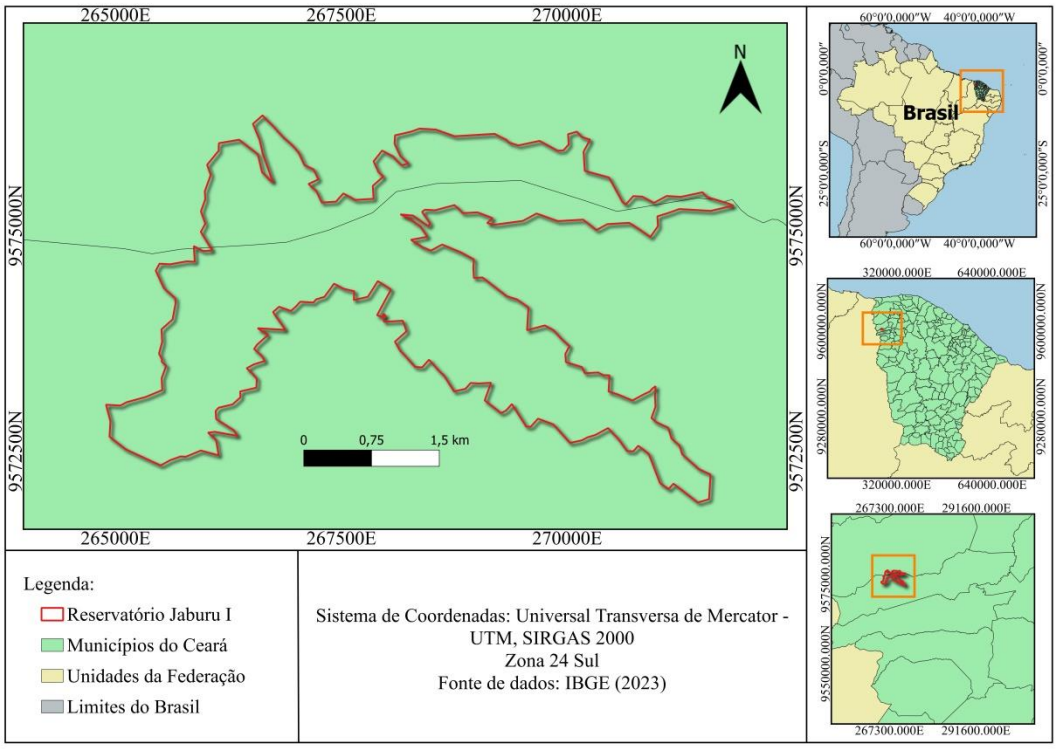
Diante do exposto, este estudo desenvolve e valida uma metodologia de monitoramento integrada à gestão de recursos hídricos no Ceará. O objetivo central consiste em calibrar modelos bio-ópticos acoplados a variáveis hidrológicas para estimar parâmetros de qualidade da água, dentre eles, clorofila-*a*, com dados orbitais. A pesquisa visa consolidar o sensoriamento remoto como ferramenta suplementar estratégica para assegurar a sustentabilidade dos usos múltiplos da água em regiões vulneráveis ao estresse hídrico.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O reservatório Jaburu I (3°50'40.43"S 41°05'39.31"W), localizado na Serra da Ibiapaba, noroeste do estado do Ceará, é o principal manancial estratégico da bacia do Parnaíba, abastecendo sete municípios e suprindo demandas transfronteiriças no estado do Piauí. O reservatório possui capacidade de 141 hm³, bacia de drenagem de 314,72 km² e vazão regularizada de 3,73 m³/s (CEARÁ, 2025). Geologicamente inserido na Bacia Sedimentar do Parnaíba, a área apresenta clima Tropical Quente Úmido e Subúmido, com pluviosidade média de 1.484 mm/ano e temperaturas entre 24°C e 26°C (IPECE, 2017).

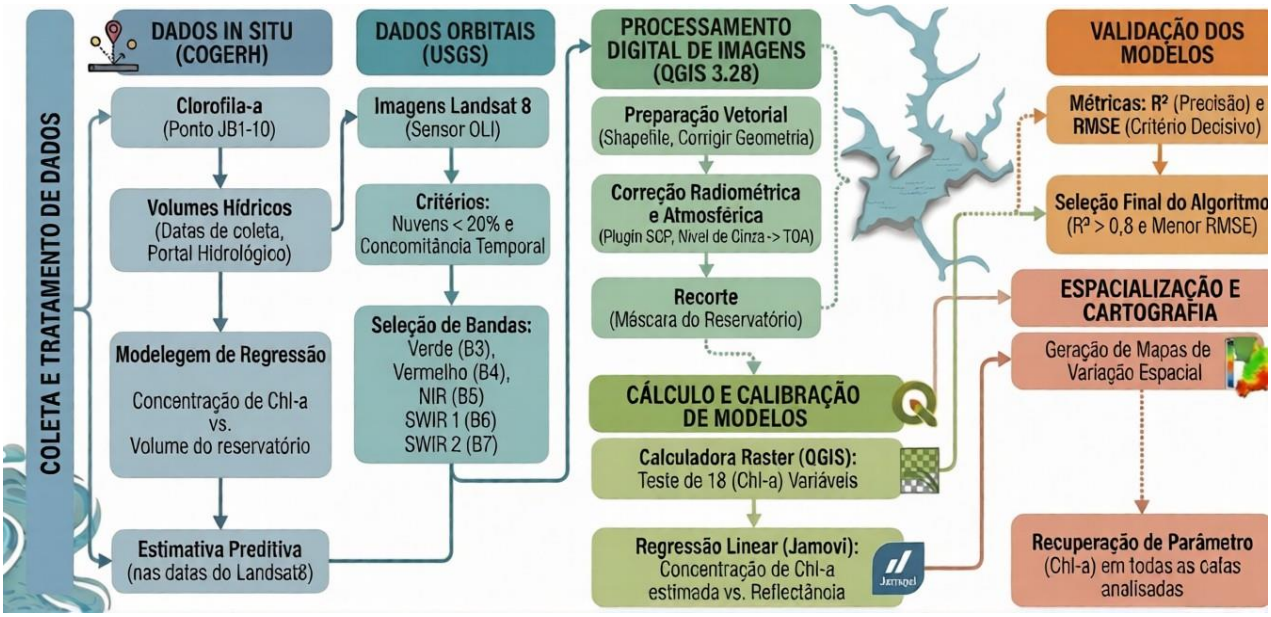
Figura 1 – Delimitação do reservatório Jaburu I



2.2 Etapas do estudo

A estrutura metodológica deste estudo foi delineada para integrar dados limnológicos convencionais, variáveis hidrológicas e respostas espectrais orbitais, visando à estimativa da concentração de clorofila-*a* no reservatório Jaburu I. O fluxo procedimental, que abrange desde a aquisição e o processamento digital das imagens até a validação estatística dos modelos bio-ópticos, encontra-se sistematizado no fluxograma apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxograma das etapas do estudo



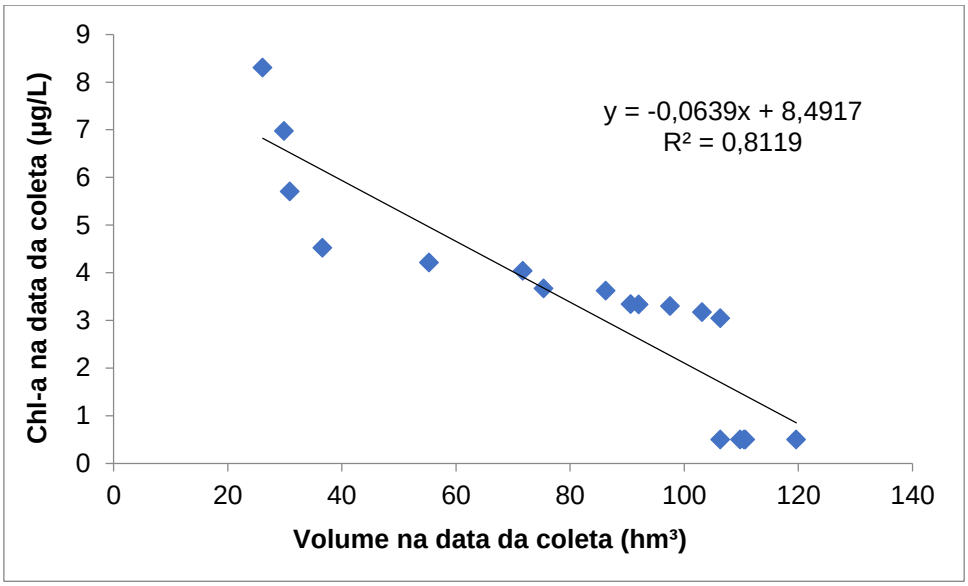
Para fundamentar o rigor analítico da pesquisa, o inventário de dados foi consolidado mediante a sincronização temporal entre as campanhas de monitoramento *in situ* e as passagens do sensor OLI/Landsat-8. O estudo compreendeu o período entre 2015 e 2025, utilizando cenas com cobertura de nuvens variando entre 0 e 18,8%.

Com o intuito de estimar a concentração de clorofila-*a*, foram testadas 18 variáveis espectrais (B3, B4, Log B3, Log B4, B3/B4, B3/B5, B4/B5, B3/B6, B4/B6, B4/B7, B5/B6, Log (B5/B6), Log (B5/B7), Log B6/Log B3, Log B6/Log B4, Log B6/Log B5, Log B7/Log B3 e Log B7/Log B4), fundamentadas nas proposições de Prasad, Saluja e Garg (2017) e Bezerra (2024). Previamente ao processamento, realizou-se a correção atmosférica das bandas em lote utilizando o plugin *Semi-Automatic Classification* (SCP), seguindo os protocolos metodológicos adotados por Melo *et al*. (2015) e Bezerra (2024).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

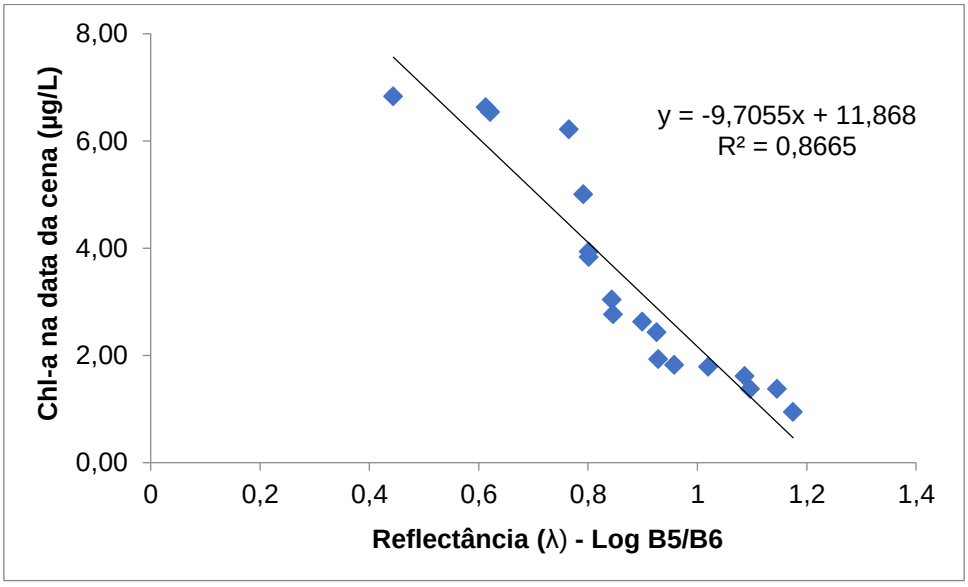
Os dados indicam que a produtividade primária no reservatório Jaburu I é governada pela flutuação do estoque hídrico, evidenciando uma proporcionalidade negativa ($R^2 = 0,8119$) entre a disponibilidade de água e a densidade algal, conforme ilustrado na Figura 3. Observou-se que a redução volumétrica intensifica a presença de constituintes orgânicos, enquanto a recarga do manancial promove a atenuação dessas concentrações por meio da diluição física da massa d'água.

Figura 3 – Regressão linear entre a concentração de clorofila-*a in situ* e o volume armazenado no reservatório Jaburu I nas datas de coleta (2015-2025)



Dentre as variáveis testadas, o modelo bio-óptico (Log B5/B6) apresentou a maior sensibilidade espectral ($R^2 = 0,8665$), conforme ilustrado na Figura 4. Este resultado demonstra que a razão logarítmica entre o infravermelho próximo (NIR) e o infravermelho de ondas curtas (SWIR-1) é eficaz, indicando que a banda B6 atenua satisfatoriamente os ruídos da coluna d'água e os efeitos de fundo.

Figura 4 – Calibração do modelo para estimativa de clorofila-*a* via variável Log B5/B6 no reservatório Jaburu I (2015-2025)



A validação empírica, processada no software *Jamovi*, confirmou a alta correlação entre a equação calibrada e os dados fornecidos pela COGERH. O algoritmo Log (B5/B6) demonstrou excelente desempenho, alcançando um R^2 de 0,952 na validação cruzada e baixos índices de incerteza, com RMSE de 0,479 µg/L e erro relativo de 14,4%.

A aplicação do modelo validado à série histórica permitiu a espacialização da clorofila-*a* em quatro classes (0–24 µg/L). Essa categorização baseou-se na concentração máxima estimada de 22,99 µg/L (registrada em 05/09/2017). Durante a categorização, foi realizada a contagem dos pixels em cada intervalo, evidenciando frequências que revelaram, nas Figuras 5 e 6, uma heterogeneidade trófica que transcende a capacidade do monitoramento pontual convencional (COELHO *et al*., 2017), condicionado pela morfometria e pela dinâmica volumétrica do corpo hídrico.

Figura 5 – Distribuição espacial da concentração de clorofila-*a* no reservatório Jaburu I (Parte I)

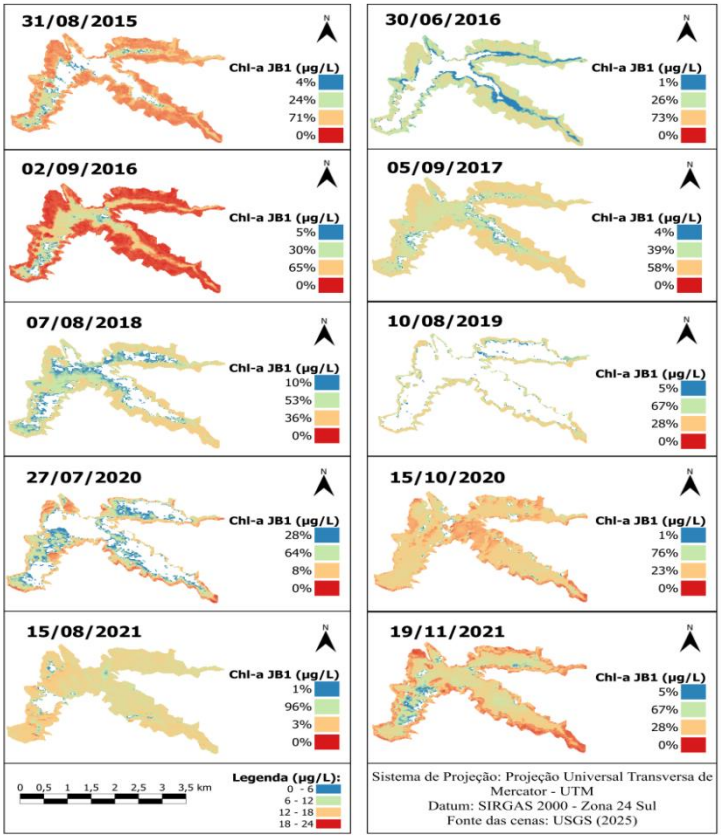
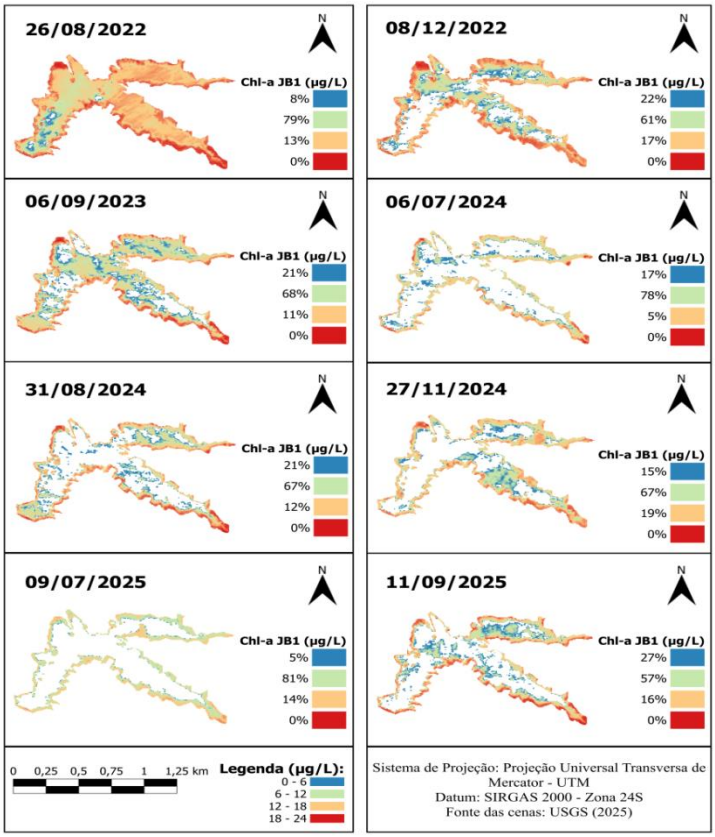


Figura 6 – Distribuição espacial da concentração de clorofila-*a* no reservatório Jaburu I (Parte II)



Durante o ciclo de seca severa, observou-se a maior prevalência das classes de concentração elevada. Em 31/08/2015 e 02/09/2016, o intervalo de 12–18 µg/L dominou a paisagem hídrica, ocupando, respectivamente, 71% e 65% da área do espelho d'água. Nesses períodos, a redução da coluna d'água potencializa a biodisponibilidade de nutrientes e a estabilidade física da massa líquida, catalisando a produtividade primária (Medeiros *et al*., 2015; Rocha Junior *et al*., 2018).

A análise orbital de 05/09/2017 revelou que 39% dos pixels situavam-se na classe de 6–12 µg/L, enquanto 58% permaneciam no intervalo de 12–18 µg/L. Esse achado sugere que, mesmo em cenários de volume crítico, a resiliência térmica e orográfica da Serra da Ibiapaba atua como um moderador metabólico, impedindo que o reservatório atinja níveis extremos de degradação (Ferreira; Mello, 2005; IPECE, 2017).

A partir de 2018, a recomposição do estoque hídrico induziu uma mudança estrutural na distribuição espacial deste parâmetro. Em 27/07/2020, registrou-se uma expansão significativa das águas de maior transparência, com a classe de 0–6 µg/L ocupando 28% da área, enquanto a classe de 6–12 µg/L apresentava hegemonia com 64%. Esse padrão atingiu seu ápice em 15/08/2021, quando 96% dos pixels concentraram-se no intervalo de 6–12 µg/L.

Este fenômeno ratifica a tese de que o aporte volumétrico expressivo promove a diluição dos constituintes orgânicos e a dispersão de nutrientes, melhorando a qualidade da água (Guimarães, 2023). A transição cromática observada nas Figuras 5 e 6 evidencia a recuperação do estado mesotrófico do manancial após o ciclo de seca prolongada.

No recorte mais recente, os mapas indicam uma estabilização da biomassa fitoplanctônica, com o intervalo de 6–12 µg/L mantendo-se como a classe modal, frequentemente superando 75% de ocupação. Contudo, a análise de 11/09/2025 demonstra o retorno de uma vulnerabilidade sazonal característica do semiárido: com o avanço do período de estiagem, a classe de 0–6 µg/L retraiu para 27%, enquanto a classe de 12–18 µg/L ressurgiu em 16% da área, sinalizando um início de adensamento algal.

Um dado de alta relevância científica é a ausência sistemática de pixels no intervalo de 18–24 µg/L nas cenas analisadas. Este resultado confirma que o reservatório Jaburu I mantém-se rigorosamente em conformidade com os padrões da Classe II da Resolução CONAMA nº 357/2005 (limite de 30 µg/L), consolidando-se como uma exceção de qualidade hídrica no estado do Ceará (Franca, 2021).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados confirmam que a produtividade primária no reservatório Jaburu I é regulada pelo regime hidrológico, apresentando um gradiente de concentração de clorofila-*a* inversamente proporcional ao volume. Enquanto o estresse hídrico severo potencializa a densidade algal, o aporte volumétrico atua como mecanismo de restauração da qualidade da água através de diluição física.

O modelo bio-óptico fundamentado na razão logarítmica das bandas do infravermelho próximo e de ondas curtas (Log B5/B6) apresentou o melhor desempenho estatístico, alcançando um coeficiente de determinação satisfatório ($R^2 > 0,8$) e um reduzido erro residual após a etapa de validação. Tais resultados validam a metodologia como uma ferramenta de baixo custo e alta capilaridade para o monitoramento sistemático do referido parâmetro, permitindo a gestão proativa da qualidade da água e a detecção de heterogeneidades limnológicas em reservatórios do semiárido.

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 No. 951420/2023. Agradeço ao Programa de Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfÁgua pelo apoio técnico científico aportado até o momento. O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e

Tecnológico (CNPq) – Brasil, Edital Chamada CNPq/MCTI/FNDCT Nº 44/2024 – Chamada Universal, processo nº404286/2025-9. Estendem-se os agradecimentos à Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) pela disponibilização dos dados de qualidade da água, e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), no âmbito do Projeto MMCQual (Chamada Universal CNPq - Processo nº 409204/2023-4).

REFERÊNCIAS

ARANTES, Arielle Elias et al. Satellite-based water quality assessment of Castanhão reservoir using machine learning and genetic algorithms. Next Research, v. 2, n. 2, p. 100340, 2025. https://doi.org/10.1016/j.nexres.2025.100340.

BEZERRA, José Sávio. Avaliação da qualidade da água no açude Quixeramobim, semiárido cearense, utilizando sensoriamento remoto. 2024. Monografia (Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal do Ceará.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH. Portal Hidrológico do Ceará: Ficha Técnica do Reservatório Jaburu I. Fortaleza: COGERH, 2025. Disponível em: https://www.cogerh.com.br/FichaTecnicadosAcudes/fichaTecnicaAcude.php?acude=Jaburu%20I. Acesso em: 28 abr. 2026.

COELHO, Christine et al. In situ and satellite observation of CDOM and chlorophyll-a dynamics in small water surface reservoirs in the brazilian semiarid region. Water, v. 9, n. 12, p. 913, 2017. https://doi.org/10.3390/w9120913.

FERREIRA, Antonio Geraldo; MELLO, Namir Giovanni da Silva. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos Oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. 2005. VI Simpósio Brasileiro de Climatologia, Aracaju, SE.

FRANCA, Raimunda Moreira da. Estrutura fitoplanctônica em reservatórios cearenses - associação hidroclimática e estado trófico. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará.

GUIMARÃES, Bruna Monallize Duarte Moura. Análise e predição da concentração de clorofila-a em reservatórios do semiárido. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. Perfil municipal: Ubajara. 2017. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Ubajara_2017.pdf. Acesso em: 18 nov. 2025.

MEDEIROS, Luciana de Castro et al. Is the future blue-green or brown? The effects of extreme events on phytoplankton dynamics in a semi-arid man-made lake. Aquatic Ecology, v. 49, n. 3, p. 293-307, 2015. https://doi.org/10.1007/s10452-015-9524-5.

MELO, Amanda et al. Estimação 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.

NETO, Iran Eduardo Lima. Modelling phosphorus inputs and dynamics in a large tropical semiarid basin. Environmental Science and Pollution Research, v. 32, n. 11, p. 7070-7084, 2025. https://doi.org/10.1007/s11356-025-36181-1.

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, 2017. p. 356-373. https://doi.org/10.1117/12.2278289.

PU, Fangling et al. Water-quality classification of inland lakes using Landsat8 images by convolutional neural networks. Remote Sensing, v. 11, n. 14, p. 1674, 2019. https://doi.org/10.3390/rs11141674.

RAULINO, João BS; SILVEIRA, Cleiton S.; LIMA NETO, Iran Eduardo. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality of large semi-arid reservoirs in Brazil. Hydrological Sciences Journal, v. 66, n. 8, p. 1321-1336, 2021. https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1933491.

ROCHA JÚNIOR, Carlos Alberto Nascimento da. Efeitos da variação de volume e disponibilidade de luz a sobre a dinâmica temporal da biomassa fitoplanctônica em um reservatório tropical semiárido. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

WULDER, Michael A. et al. Augmenting Landsat time series with Harmonized Landsat Sentinel-2 data products: Assessment of spectral correspondence. Science of Remote Sensing, v. 4, p. 100031, 2021. https://doi.org/10.1016/j.srs.2021.100031.