MONITORAMENTO QUALITATIVO DE UM RESERVATÓRIO ESTRATÉGICO NO SEMIÁRIDO CEARENSE UTILIZANDO SENSORIAMENTO REMOTO

Samiramisthaís S. Linhares [1]; Clécia C. B. Guimarães[1]; Gilberto Mobüs[1]; Anthony Porfírio[1]

RESUMO – A gestão de recursos hídricos no semiárido enfrenta desafios relacionados à escassez e à degradação da qualidade da água, intensificados pela irregularidade climática e eutrofização. O sensoriamento remoto (SR) surge como ferramenta estratégica para o monitoramento espaço-temporal de reservatórios. O Governo do Ceará junto com o instituto de pesquisa francês desenvolveu uma metodologia para o monitoramento operacional da qualidade de água dos reservatórios do Estado utilizando SR. Este trabalho visa divulgar os principais resultados alcançados na fase de validação desta metodologia. As campanhas ocorreram, no Açude Banabuiú, em agosto/2025, fevereiro e maio/2026, com aquisição de dados radiométricos com espectrorradiômetros TriOS Ramses e parâmetros limnológicos com sonda multiparamétrica. Os resultados revelaram uma transição limnológica marcante condicionada pelo pulso hidrológico. Em agosto, observou-se a compartimentação inicial da biomassa fitoplanctônica ativa; em fevereiro, o aporte alóctone promoveu intensa mistura vertical, elevada turbidez e predominância de cianobactérias; em maio, ocorreu estabilização pós-pluvial, com decantação de partículas e aumento da clorofila-a. O comportamento espectral acompanhou as mudanças biogeoquímicas da água, demonstrando a eficiência do monitoramento integrado óptico-limnológico para compreender a resposta hidrodinâmica de reservatórios, ressaltando a importância da ampliação amostral para o aperfeiçoamento de modelos preditivos face à elevada variabilidade interanual do semiárido.

ABSTRACT– Water resources management in semi-arid regions faces challenges related to water scarcity and water quality degradation, intensified by climate variability and eutrophication processes. In this context, remote sensing (RS) has emerged as a strategic tool for the spatiotemporal monitoring of reservoirs. The Government of Ceará, in partnership with a French research institute, developed an operational methodology based on RS for monitoring the water quality of state reservoirs. This study aims to present the main results achieved during the validation phase of this methodology. Field campaigns were conducted at the Banabuiú Reservoir in August 2025, February 2026, and May 2026, collecting radiometric data using TriOS Ramses spectroradiometers and limnological parameters with a multiparameter probe. The results revealed a marked limnological transition driven by the hydrological pulse. In August, an initial compartmentalization of active phytoplankton biomass was observed; in February, allochthonous inputs promoted intense vertical mixing, high turbidity, and cyanobacterial dominance; and in May, a post-rainfall stabilization phase occurred, characterized by particle settling and increased chlorophyll-a concentrations. Spectral behavior closely followed the biogeochemical dynamics of the water, demonstrating the effectiveness of integrated optical-limnological monitoring in understanding reservoir hydrodynamic responses. The findings also highlight the importance of expanding continuous sampling efforts to improve predictive models in the face of the high interannual variability characteristic of semi-arid environments.

Palavras-Chave – Monitoramento da qualidade da água; Semiárido; Sensoriamento Remoto

[1]) Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av. Rui Barbosa, 1246, Fortaleza - CE, samira.linhares@funceme.br

INTRODUÇÃO

No Ceará, a escassez hídrica é um desafio recorrente devido à irregularidade das chuvas, evidenciada pela predominância de rios intermitentes e ausência de aquíferos significativos na maior parte do território [COSTA *et al.* (2025)]. Visando minimizar os impactos das secas, desde o final do século XIX, iniciou o sistema açude que garante o abastecimento de água para populações urbanas e rurais (SRH, 2018). Contudo, durante longos períodos de estiagem, a redução do volume armazenado favorece o aumento da concentração de nutrientes e a eutrofização dos reservatórios, comprometendo a qualidade da água disponível para a população local, sendo esse um tema de constante debate técnico-científico e de gestão [GUIMARÃES *et al.* (2025)].

Ciente dessa problemática, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) iniciou em 2023, o projeto "Implementação, em Caráter Operacional, do Monitoramento Qualitativo dos Reservatórios Monitorados a partir do Uso do Sensoriamento Remoto" (RWQRS) para o monitoramento da qualidade da água do Estado utilizando tecnologias inovadoras com base no sensoriamento remoto. Seis reservatórios estratégicos, monitorados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH) foram selecionados com base na variabilidade de parâmetros de qualidade da água. O projeto, desenvolvido pela FUNCEME, COGERH e com consultoria do Instituto de Pesquisa Francês (IRD), utilizou dados in situ, sensoriamento remoto e imagens Sentinel-2 para modelagem da qualidade da água. Após sua conclusão, em 2025, foi identificada a necessidade de manter pontos de monitoramento em alguns reservatórios em virtude da robustez dos modelos utilizados que dependem da validação contínua frente às variações sazonais e interanuais das condições limnológicas dos reservatórios, sendo selecionado o Açude Banabuiú como área de estudo.

O açude Banabuiú (Arrojado Lisboa), localizado na sub-bacia homônima, é um dos principais reservatórios estratégicos do semiárido cearense, cuja capacidade de armazenamento é de 1,6 bilhão de m³ [COGERH (2011)]. O reservatório está situado em uma região de clima tropical quente semiárido, caracterizada por precipitação média anual em torno de 700 mm e elevada variabilidade hidrológica. As condições climáticas, associadas à elevada evaporação, ao déficit hídrico e às pressões antrópicas decorrentes do desmatamento e da ocupação da bacia, influenciam diretamente a dinâmica hidrológica e a qualidade da água do reservatório.

Este trabalho visa avaliar e divulgar os principais resultados alcançados na fase de validação da metodologia de modelagem e do sistema de monitoramento da qualidade da água utilizando sensoriamento remoto dos reservatórios do Ceará até o momento.

METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho baseia-se na coleta de dados *in situ* (dados radiométricos e dados físico-químicos e biológicos) além do processamento e análise dos dados. Em campo, as medições radiométricas foram realizadas utilizando espectroradiômetros TriOS Ramses instalados lateralmente na embarcação, conectados ao software MSDA_XE para aquisição e armazenamento de dados. Utilizou-se os sensores de irradiância espectral (Ed), radiância descendente (Ld) e radiância ascendente (Lu) (Figuras 1 e 2), que foram posicionados verticalmente a 90°, em direção ao céu com inclinação de 40° em relação à vertical e direcionado para a superfície da água, também com inclinação de 40° em relação à vertical, respectivamente. Durante as coletas, a embarcação foi mantida em orientação de aproximadamente 135° em relação à posição solar, visando minimizar interferências causadas pelo reflexo especular da luz na superfície da água. As aquisições radiométricas foram realizadas sob condições preferenciais de céu sem cobertura de nuvens e baixa agitação da superfície da água [FUNCEME (2023)]. O tempo amostral em cada ponto foi de 10 minutos, com intervalos de aquisição de 10 segundos entre as medições consecutivas. As coletas iniciaram às 08:30 e finalizaram antes das 14hs.

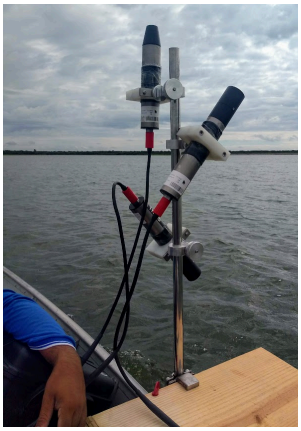


Figura 1. Espectrorradiômetros TriOS Ramses posicionados no campo, prontos para coleta de dados

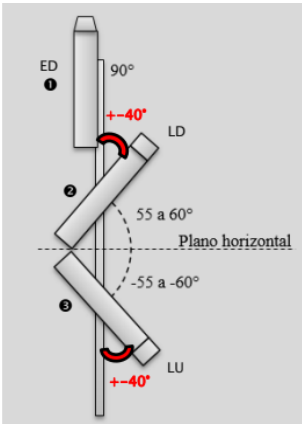


Figura 2. Ângulos e posicionamento dos sensores Irradiância (ED); Radiância Descendo (LD); Radiância Subindo (LU).

Os parâmetros de qualidade da água foram realizadas utilizando uma sonda multiparamétrica Aqua TROLL 500, capaz de coletar simultaneamente, diferentes variáveis limnológicas, dentre elas: clorofila-a, turbidez, ficocianina, condutividade elétrica, temperatura da água e profundidade das medições. O tempo mínimo de aquisição em cada ponto foi de 2 minutos, com intervalos de aquisição de 2 segundos entre as medições consecutivas, na profundidade de 30 centímetros da superfície (S) e na profundidade da transparência da água obtida por meio da visualização do disco de Secchi (S').

Durante o processamento dos dados, os valores das medidas espectrais foram determinados por média das leituras realizadas ao longo do tempo, após filtração de dados ruidosos, acrescido dos valores de desvio padrão. Esses dados foram processados no software MSDA e o conjunto amostral foi selecionado utilizando o pacote RadiometryTrios instalado no software Python. Os dados de sonda foram coletados no software Vusitu e exportados em .csv para processamento das médias das profundidades: superfície (S) e subsuperfície (S'), para análises subsequentes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Foram coletados mais de 1900, 1000 e 2262 dados espectrais durante as campanhas de agosto de 2025, fevereiro e maio de 2026, respectivamente, distribuídos entre Ed, Ld, Lu e reflectância (Rrs). Os dados considerados inconsistentes foram retirados antes do cálculo da média e desvios padrões. As figuras 3, 4 e 5 apresentam os valores médios de reflectância para os quatro pontos de coleta do açude Banabuiú nas três campanhas. Observa-se que o comportamento espectral diferente entre o ano de 2025 e 2026. Os valores médios da campanha de agosto de 2025 variaram entre 0 e 0.025, enquanto os valores médios das campanhas de 2026 variaram entre 0 e 0.015 (linhas azuis). É importante destacar que os dados espectrais da campanha de maio apresentaram menores valores de reflectância que os dados da campanha de fevereiro de 2026. Isso demonstra a variabilidade temporal dos parâmetros de qualidade que são espectralmente ativos nos comprimentos de onda de 320 a 950 nm, como clorofila e turbidez.

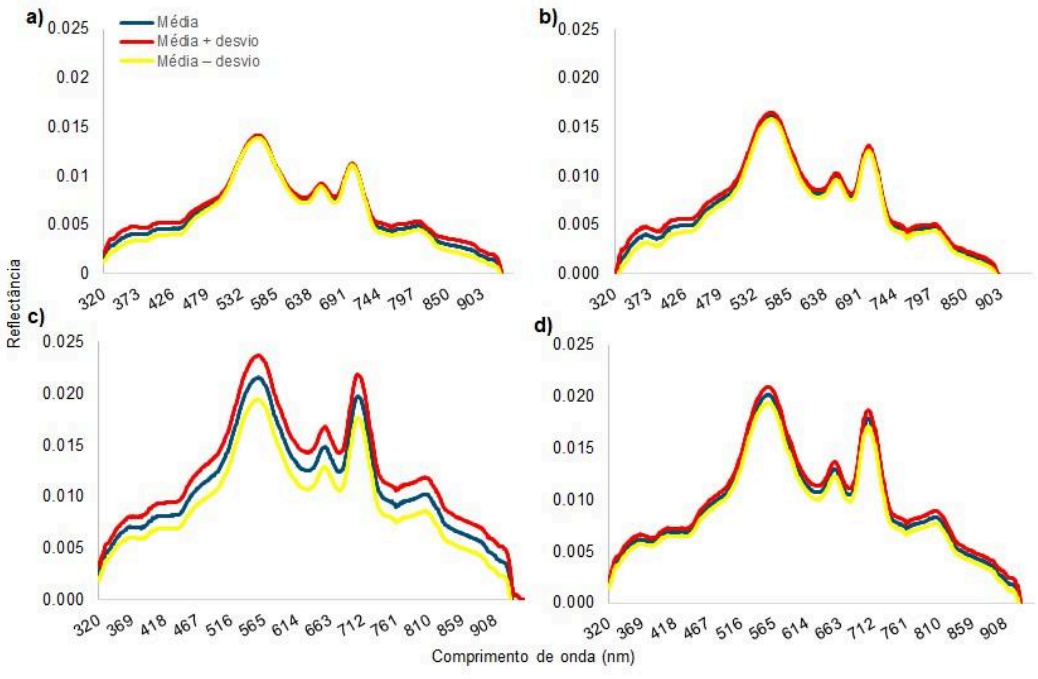


Figura 3 - Reflectância média (linha azul) e desvio máximo e mínimo (linha vermelha e amarela, respectivamente), dos pontos de coleta 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d) do açude Banabuiú, na campanha de agosto de 2025.

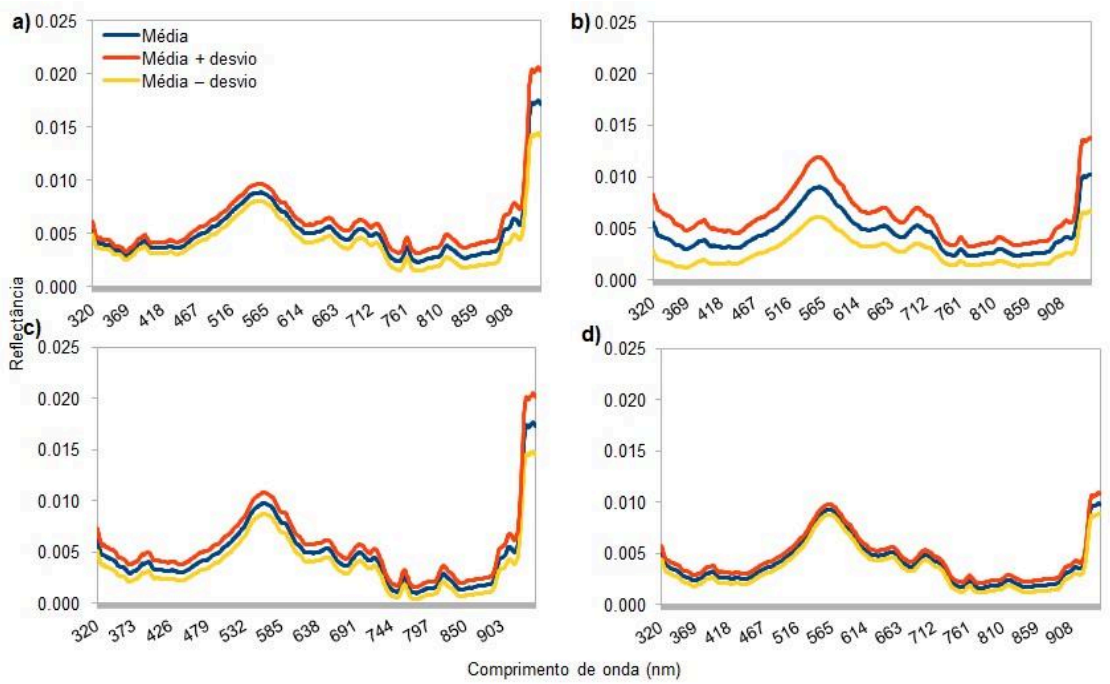


Figura 4 - Reflectância média (linha azul) e desvio máximo e mínimo (linha vermelha e amarela, respectivamente), dos pontos de coleta 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d) do açude Banabuiú, na campanha de fevereiro de 2026.

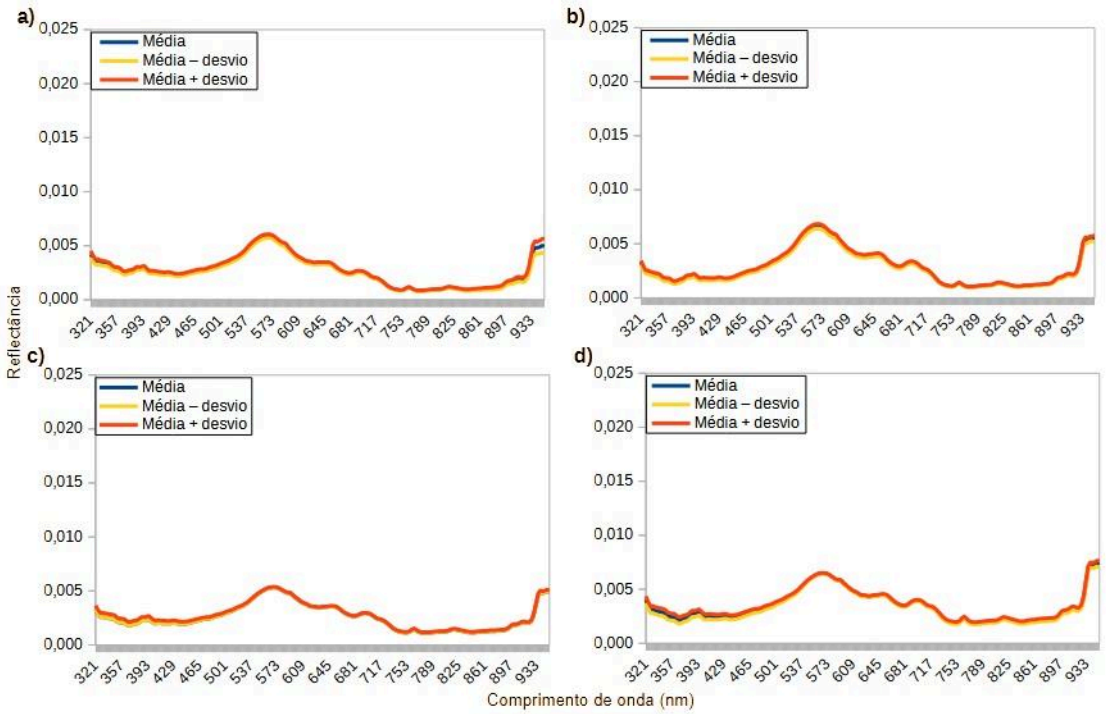


Figura 5 - Reflectância média (linha azul) e desvio máximo e mínimo (linha vermelha e amarela, respectivamente), dos pontos de coleta 01 (a), 02 (b), 03 (c) e 04 (d) do açude Banabuiú, na campanha de maio de 2026.

Nota-se a existência de variabilidade espacial, principalmente nas campanhas de agosto de 2025 e fevereiro de 2026 (Figuras 3, 4 e 5). Essa variabilidade é estática, na qual o ponto 03 se destaca com maiores valores de reflectância que os demais pontos coletados no reservatório.

Observa-se comportamento inverso entre os dados da campanha de agosto de 2025 as demais campanhas coletadas nos maiores comprimentos de onda entre 740 e 950 nm. As figuras 4 e 5 mostram que nessa região espectral os dados apresentam uma leve inclinação ascendente e uma brusca elevação próximo de 900 nm o que indica presença de muitas nuvens durante a coleta do dado (o que aumenta a relação sinal/ruído) e/ou falta de calibração do radiômetro.

Os dados foram coletados em superfície (S) e subsuperfície (S'), nos meses de agosto/2025, fevereiro e maio/2026, via sondas multiparâmetros, nas campanhas de validação, nos quatro pontos do açude Banabuiú (TABELA 1).

Tabela 1 - Dados de sonda das campanhas de agosto/2025, fevereiro e maio de 2026 no açude Banabuiú.

Parâmetros	S	S'	S	S'	S	S'	S	S'
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Profundidade (m)	0,32	0,62	0,31	0,6	0,33	0,60	0,32	0,61
Ficocianina (RFU)	-	-						
Clorofila a (RFU)	0,63	0,62	0,65	0,61	1,11	1,09	0,95	1,06
Turbidez (NTU)	8,13	8,15	9,86	10,43	13,07	13,20	14,30	14,52
Condutividade Elétrica Específica - CE (µS/cm)	392,06	392,45	408,19	408,99	387,66	396,36	357,84	362,10
Sólidos totais dissolvidos - TDS (ppt)	0,26	0,26	0,27	0,27	0,25	0,26	0,23	0,24
Temperatura água (ºC)	28,02	28,03	27,89	27,89	28,37	28,39	28,14	28,14
Parâmetros	S	S'	S	S'	S	S'	S	S'
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Profundidade (m)	0,30	0,90	0,31	0,70	0,31	0,61	0,30	0,70
Ficocianina (RFU)	6,31	6,46	6,21	6,60	4,91	5,51	4,95	5,49
Clorofila a (RFU)	0,26	0,32	0,09	0,61	0,28	0,34	0,13	0,33
Turbidez (NTU)	5,69	6,60	10,91	9,66	6,15	6,44	6,40	6,55
Condutividade Elétrica Específica - CE (µS/cm)	421,63	424,08	464,13	408,87	425,18	427,85	418,61	423,66
Sólidos totais dissolvidos - TDS (ppt)	0,27	0,28	0,30	0,27	0,28	0,28	0,27	0,28
Temperatura água (ºC)	27,80	27,59	28,61	28,51	29,05	29,04	29,12	29,04
Parâmetros	S	S'	S	S'	S	S'	S	S'
	Ponto 1		Ponto 2		Ponto 3		Ponto 4	
Profundidade (m)	0,30	0,90	0,32	0,72	0,30	0,81	0,29	0,78
Ficocianina (RFU)	2,05	1,61	3,01	2,70	2,30	2,33	2,96	3,02
Clorofila a (RFU)	0,67	0,69	0,29	0,35	0,63	0,73	0,74	0,91
Turbidez (NTU)	2,85	2,91	3,78	4,51	3,25	3,42	4,54	4,41
Condutividade Elétrica Específica - CE (µS/cm)	397,82	398,35	256,62	258,74	385,72	405,21	359,78	339,68
Sólidos totais dissolvidos - TDS (ppt)	0,26	0,26	0,17	0,17	0,25	0,26	0,23	0,22
Temperatura água (ºC)	30,72	30,62	31,65	30,82	31,52	31,04	31,84	30,73

Com base nos valores (medianas) dos parâmetros observados, podemos inferir:

Biomassa fitoplanctônica (ficocianina e clorofila-a) - com relação a ficocianina, observa-se uma relativa homogeneidade da distribuição da biomassa cianobacteriana nas duas profundidades

(Figuras 12). Na campanha de fevereiro de 2026, podem ser observados maiores valores em P01 e P02 (~6,2–6,6 RFU) e menores em P03 e P04 (~5 RFU), indicando concentração relativamente maior de cianobactérias no corpo principal do reservatório (Figura 6). A concentração permanece maior no P02, na campanha de maio, havendo redução em P01. Também observa-se valores menores de RFU na última campanha em todos os pontos amostrais em relação à campanha de fevereiro. Com relação a clorofila-a, os valores são muito baixos em todos os pontos, entretanto, na campanha de agosto, os valores de fluorescência da clorofila-a apresentaram variação espacial entre os pontos amostrais do açude, evidenciando diferenças na distribuição da biomassa fitoplanctônica ao longo do reservatório (Figura 6). Os valores registrados nos pontos P01 e P02, sugerem menor concentração de biomassa fitoplanctônica nessas áreas. Em contrapartida, observou-se um aumento acentuado da fluorescência em P03, onde foram registrados os maiores valores, superiores a 1,0 RFU. Esse incremento indica maior abundância de organismos fotossintetizantes e, consequentemente, maior produtividade primária nesse trecho do reservatório.

Em fevereiro, ocorreu uma inversão de comportamento entre S e S' no P02, esses dados sugerem heterogeneidade espacial e temporal no desenvolvimento fitoplanctônico. Durante a campanha de maio, os dados de clorofila-a foram maiores em subsuperfície, em quase todos os pontos, apontando para uma maior concentração da biomassa fitoplanctônica nesta faixa devido, possivelmente, a uma fotoinibição superficial, ou maior disponibilidade nutricional em profundidade (Figura 6).

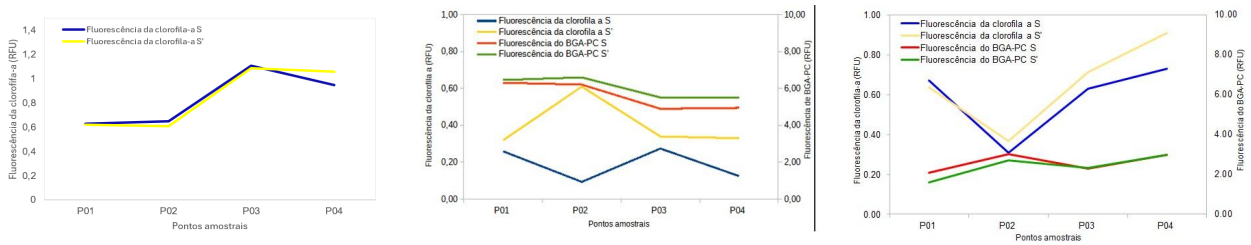


Figura 6 - Comportamento da Clorofila-a e Ficocianina (Unidades de fluorescência - RFU) nos 4 pontos de coleta do açude Banabuiú nas campanhas de agosto/2025, fevereiro e maio de 2026, da esquerda para direita, respectivamente.

Material em suspensão (turbidez) - durante o mês de agosto observou-se aumento progressivo da turbidez entre os pontos amostrais, com os maiores valores registrados em P03 e P04, indicando maior concentração de partículas em suspensão nesses setores do reservatório. Houve redução de turbidez no reservatório entre os meses de fevereiro e maio (Figura 7). Na campanha de fevereiro é possível observar maior turbidez no P02 (~10,9 NTU superficial), enquanto os demais pontos variam entre ~6–7 NTU, indicando possível zona de deposição/ressuspensão central, comum em reservatórios com baixa circulação lateral. Em maio, os maiores valores de turbidez foram

observados em sub-superfície e pode indicar possível zona de deposição/ressuspensão central, comum em reservatórios com baixa circulação lateral.

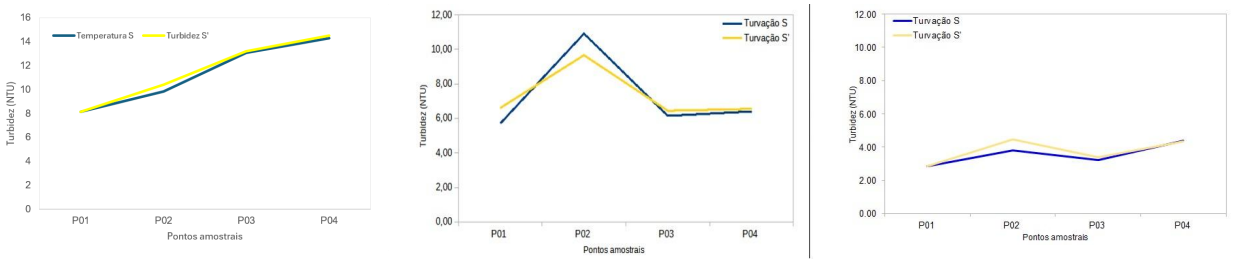


Figura 7- Turbidez (NTU) dos 4 pontos de coleta do açude Banabuiú nas campanhas de agosto/2025, fevereiro e maio de 2026, da esquerda para direita, respectivamente.

Sais dissolvidos (Condutividade elétrica e TDS) - a condutividade apresentou variação entre aproximadamente 357 a 410 µS/cm sendo o maior valor registrado em P02, seguido de redução gradual em P03 e P04, no mês de agosto. Esse comportamento sugere uma maior concentração de sais dissolvidos na região intermediária do reservatório, enquanto os menores valores observados em P04 podem estar associados à diluição da água ou a diferenças locais nos processos de circulação e mistura. Em fevereiro e maio, exceto pelo P02, os valores e comportamento da condutividade elétrica nas duas campanhas foram semelhantes (Figura 8). O comportamento daquele ponto em relação aos demais (~418–425 µS/cm e ~0,27-0,28 ppt) sugere concentração de solutos na região central, possivelmente associada à evaporação e circulação interna. Na campanha de maio parece haver relativa homogeneidade iônica dessas águas durante a campanha.

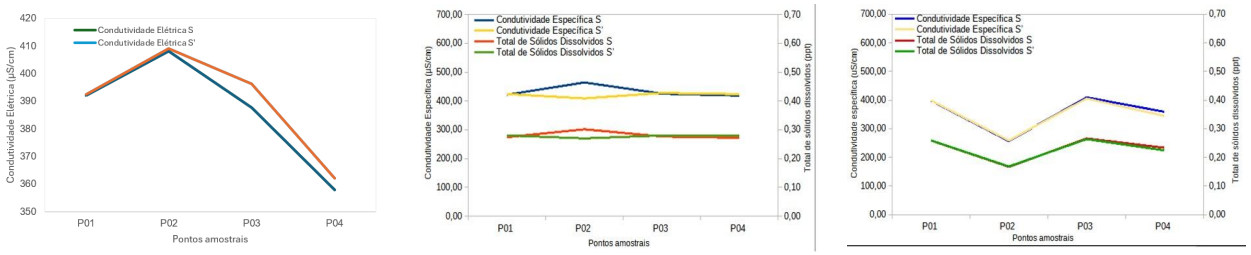


Figura 8 - Comportamento da Condutividade Específica (µS/cm) e do Total de Sólidos Dissolvidos (ppt) dos 4 pontos de coleta do açude Banabuiú nas campanhas de agosto/2025, fevereiro e maio de 2026, da esquerda para direita, respectivamente.

Temperatura da água - no mês de agosto, as temperaturas de S e S' são praticamente iguais em todos os pontos, indicando uma coluna d'água bem misturada e sem estratificação térmica significativa. Observa-se uma queda em P02, seguida de aumento em P03 e leve redução em P04. Há um gradiente espacial leve na temperatura do reservatório que pode ser observado nas duas campanhas de 2026 (Figura 9). Os valores ligeiramente maiores próximos aos tributários podem refletir menor profundidade local ou aquecimento das águas de entrada. A pequena redução térmica

sugere apenas amortecimento da radiação solar direta. Isso indica um ambiente relativamente bem misturado na camada superficial.

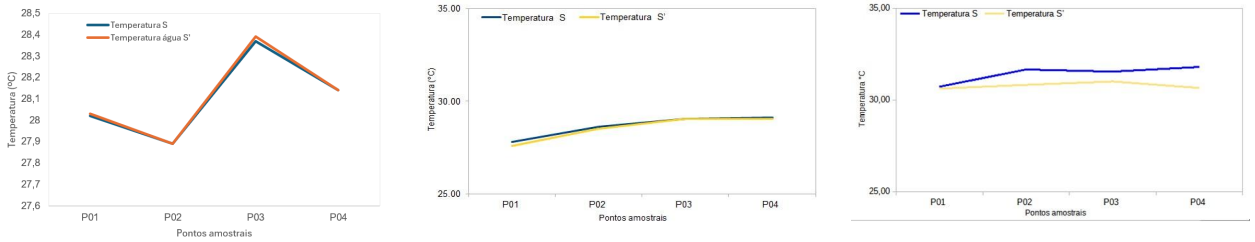


Figura 9 - Temperatura (°C) dos 4 pontos de coleta no açude Banabuiú nas campanhas de agosto/2025, fevereiro e maio de 2026, da esquerda para direita, respectivamente.

A análise espacial das medianas dos parâmetros indica um gradiente espacial típico de reservatórios no semiárido, com a região próxima a barragem apresentando condições hidrodinâmicas mais estáveis.

Na campanha de agosto (período de estiagem), o reservatório exibiu um ambiente hidrodinamicamente bem misturado e termicamente homogêneo, com a condutividade elétrica indicando um processo gradual de concentração de sais na região intermediária (P02). Espacialmente, a biomassa algal (clorofila-a) em agosto mostrou-se baixa no corpo principal (P01 e P02), mas com um incremento acentuado na porção amostral P03 (> 1,0 RFU), evidenciando os primeiros sinais de heterogeneidade e compartimentação espacial decorrentes da redução do volume do reservatório.

Na campanha de fevereiro, a região mais central do açude apresentou maiores valores de turbidez, condutividade elétrica e biomassa algal e na porção mais distal (entrada de afluentes) foi observado menores concentrações de biomassa algal e valores mais diluídos dos demais parâmetros. Na campanha de maio de 2026, a região mais central do reservatório apresentou valores intermediários e na porção mais distal (entrada de afluentes) denotou-se concentrações de biomassa algal e valores mais significativos dos demais parâmetros. Esses comportamentos espaciais, nas duas campanhas, refletem influência hidrológica (aporte) recente.

Em resumo, pode-se inferir que, durante a campanha de fevereiro observou-se águas mais frias, mais mineralizadas, mais turvas e com maior sinal de pigmentos degradados (feofitina/BGA), enquanto que, em maio, observou-se o aquecimento da camada superficial, redução forte da turbidez, diminuição da mineralização e aumento relativo da atividade fitoplanctônica ativa. Isto mostra uma transição consistente entre um cenário mais influenciado por aporte/mistura (fevereiro) para um cenário mais estável em maio. Houve aumento térmico significativo (~ 3ºC) e da biomassa plantônica (clorofila-a). Por outro lado, houve uma significativa diminuição da turbidez (diminuição da carga de partículas) e da ficocianina (redução importante da dominância de BGA). Mesmo não

tendo sido observado valores de OD em fevereiro, pode-se inferir que foram menores que os de maio, principalmente pelos valores um pouco maior da biomassa plantônica. Tanto a C.E. Específica como o TDS indicaram uma maior contribuição na bacia, possivelmente aporte hidrológico, em fevereiro, sendo que em maio aparentemente houve uma estabilização hidroquímica, com reorganização da massa d'água superficial (poucas chuvas).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise espaço-temporal integrada dos parâmetros limnológicos e radiométricos do Açude Banabuiú revelou uma assinatura dinâmica complexa, fortemente condicionada pelo pulso hidrológico e pela sazonalidade climática típica do semiárido tropical. Embora as curvas espectrais tenham apresentado menor relação sinal-ruído decorrente de limitações ambientais, a exemplo de cobertura de nuvens e flutuações na luminosidade difusa, os padrões mantiveram-se consistentes com a realidade limnológica do reservatório. O comportamento espectral dos pontos de coleta do reservatório Banabuiú variaram no tempo e no espaço e acompanharam a variação dos parâmetros de qualidade medidos pela sonda multiparamétrica. Esses dados indicam a necessidade de mais coletas de dados para uma validação robusta diante da variabilidade apresentada.

AGRADECIMENTOS - Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico pelo apoio fornecido via projeto MMCQUAL, Processo Nº 409204/2023-4.

REFERÊNCIAS

COSTA, A.C.; CAVALCANTE, T.F.; OLIVEIRA, A.S.S.; LIMA NETO, I.E.; RIBEIRO NETO, G.G.; VAN OEL, P.R.; MOREIRA, R.P. (2025). "Sharp decline of diarrhea hospitalizations despite historical drought in Brazil: The potential role of local water supply and public health measures". *Journal of Water and Health* 23(6), pp. 743–756. DOI: 10.2166/wh.2025.392.
COGERH. Inventário Ambiental do Açude Banabuiú, 2011.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). Manual para coleta de dados espectrais em campo. Fortaleza: FUNCEME, 2023.

GUIMARÃES, C.C.B.; PORFIRIO, A.C.S.; FILHO, M.R.P.S., LINHARES, S.S., OLIVETTI, D., ALAOUI, Y.A. Desafios do uso de drone para o monitoramento da eutrofização em açude do semiárido cearense — experimentos iniciais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 21., 2025, Salvador, ISBN: 978-65-80968-29-9.

SRH - Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará. (2018). 6-Projeção de Cenários de Ofertas e Demandas Hídricas.