VARIABILIDADE ESPAÇO TEMPORAL DA TEMPERATURA SUPERFICIAL DA ÁGUA NO RESERVATÓRIO BATALHÃO, CRATEÚS-CE, VIA SENSORIAMENTO REMOTO

Ludmylla Beatrice Martins do Nascimento [1] ; Janine Brandão de Farias Mesquita [2]

RESUMO – O monitoramento térmico de corpos d'água em regiões semiáridas é fundamental para compreender os processos hidrodinâmicos e quantificar as perdas por evaporação. O objetivo deste estudo foi analisar a variabilidade espaço-temporal da temperatura superficial do Reservatório Batalhão (Crateús, Ceará) via sensoriamento remoto. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 8 (sensor OLI/TIRS) de 2014 a 2024, conjugadas com dados meteorológicos do INMET. A metodologia consistiu no processamento digital das bandas espectrais para o cálculo do NDVI, emissividade da superfície e temperatura superficial da água (Ts). Os resultados indicaram oscilação expressiva nos padrões térmicos, registrando valores mínimos de 25,37°C em períodos chuvosos e picos superiores a 32,04°C na transição para o período seco, demonstrando forte acoplamento com a radiação solar e a temperatura do ar. Conclui-se que o uso de ferramentas orbitais apresenta alta eficiência no diagnóstico térmico contínuo e na identificação de gradientes espaciais em reservatórios abertos, consolidando-se como um instrumento robusto para mitigar a escassez de dados locais e otimizar o planejamento hídrico no semiárido cearense.

ABSTRACT– Thermal monitoring of water bodies in semi-arid regions is essential for understanding hydrodynamic processes and quantifying evaporation losses. The objective of this study was to analyze the spatiotemporal variability of the surface temperature of the Batalhão Reservoir (Crateús, Ceará) using remote sensing. Images from the Landsat 8 satellite (OLI/TIRS sensor) from 2014 to 2024 were used, combined with meteorological data from INMET. The methodology consisted of digital processing of spectral bands to calculate the NDVI, surface emissivity, and water surface temperature (Ts). The results indicated significant fluctuations in thermal patterns, recording minimum values of 25.37°C during rainy periods and peaks exceeding 32.04°C during the transition to the dry season, demonstrating a strong correlation with solar radiation and air temperature. It is concluded that the use of satellite-based tools is highly effective for continuous thermal monitoring and the identification of spatial gradients in open reservoirs, establishing itself as a robust tool for mitigating the scarcity of local data and optimizing water planning in the semi-arid region of Ceará.

Palavras-Chave – Temperatura da água, Landsat 8, Semiárido.

[1]) Mestranda no programa ProfÁgua, Universidade Federal do Ceará (UFC). Campus Crateús, ludmylla_beatrice13@alu.ufc.
[2]) Professora Adjunta (UFC), janine@crateus.ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

O Semiárido nordestino brasileiro e, especificamente, o estado do Ceará, caracterizam-se por severos desafios no gerenciamento de recursos hídricos decorrentes de restrições hidrogeológicas estruturais e de uma expressiva variabilidade espaço-temporal, cenários que são agravados pelo aquecimento global e pelas perdas acentuadas por evaporação em reservatórios superficiais (Friedrich, 2018; Nevermann et *al.*, 2024). Nesse contexto, a temperatura superficial da água constitui um parâmetro físico-químico crítico governado pelo balanço de energia na interface água-atmosfera, influenciando de maneira direta os fluxos de calor sensível e latente (Ji, 2008).

Sob o ponto de vista hidroambiental, o acompanhamento contínuo desse indicador físico é essencial para qualificar a governança hídrica regional, uma vez que flutuações térmicas elevadas alteram a solubilidade de gases dissolvidos, aceleram a degradação da matéria orgânica e interagem de forma sinérgica com o aporte de nutrientes, impulsionando cenários de eutrofização que comprometem o uso múltiplo das reservas hídricas (Hestir, *et al.,* 2015).

Diante da escassez crônica e de falhas em redes de monitoramento *in situ*, as tecnologias de sensoriamento remoto consolidaram-se como ferramentas fundamentais ao capturar a radiância emitida no infravermelho termal (TIR) de forma sistemática e continua (Pedreros-Guarda *et al.,* 2021). A utilização de sistemas orbitais de alta resolução, como as séries de satélites Landsat (Landsat 5, 7, 8 e 9) e o sensor MODIS, viabiliza a espacialização das variações térmicas e a estimativa de fluxos energéticos distribuídos por todo o espelho d'água (Tavares, *et al.,* 2018).

O objetivo deste estudo foi analisar a variabilidade espaço-temporal da temperatura superficial do Reservatório Batalhão, localizado no município de Crateús, Ceará, por meio de técnicas de sensoriamento remoto, visando compreender a dinâmica térmica do reservatório e fornecer subsídios para a gestão dos recursos hídricos da região.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

O Reservatório Batalhão localiza-se na zona urbana do município de Crateús, inserido na mesorregião dos Sertões, no estado do Ceará, Nordeste do Brasil (Figura 1). Geograficamente, o reservatório integra a Bacia Hidrográfica dos Sertões de Crateús, ocupando uma posição estratégica por coletar e regular os fluxos hídricos de seis reservatórios de montante, apesar de sua reduzida capacidade de acumulação volumétrica nominal, fixada em 2,77 hm³ (COGERH, 2021). A região é caracterizada por um clima semiárido quente BSh segundo Köppen, com regime pluviométrico marcado por chuvas escassas, mal distribuídas e concentradas em um curto período do ano. A

temperatura média do ar na região oscila regularmente entre 23°C e 27°C ao longo do ano, acompanhada por taxas elevadas de insolação global e baixos índices de umidade relativa (COGERH, 2021). A principal finalidade do Reservatório Batalhão reside no suporte ao abastecimento hídrico urbano e no controle ambiental local.

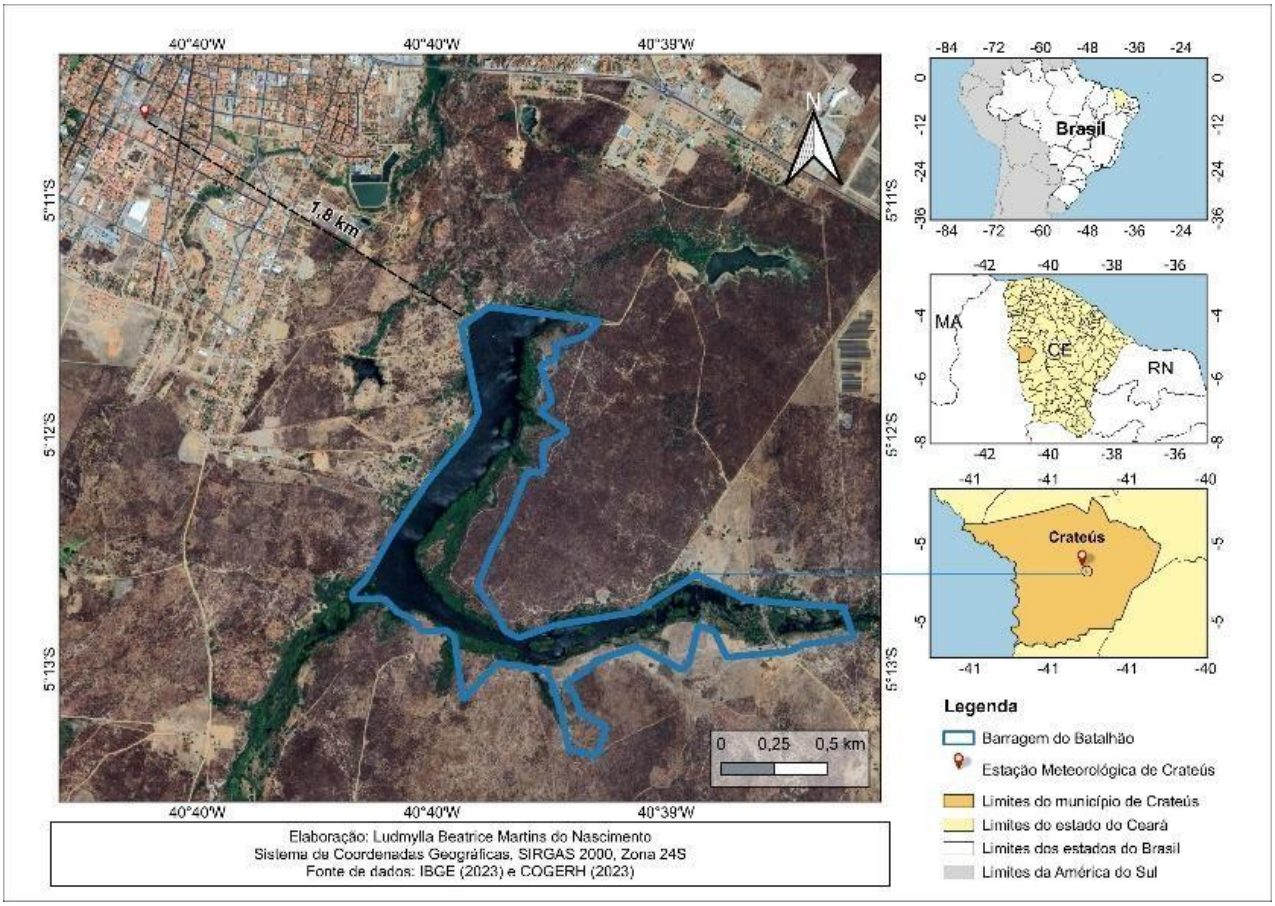


Figura 1 – Mapa de localização do açude Batalhão, Crateús – CE

2.2 Dados de sensoriamento remoto e meteorológicos

A análise temporal fundamentou-se em uma série histórica de dados compreendendo o intervalo de 2014 a 2024. Foram adquiridas imagens digitais do satélite Landsat 8, equipado com o sensor *Operational Land Imager* (OLI) e o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). As bandas espectrais utilizadas englobaram a Banda 4, a Banda 5 e a Banda 10. Os critérios de seleção das cenas priorizaram a ausência completa de cobertura de nuvens sobre o espelho d'água do Reservatório. Os dados meteorológicos complementares diários foram obtidos junto à estação automática de Crateús monitorada pelo INMET.

2.3 Processamento das imagens

O fluxo metodológico para a obtenção da temperatura superficial da água baseou-se em etapas sequenciais:

A radiância no topo da atmosfera para a banda termal 10 foi calculada utilizando-se os fatores multiplicativos e aditivos obtidos nos metadados das cenas:

$$L = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

Onde L é a radiância espectral; M_Lé o fator multiplicativo escalonado específico da banda; A_L é o fator aditivo escalonado específico da banda; e Q_{cal} representa os valores pixel a pixel da Banda 10.

A radiância espectral foi convertida em temperatura de brilho expressa em graus Celsius °C:

$$BT = \frac{K_2}{ln\,[(K_1/L)+1]} - 273{,}15 \quad (2)$$

Onde K1 e K2 representam as constantes de conversão térmica específicas para o sensor TIRS.

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi gerado a partir das bandas 4 e 5, auxiliando na determinação da proporção de vegetação (PV):

$$NDVI = \frac{B5-B4}{B5+B4} \quad (3)$$

$$PV = \left(\frac{NDVI-NDVImín}{NDVImáx-NDVImín}\right)^2 \quad (4)$$

Seguindo o modelo proposto por Sobrino *et al.* (2004), a emissividade da superfície da água (ε) foi estimada pela expressão:

$$\varepsilon = 0.004 \times PV + 0.986 \quad (5)$$

A formulação matemática final para obtenção da temperatura real corrigida pela emissividade baseou-se no algoritmo desenvolvido por Avdan e Jovanovska (2016):

$$T_{s8} = \frac{BT}{\{1 + [(0{,}00115BT/1{,}4388)lns]\}} \quad (6)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do mapa térmico do Reservatório Batalhão (Figura 1) revelou um padrão espacial bem definido: as margens e as zonas menos profundas apresentam as temperaturas mais elevadas. Este comportamento deve-se à baixa inércia térmica dessas áreas, onde o menor volume de água aquece rapidamente sob a forte radiação solar. Em contrapartida, as águas profundas situadas junto à barragem mostraram-se mais frias e estáveis, beneficiando de uma maior capacidade de redistribuição de calor através das correntes de convecção internas

.

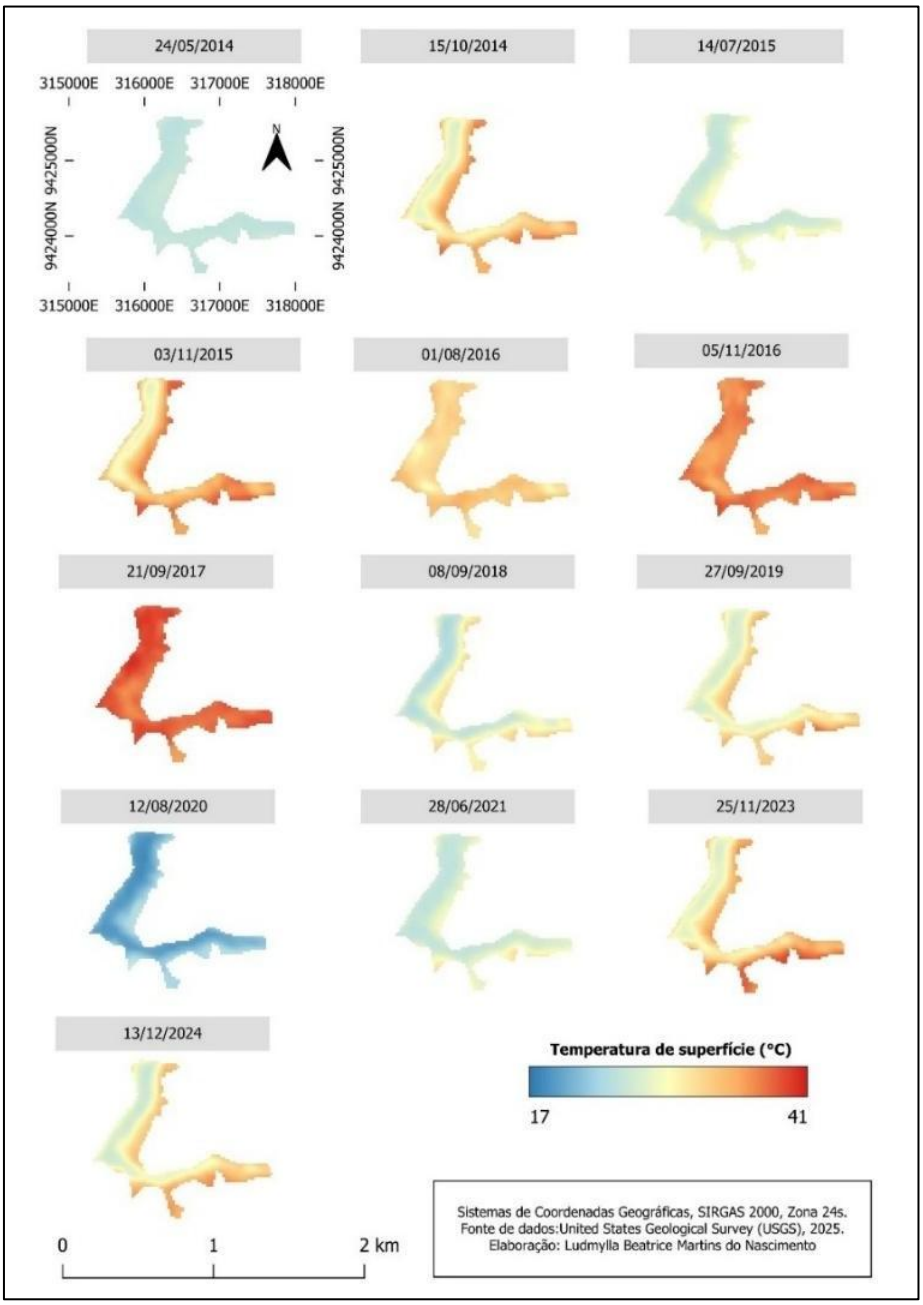


Figura 2 – Variação da temperatura superficial no Reservatório Batalhão (2014-2024)

Cronologicamente, a dinâmica térmica do Reservatório Batalhão ao longo do período de 2014 a 2024 demonstrou forte dependência da sazonalidade climática característica do semiárido cearense. Os resultados evidenciaram que as temperaturas superficiais mínimas foram registradas predominantemente no transcorrer dos meses que compreendem a quadra chuvosa da região (fevereiro a maio), atingindo valores na ordem de 25°C.

Por outro lado, os picos de temperatura superficial máxima da água foram identificados no período de estiagem (com destaque para os meses de setembro a dezembro), alcançando marcas superiores a 32°C. Nesses meses, a combinação de elevados índices de insolação, ausência de nebulosidade e redução drástica do volume armazenado potencializa o aquecimento do espelho d'água.

Constatou-se uma relação direta e estatisticamente significativa entre a temperatura média do ar e a temperatura superficial adquirida via Landsat 8 (Figura 3), demonstrando que o balanço hídrico e energético do reservatório responde de forma rápida às variações microclimáticas.

A umidade relativa do ar e a velocidade do vento atuam como mecanismos reguladores das perdas energéticas. Nos períodos em que a velocidade do vento é mais intensa, ocorre o cisalhamento mecânico da superfície líquida, promovendo turbulência e acelerando a remoção da camada de ar saturada imediatamente acima da lâmina d'água, o que eleva a taxa de fluxo de calor latente e provoca quedas pontuais na temperatura superficial devido ao resfriamento evaporativo.

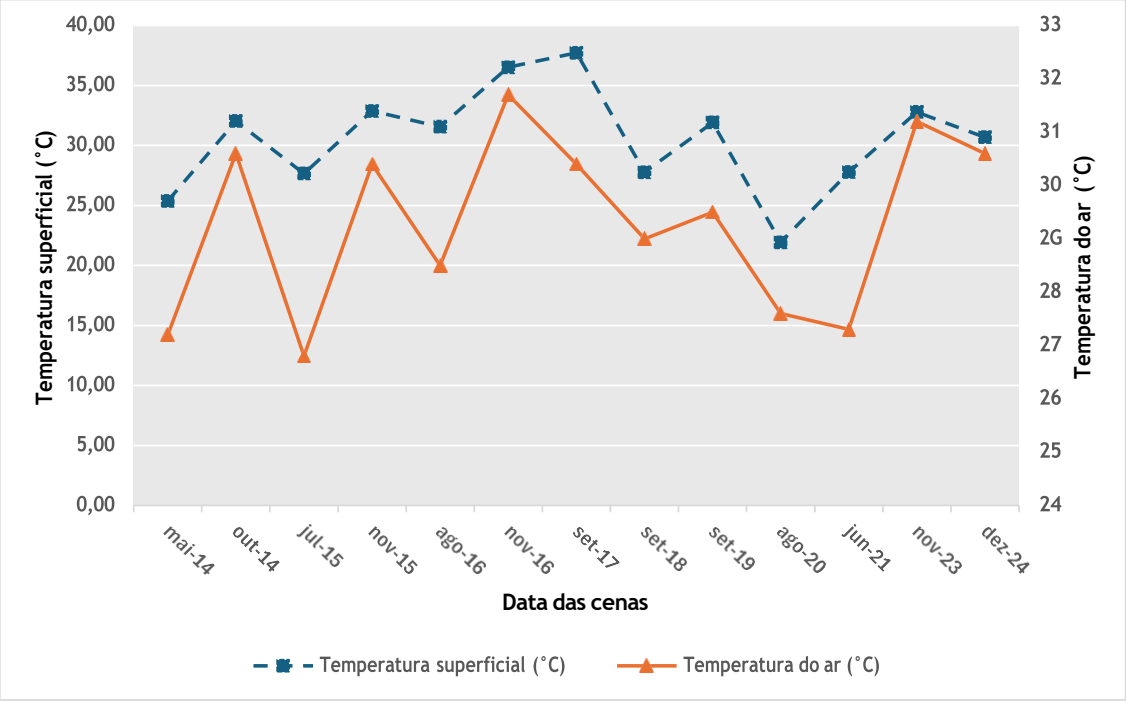


Figura 3 – Temperatura superficial média (°C) e temperatura média do ar (°C) no reservatório Batalhão, Ceará (2014-2024)

Os padrões termais identificados no Açude Batalhão alinham-se consistentemente com estudos desenvolvidos no semiárido brasileiro e em outras regiões de aridez acentuada do globo. Em âmbito estadual, os resultados assemelham-se às observações hidrotérmicas efetuadas em reservatórios de maior porte no Ceará, como no açude Quixeramobim (Nascimento, 2024), onde a variação da temperatura superficial flutua marcadamente na faixa entre 24°C e 33°C sob as mesmas forçantes climatológicas.

Divergências pontuais de amplitude térmica são observadas quando o Batalhão é confrontado com grandes lagos profundos (Tavares, 2019) ou reservatórios localizados em regiões tropicais úmidas. No reservatório Batalhão, por se tratar de um corpo d'água urbano de pequeno porte (2,77 hm^3), a resposta térmica às flutuações diárias de radiação solar e vento é muito mais abrupta e severa, o que acentua as perdas evaporativas reais e exige estratégias de monitoramento espacializado mais frequentes.

No gráfico 1, é possível observar o coeficiente de regressão linear (R^2) que apresentou uma correlação moderada a forte (0,6382). Embora não seja uma correlação elevada, pois é um parâmetro influenciado também por outras variáveis (como a radiação), a linha de tendência ascendente confirma uma relação física direta: à medida que o ar aquece, a superfície aquática tende a acompanhar esse aquecimento.

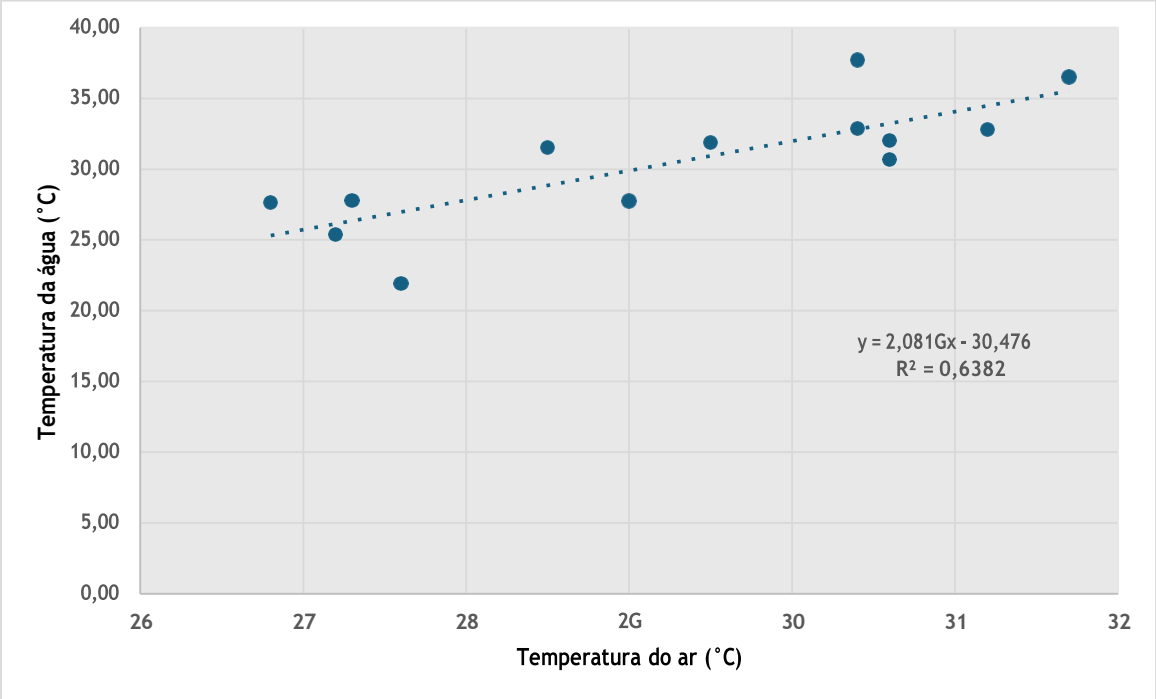


Gráfico 1 – Regressão linear da Temperatura superficial média (°C) e temperatura média do ar (°C) no reservatório Batalhão, Ceará (2014-2024)

Posto isso, a temperatura de superfície da água em lagos tem sido amplamente destacada para estudos hidrológicos. Sharaf (2019) destaca que na ausência de observações de campo regulares, o sensoriamento remoto tornou-se uma ferramenta com excelentes aplicações no monitoramento de superfície da água em grandes escalas espaciais e temporais.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo confirmam que o sensoriamento remoto térmico é uma ferramenta viável e altamente precisa para monitorizar a dinâmica hidroambiental no semiárido cearense. Os dados do Landsat 8 permitiram mapear com clareza como a temperatura do açude Batalhão responde de imediato às variações climáticas locais, oscilando entre 25,37°C e picos de 32,04°C, além de expor o forte contraste térmico entre as margens rasas e o centro profundo. Essa capacidade de espacializar a temperatura supera as limitações das recolhas físicas tradicionais, que dependem de amostragens pontuais e muitas vezes não refletem a real heterogeneidade do reservatório.

A análise estatística demonstrou forte correlação com dados medidos pela estação climatológica, demonstrando efetividade na metodologia aplica para determinar a temperatura superficial. Para a gestão dos recursos hídricos na Bacia dos Sertões de Crateús, este diagnóstico contínuo funciona como um indicador estratégico. Compreender estas flutuações térmicas superficiais é o primeiro passo para antecipar crises na qualidade da água, como o risco de florações de algas. Ressalta-se que este estudo é fundamental para calibrar modelos preditivos locais e garantir o abastecimento seguro da população em cenários de seca extrema.

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.

REFERÊNCIAS

AVDAN, U.; JOVANOVSKA, G. (2016). "Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data". *Journal of Sensors* 2016, pp. 1–11.

COGERH. (2021). *Diagnóstico da Região Hidrográfica dos Sertões de Crateús: versão final*. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, Fortaleza - CE. Disponível em: https://portal.cogerh.com.br. Acesso em: 14 jun. 2026.

HESTIR, E. L. *et al.* (2015). "Measuring freshwater aquatic ecosystems: The need for a hyperspectral global mapping satellite mission". *Remote Sensing of Environment* 167, pp. 181–195.

JI, Z.-G. (2008). *Hydrodynamics and water quality: Modeling rivers, lakes, and estuaries*. John Wiley & Sons, Inc, Hoboken - New Jersey, 676 p.

NASCIMENTO, L. B. M. do. (2024). *Estimativa da evaporação do açude Quixeramobim, Ceará, utilizando sensoriamento remoto*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, Crateús - CE, 65 p. Disponível em: http://repositorio.ufc.br. Acesso em: 10 out. 2025.

PEDREROS-GUARDA, M. *et al.* (2021). "A Google Earth Engine Application to Retrieve Long-Term Surface Temperature for Small Lakes. Case: San Pedro Lagoons, Chile". *Remote Sensing* 13, pp. 4544.

TAVARES, M. H. *et al.* (2018). "Comparação de estimativas da temperatura superficial de lagos por sensoriamento remoto: estudo de caso da Lagoa Mangueira usando Landsat 7 ETM+ e o produto MOD28", *in Anais do XIV Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*. ABRHidro, Porto Alegre - RS.

TAVARES, M. H. (2019) Estimativas da temperatura superficial da água por sensores remotos: acurácia e aplicabilidade com modelos de temperatura.