DINÂMICA TEMPORAL DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DA ÁGUA EM LAGOS NATURAIS E ARTIFICIAIS DO RIO GRANDE DO SUL

Rafael Zini Ouriques [1], Gisieli Kramer [2], Waterloo Pereira Filho [3]

[1, 2, 3]Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) – Departamento de Geociências – Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO), Av. Roraima, 1000, Bairro Camobi, Santa Maria – RS; [1]rafaziniouriques@gmail.com; [2]kramergisieli@gmail.com; [3]waterloo@ufsm.br

RESUMO

A Temperatura de Superfície da Água (TSA) foi analisada para o reservatório Passo Real (PR) e a Lagoa Mirim (LM), Rio Grande do Sul (RS) entre 2003–2023. A partir da mediana do produto MYD11A2 (satélite *Aqua*), processada no *Google Earth Engine* (GEE), obteve-se a TSA média diária e anual. A série temporal (915 cenas em cada lago) indicou maiores TSAs no PR em comparação a LM, com diferença média de 3,8 ºC. As TSAs médias diárias mostraram sazonalidade consistente com os padrões climáticos da região, com valores mais elevados na primavera e verão. Apesar da evolução das TSAs médias anuais neste período de 21 anos, não foi identificada tendência de aquecimento nos lagos. A TSA, considerada uma indicadora das mudanças climáticas, é influenciada por fatores naturais quanto antrópicos. A latitude, longitude, altitude, morfometria, qualidade da água e os usos da terra contribuem na variação das TSAs dos lagos investigados.

Palavras-chave — Sensoriamento Remoto, Aqua, MODIS, *Google Earth Engine*, Uso e Cobertura da Terra.

ABSTRACT

The Water Surface Temperature (WST) was analyzed for the Passo Real reservoir (PR) and the Mirim lagoon (LM), in Rio Grande do Sul (RS) between 2003–2023. The median of the MYD11A2 product (Aqua satellite), processed in Google Earth Engine (GEE), was used to determine the daily and annual means of WST. The time series (915 scenes for each lake) indicated higher WSTs in PR compared to LM, with a mean difference of 3.8 ºC. The daily mean WSTs showed a seasonality consistent with the region's climatic patterns, with higher values in spring and summer. Despite the evolution of annual mean WSTs over these 21 year, there was no warming trend in the lakes. The WST, considered an indicator of climate change, is influenced by natural and anthropogenic factors. Latitude, longitude, altitude, morphometry, water quality, and land use all contribute to WSTs variation in the lakes investigated.

Key words — *Remote Sensing, Aqua, MODIS, Google Earth Engine, Land Use and Land Cover (LULC).*

1. INTRODUÇÃO

A TSA em lagos e o *Land Use and Land Cover* (LULC) são reconhecidos como *Essential Climate Variables* (ECVs) pelo *Global Climate Observing System* (GCOS) [1]. As ECVs são variáveis físicas, químicas ou biológicas que contribuem para a caracterização do clima e podem auxiliar em medidas de mitigação e adaptação de seus efeitos correlacionados [1]. A variação da temperatura da água, em particular, está relacionada tanto a fatores naturais (ex. radiação solar, vento, temperatura do ar, morfometria dos lagos) quanto a influências antrópicas (ex. LULC) [2, 3].

Medições *in situ* da TSA geralmente são limitadas por restrições geográficas e custos onerosos o que, muitas vezes, torna o uso de ferramentas para o processamento e análise de dados de sensoriamento remoto, como o GEE, uma alternativa viável. Os satélites *Aqua* e *Terra*, equipados com o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) são muito utilizados no monitoramento da TSA [2, 3, 4, 5, 6]. Sua capacidade em fornecer dados globais, diários e gratuitos permite análises temporais necessárias para a identificação de padrões sazonais, anuais e de tendências da TSA.

A análise temporal da TSA em lagos naturais e artificiais pode auxiliar na compreensão das diferenças na dinâmica de seus processos (estratificação térmica e ciclo de nutrientes) e de seus impactos ecológicos (biodiversidade e qualidade da água) atuantes em seu metabolismo [7, 8]. Lagos artificiais podem apresentar variações mais bruscas da temperatura da água, com efeitos na saúde dos ecossistemas e na eficiência de seus usos [8]. A resiliência dos lagos frente às mudanças dos padrões climáticos e a sustentabilidade de suas atividades econômicas também devem ser compreendidos [2, 7, 8].

Neste contexto, estudos que refletem a dinâmica da TSA em lagos interiores do RS ainda são poucos explorados. Enquanto a maioria dos lagos naturais concentram-se no litoral do estado, os lagos artificiais são mais comuns em áreas de relevo colinoso ou escarpado, no interior do estado, com rios que oferecem condições propícias para a construção de barragens. O objetivo do estudo foi analisar a variação temporal da TSA em lagos artificiais e naturais do RS, em um período de 21 anos, a partir de dados do sensor MODIS.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os lagos selecionados correspondem ao reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) Passo Real e da Lagoa Mirim, localizados

no estado do RS (Figura 1). O RS é caracterizado por um clima subtropical úmido com verões quentes do tipo Cfa (Classificação de Köppen–Gaiger).

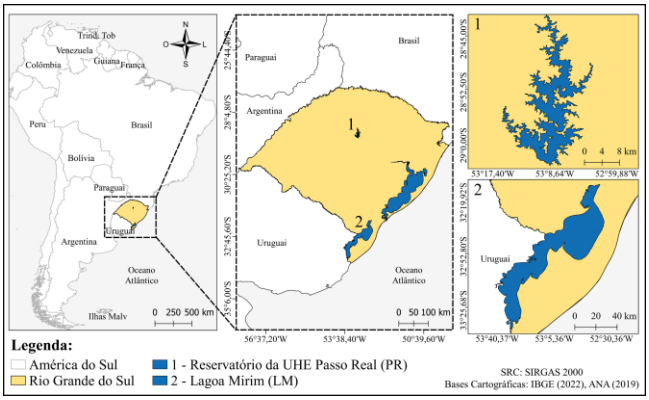


Figura 1. Localização das áreas de estudo: 1) reservatório da UHE Passo Real; 2) da Lagoa Mirim.

O reservatório PR, construído em 1973 para atender a demanda energética e regular a vazão da água, está situado no alto curso da Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí (região centro-norte do RS) e seus principais tributários incluem os rios Jacuí, Jacuí-mirim e Ingaí [7, 8]. PR é considerado o maior lago artificial do estado, com área em torno de 204 km² e profundidade média em torno de 16 m [3, 7, 8].

A LM, localizada sobre a planície costeira do RS, é o principal manancial hídrico da Bacia Hidrográfica Mirim de São Gonçalo. Possui largura média de 20 km, área superficial de 3.750 km² (2.750 km² no Brasil e 1.000 km² no Uruguai) e profundidade média em torno de 5 m [10, 5]. Além de sua importância para a irrigação e o abastecimento, mantém a umidade na Estação Ecológica do Taim, uma reserva ambiental que serve de abrigo e alimentação para diferentes espécies de animais e vegetais [10].

A análise da TSA foi realizada a partir do MYD11A2 (versão 6.1) do satélite *Aqua* (13h30min horário local). Este produto fornece a média da temperatura de superfície da água diária do MYD11A1 no período de 8 dias. Para obter a série temporal da TSA foi elaborado um *script* na plataforma do GEE, que englobou as seguintes etapas: i) identificação de pontos amostrais; (ii) definição do MYD11A2; (iii) seleção da banda *LST_Day_1km*, aplicação do fator de escala e conversão para graus Celsius (ºC); e (iv) determinação dos valores medianos e elaboração dos gráficos da TSA.

Os pontos amostrais foram alocados com o auxílio de imagens do Sentinel–2A (composição RGB – bandas 4/3/2), em períodos de estiagem (baixo nível da água), a fim de minimizar o efeito das bordas e de pequenas ilhas nos valores de TSA. Assim, 15 pontos foram distribuídos na região central do PR e 15 pontos ao longo do eixo principal (direção Nordeste-Sudoeste) da LM. Optou-se pela determinação da mediana da TSA para atenuar valores extremos.

A partir das medianas da série de TSA (2003–2023) foi determinada a média diária (datas pareadas) dos lagos, bem como sua amplitude, representada pela média móvel ao longo de 3 dias. Esses resultados foram organizados em dias julianos (método de contagem de dias consecutivos), para verificar a variação da TSA ao longo do ano.

As médias anuais da TSA e suas amplitudes no PR e na LM também foram analisadas. Para verificar suas possíveis tendências, foi aplicado o teste de *Mann–Kendall* (MK) e o Estimador de *Sen's Slope* (ESS) [11]. Ambos testes foram processados em ambiente R (versão 4.2.3) com os pacotes *trend* e *kendall*, em nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

A dinâmica da TSA diurna foi analisada com base em 915 cenas do *MODIS/Aqua* (em cada lago), no período de 2003 a 2023 (Figura 2). De maneira geral, o reservatório de PR apresentou TSA medianas mais elevadas que a da LM, com amplitudes de 20,7 ºC e 21,3 ºC durante a série histórica, respectivamente (Figura 2a). A diferença média da TSA no PR (22,9 ºC) e em relação a LM (19,1 ºC) no período de 21 anos de dados foi de 3,8 ºC.

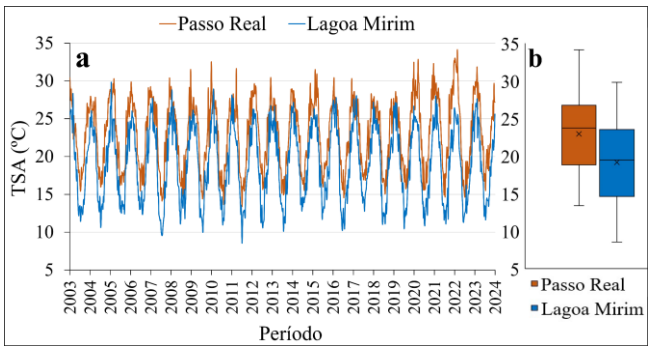


Figura 2. Série temporal (a) e *boxplot* (b) da TSA mediana (2003-2023) no reservatório Passo Real e na Lagoa Mirim.

Alguns picos da TSA podem ser observados no período investigado (Figura 2a). No PR, TSA acima de 32,0 ºC foram recorrentes a partir de 2020. Na LM, TSA acima de 28,0 ºC ocorreram em 2017 e em anos anteriores a 2011. Verificou-se ainda TSA inferiores a 15,0 ºC no reservatório e a 10,0 ºC na lagoa, principalmente em 2007. A dispersão dos dados de TSA, representada pela amplitude interquartílica no *boxplot* (Figura 2b), foi maior na LM (8,9 ºC) do que no PR (7,9 ºC), em seus valores mínimos, médios e máximos.

Na Figura 3 tem-se a TSA média diária dos lagos de 915 cenas em datas pareadas. Os resultados dispostos nesta figura permitiram analisar a variabilidade da TSA no PR (coluna laranja) e na LM (coluna azul) ao longo do ano (dias julianos). Suas maiores médias concentraram-se no intervalo dos meses de novembro a março, com valores superiores a 25,0 ºC no PR e a 20,0 ºC na LM. Em contrapartida, as menores médias diárias de TSA ocorreram em junho e julho, com valores inferiores a 19,0 ºC no PR e a 14,0 ºC na LM.

A amplitude da TSA média diária (linha tracejada) de PR com a LM também é ilustrada na Figura 3. Suas menores diferenças podem ser verificadas nas datas que compreendem

os meses de janeiro e fevereiro, período de verão. O oposto é verificado nos demais meses do ano, que apresentaram as maiores amplitudes médias de TSA (mantem-se próximo a 4,3 °C). Nota-se, ainda, um pico em novembro, seguido do início da diminuição nos meses de verão.

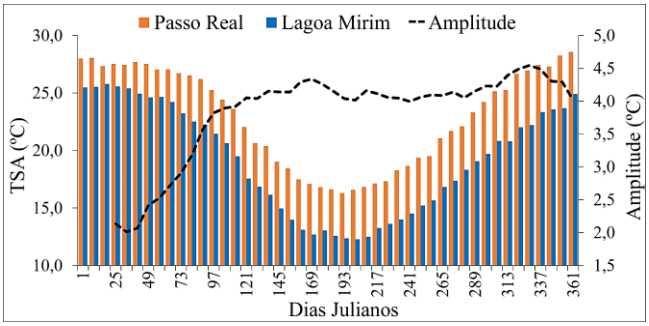


Figura 3. TSA média diária da série temporal (2003-2023) e sua amplitude entre Passo Real e Lagoa Mirim.

A Figura 4 mostra a variação anual da TSA média e sua amplitude, com valores entre 22,0–24,5 ºC no PR e 18,3–20,0 ºC na LM. As médias anuais mais elevadas no PR foram registradas em 2012, 2020, 2021 e 2023, anos que também apresentaram altas amplitudes. Na LM, as maiores médias anuais ocorreram em 2014, 2015 e 2017. Observa-se que, a partir de 2011, as médias anuais dos dois lagos seguiram padrões de variação semelhantes, com exceção de 2020.

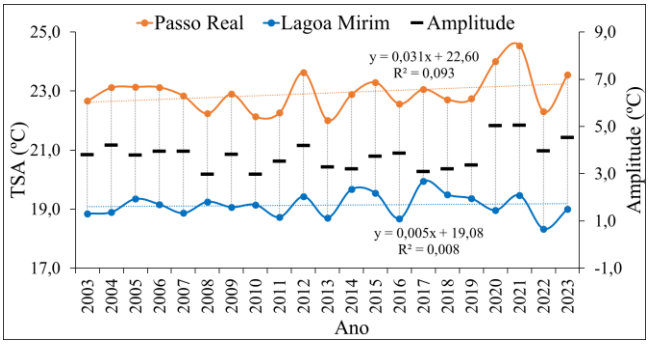


Figura 4. TSA média anual (2003-2023) no reservatório Passo Real e na Lagoa Mirim.

Também foram analisados o tipo de tendência (MK) e o valor estimado de sua inclinação (ESS) na série temporal da TSA. Verificou-se a evolução da TSA média anual tanto no PR (tau de Kendall (τ) = 0,13; Z = 0,81; ESS = 0,022) quanto na LM (τ = 0,08; Z = 0,45; ESS = 0,008) no período de 21 anos de dados, no entanto, não foram identificadas tendências ascendentes ou descendentes significativas.

4. DISCUSSÃO

A variação da TSA ao longo dos anos foi consistente com o padrão climático da região onde os lagos estão inseridos (Figura 3). O clima subtropical do RS pode ser dividido em 4 tipos principais [9]. O tipo *Subtropical Ia* abrange o litoral sul do estado, onde está inserida a Lagoa Mirim, e apresenta um clima pouco úmido com inverno frio e verão ameno [9]. Conforme esta classificação, a Temperatura média do ar (Tma) no mês mais frio (julho) varia entre 11,0–14,0ºC e no mês mais quente (janeiro) entre 20,0–26,0 ºC.

O tipo *Subtropical III* compreende uma faixa na escarpa do Planalto Basáltico do centro do estado até o litoral norte. PR está localizada nesta faixa e possui um clima úmido com variação longitudinal das Tma [9]. Com base nesta classificação, a Tma no mês mais frio também varia entre 11,0–14,0 ºC e no mês mais quente entre 23,0–26,0 ºC. Medições da TSA no PR com termômetro digital (2009–2010) indicaram variação intra-anual típica de reservatórios subtropicais, em torno de 15,5±0,6 °C em julho e de 27,3±1,2 °C em fevereiro [8], valores próximos aos encontrados no presente estudo de 15,6 ºC e de 27,1 ºC em fevereiro.

A TSA mais elevada na LM nos meses de janeiro e fevereiro (Figura 3) condicionou para as menores amplitudes diárias em relação ao PR, diferente do observado nos meses quentes do final do ano. Fatores naturais como radiação solar, velocidade do vento, forma e profundidade dos lagos analisados podem justificar a diferença encontrada nas médias de TSA [4, 5, 7].

As médias anuais de TSA variaram ao longo do tempo (Figura 4). Os picos verificados em 2012, 2020 e 2021 também foram relatados em estudo anterior [4]. Estes picos podem ser atribuídos a pulsos de TSA com frequências decenais [4, 6] e são importantes de serem avaliados. Uma análise preliminar em 55 lagos brasileiros (2003–2022) registrou TSAs mais elevadas em 2015, 2019 e 2020, que foram associadas a pulsos térmicos [6]. Estes autores também observaram que a amplitude térmica (diferença da TSA média no intervalo de 2003–2012 e 2013–2022) em lagos da região Sul do Brasil foi menor do que nos lagos intertropicais.

A evolução da TSA média anual nos lagos pode ser observada, porém seus resultados não indicaram tendência significativa. A disponibilidade e qualidade do produto MYD11A2 podem conter incertezas associadas a variações na resolução espacial, cobertura de nuvens ou erro de sensor, que pode dificultar a detecção de possíveis tendências. Além disso, o intervalo de 21 anos pode ser relativamente pequeno para afirmar sobre tendências, especialmente se houver ciclos de longo prazo de resfriamento ou aquecimento das águas. Os anos com extremos climáticos também devem ser considerados, uma vez que podem interferir nos resultados e mascarar tendências de longo prazo.

Por outro lado, um estudo recente conduzido em 3 lagos rasos costeiros do RS (Lagoa Mirim incluída), com base em 20 anos de dados MODIS, indicou tendências significativas ao longo do tempo com variações sazonais e anuais [5]. Suas descobertas apontaram tendência de aquecimento nas médias de TSA nos três lagos na primavera (0,5 ºC dec^{-1}) e com menor extensão no verão (0,3 ºC dec^{-1}), principalmente nos dados diurnos obtidos do satélite *Aqua*. Seus resultados divergem com os encontrados no presente estudo, o que pode ser atribuídos à metodologia distinta adotada pelos autores,

que utilizaram dados diários do MODIS e consideraram toda a área da LM em sua análise.

A diferença na TSA dos lagos analisados pode ser atribuída tanto a fatores naturais quanto a influências antrópicas. A latitude e longitude (efeitos de continentalidade e proximidade com o oceano), a morfometria dos lagos (forma, profundidade e volume) e a qualidade da água (turbidez e sólidos suspensos) são fatores que influenciam a radiação solar, a temperatura do ar, as chuvas e a velocidade do vento, e afetam diretamente a TSA [2, 3, 4, 7, 8]. Fenômenos climáticos como *El Niño* (períodos mais chuvosos no RS) e *La Niña* (períodos mais secos no RS) também devem ser considerados.

As mudanças do LULC no entorno dos lagos também podem influenciar na variação da TSA. Atividades agropecuárias, que expõe o solo a diferentes processos erosivos, bem como a urbanização, que transforma superfícies permeáveis em impermeáveis (efeito das ilhas de calor), podem alterar a temperatura da água devido ao escoamento térmico desses ambientes aquecidos [2, 3].

Uma pesquisa realizada em 11 lagos na bacia hidrográfica do Planalto Yunnan-Guizhou, China, detectou que as atividades antrópicas impactaram de forma ascendente e descendente a TSA [2]. Os autores destacaram que as intervenções humanas são importantes de serem consideradas em estudos futuros para discutir a necessidade de políticas de proteção do ambiente térmico dos lagos.

Ressalta-se que a série de dados obtida do *MODIS/Aqua* (1 km) reflete a TSA apenas nos pontos amostrais, que foram melhor distribuídos na LM do que no PR devido suas morfometrias. Ainda, mesmo que o MYD11A2 represente a TSA média de 8 dias, as cenas foram filtradas por inspeções visuais e com o auxílio de dados meteorológicos de estações próximas aos lagos, com a finalidade de evitar o uso de *pixels* comprometidos nos pontos amostrais.

5. CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisada a variação temporal da TSA em lagos naturais e artificiais do RS, a partir de uma série de 21 anos de dados MODIS/Aqua. Os resultados indicaram maiores TSAs no reservatório de Passo Real, localizado na região centro-norte do estado, em comparação à Lagoa Mirim, inserida sobre a planície costeira no extremo sul do estado. A diferença média da TSA destes lagos foi de 3,8 ºC.

Foi verificada a sazonalidade das TSAs médias diárias em ambas as áreas de estudo. Essa variação foi consistente com o padrão climático da região onde os lagos estão inseridos, com valores mais elevados na primavera e verão. A amplitude térmica entre os lagos foi menor em janeiro e fevereiro, que pode ser atribuída a radiação solar, velocidade do vento, forma e profundidade dos lagos. Neste período de 21 anos de dados não foi verificada tendência de variação significativa nas TSAs médias anuais, porém alguns picos foram observados e podem ser atribuídos a pulsos decenais de TSA e devem ser analisados em estudos futuros.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro fomentado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do RS (FAPERGS Nº 23/2551-0001947-7), pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ Nº 311977/2022-7/403696/2023-2), pela Itaipu Binacional e Itaipu Parquetec (convênio nº 4500071550/2023), pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) e pelo Laboratório de Geotecnologias (LABGEOTEC).

7. REFERÊNCIAS

[1] World Meteorological Organization (WMO). *The 2022 GCOS Implementation Plan (GCOS-244)*. WMO, Geneva, 2022.

[2] H. Duan, K. Yang, C. SHANG, X. Zhou and Y. Luo. Anthropogenic impact of lake surface water temperature of lakes: a case study of eleven lakes on the yunnan-guizhou plateau, *Ecological Indicators*, v. 165: pp. 112165, 2024.

[3] K. Yang, Z. Yu and Y. Luo. Analysis on driving factors of lake surface water temperature for major lakes in Yunnan-Guizhou Plateau, *Water Research*, v. 184: pp. 116018, 2020.

[4] G. Kramer and W. P. Filho. Análise da variação da temperatura de superfície do reservatório Passo Real-RS a partir de dados MODIS. *III - ELAAGFA*, v. 1: pp. 205–213, 2022.

[5] M. H. Tavares, M. A. Cardoso, D. M. Marques, M.-P. Bonnet, and C. R. Fragoso, Jr. High Spring Warming Rates in an Extensive Subtropical Shallow Lakes System Detected Using MODIS Imagery, *Acs Es&T Water*, v. 4: pp. 1518-1530, 2024.

[6] W. Pereira Filho, G. Kramer and R. Z. Ouriques. *Brazilian Lakes as Sentinels of Climate Change*, *ADV.ESCC*, v. 2: pp. 49-50, 2023.

[7] F. Wachholz. *Influência da bacia hidrográfica e características espaço-temporais de variáveis limnológicas sobre reservatórios no Rio Jacuí-RS*. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

[8] F. M. Breunig, W. Pereira filho, L. S. Galvão, F. Wachholz and M. A. G. Cardoso. Dynamics of limnological parameters in reservoirs: A case study in South Brazil using remote sensing and meteorological data, *Science of The Total Environment*, v. 574: pp. 253-263, 2017.

[9] M. S. Rossato. *Os climas do Rio Grande do Sul: variabilidade, tendências e tipologia*. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

[10] Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (ALM). *Bacia Hidrográfica Mirim – São Gonçalo (BHMSG)*. UFPEL, Pelotas, 2022.

[11] P. K. Sen. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63: pp. 1379-1389, 1968.