

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

COMBINANDO MODELO DE TEMPERATURA DA ÁGUA E SENSORIAMENTO REMOTO PARA ESTIMAR O EFEITO DA MUDANÇA CLIMÁTICA SOBRE A TEMPERATURA DA LAGOA MANGUEIRA-RS

Matheus Henrique Tavares¹; David da Motta Marques¹ & Carlos Ruberto Frago Jr.²

RESUMO – O objetivo deste trabalho foi utilizar o modelo *air2water*, calibrado apenas com dados de temperatura provenientes do sensor MODIS, para estimar o impacto da mudança climática na temperatura da lagoa Mangueira-RS. O período de estudo selecionado foi de 2001 a 2017, de acordo com a disponibilidade de dados do sensor. Após a calibração do modelo, quatro cenários de aumento da temperatura do ar (1-2°C) foram utilizados para se estimar o comportamento médio da temperatura da lagoa. Além disso, foi analisada a tendência da temperatura a partir das séries do ar (medida) e da lagoa (gerada pelo modelo) para o período utilizando o teste de Mann-Kendall. O modelo teve desempenho bastante satisfatório, com viés próximo a zero e REQM de 1,22°C para todo o período. A análise de tendência mostrou aumento de temperatura tanto do ar (0,053°C/ano) quanto da água (0,061°C/ano). Para os cenários futuros simulados, um aumento de 1°C e 2°C na temperatura do ar resultaram em aumento de 0,73°C e 1,48°C na temperatura da lagoa. Os resultados indicam que esta abordagem pode ser utilizada para análise de flutuações e tendências de séries, e análise simplificada de possíveis efeitos da mudança climática na temperatura de lagos sem dados medidos.

ABSTRACT – The purpose of this study was to use the model *air2water*, calibrated solely using temperature data provided by MODIS, to estimate the impact of climate change on the temperature of lake Mangueira-RS. The period of study was between 2001 and 2017, according to the sensor data availability. After the calibration, four scenarios of increases in air temperature (1-2°C) were used to estimate the average pattern of the lake's temperature. Additionally, the tendency of air (measured) and lake (derived by the model) temperatures in the period were analyzed using the Mann-Kendall test. The model had a satisfactory performance, with bias close to zero and RMSE of 1.22°C in the whole period. The tendency analysis showed increase for both air (0.053°C/year) and water (0.061°C/year) temperatures. For the simulated future scenarios, an increase of 1°C and 2°C in air temperature resulted in an increase of 0.73°C and 1.48°C in lake temperature. Our results indicate that this approach can be used to analyze variations e tendency in the series, and a simplified analysis of the possible effects of climate change on the temperature of lakes with no measured data.

Palavras-Chave – mudança climática; modelagem da temperatura; sensoriamento remoto.

1) Afiliação: Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, 91501-970, Caixa Postal – 15029; telefone: (51) 3308-6563; e-mails: tavaresmatheush@gmail.com; dmm@iph.ufrgs.br

2) Afiliação: Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Av. Lourival Melo Mota, S/N, Tabuleiro do Martins, Maceió, Alagoas, Brasil, 57072-900; telefone: (82) 3214-1605; e-mail: ruberto@ctec.ufal.br

INTRODUÇÃO

A temperatura é um parâmetro essencial na estrutura e funcionamento de lagos e reservatórios, por ser reguladora de muitos processos físicos, químicos e biológicos, como a produção primária e a distribuição de espécies (Horne e Goldman, 1994). O interesse em seu estudo cresceu devido à necessidade de se avaliar os impactos atuais e futuros da mudança climática. Estes impactos afetam estes corpos d'água de maneiras diferentes, a depender de características climáticas e geográficas (O'Reilly *et al.*, 2015). Por isso, o conhecimento da série histórica dos padrões da temperatura são importantes não apenas para se entender melhor cada corpo d'água, como também para fazer a previsão desta variável e auxiliar no entendimento e manejo de sistemas aquáticos.

Contudo, dados de temperatura são bastante escassos, com monitoramento em campo geralmente em poucos locais e infrequente. Como são necessárias séries de dados longas e consistentes para se analisar cada corpo d'água e avaliar sua tendência (Gray *et al.*, 2018), duas formas podem ser empregadas para contornar esta limitação: modelagem da temperatura e sensoriamento remoto. A modelagem da temperatura é feita estimando esta variável através de outras mais facilmente disponíveis, como variáveis meteorológicas ou hidrológicas, e apesar de o seu foco estar concentrado na modelagem de rios, há também modelos de lagos (Piccolroaz *et al.*, 2013). Utilizando sensoriamento remoto, as temperaturas são obtidas através de sensores termais (na faixa espectral do infravermelho termal) a bordo de satélites (Tavares *et al.*, 2019). Apesar destas estimativas terem acurácia inferior às medições de campo, elas possuem a vantagem de serem medidas espacializadas, limitadas apenas à resolução espacial do sensor, e de poderem ter longas séries temporais, a depender da data de lançamento e da resolução temporal do sensor.

Para estudos de possíveis impactos da mudança climática, contudo, as metodologias possuem limitações: enquanto a aquisição de dados por sensores remotos pode prover uma série de dados, é difícil fazer uma extrapolação destes valores para o futuro sem algum embasamento. Por outro lado, o uso de modelos de temperatura de lagos necessitam de uma série de dados de temperatura medida para a calibração do modelo no corpo d'água estudado (Piccolroaz *et al.*, 2018). Sendo assim, uma forma de se contornar estas limitações é o uso combinado de ambas ferramentas, de forma a prover uma série consistida para uma estimativa inicial do impacto do aumento temperatura do ar na temperatura de lagos e reservatórios com poucos ou nenhum dado medido. O objetivo deste trabalho é utilizar o modelo *air2water*, desenvolvido por Piccolroaz *et al.* (2013), calibrado apenas com dados de temperatura do sensor MODIS, para se fazer uma estimativa do impacto da mudança climática na lagoa Mangueira, no Rio Grande do Sul.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo e dados medidos

O estudo foi realizado na lagoa Mangueira, na região Sul do Brasil (Figura 1), próximo à divisa do Uruguai. Possui área de 820 km² e formato alongado, com 90 km de comprimento e de 3 a 10 km de largura, com profundidade média de 2,6 m e profundidade máxima de 6,9 m. O clima da região é subtropical, com temperatura média de 16°C e precipitação anual variando, em média, de 1.800 a 2.200 mm por ano (Kottek *et al.*, 2006).

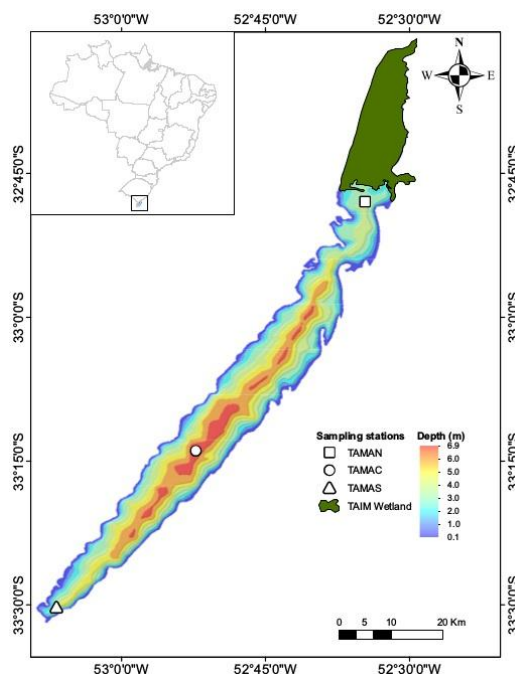


Figura 1 – Mapa da lagoa Mangueira, destacando as estações de monitoramento de qualidade da água.

O período de estudo está limitado à disponibilidade de dados de temperatura para a calibração do modelo. Neste caso, os dados são provenientes do sensor MODIS, a bordo do satélite Terra, que entrou em operação em fevereiro de 2000. Por isso, o período de estudo selecionado foi de 01-01-2001 a 31-12-2017. Aqui, optou-se por utilizar a parte Central da lagoa, por esta ser mais representativa da temperatura geral do lago. Apesar de a temperatura ser medida pelo sensor sempre às 10h30, hora local, considerou-se este valor como representativo da média diária desta variável. Para validação, os dados medidos na estação Central, com medições em média a cada 3 meses, iniciando em 2001, resultando em 65 dados, foram também utilizados. Os dados de temperatura média diária do ar são provenientes da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) Santa Vitória do Palmar (código 83997). Esta é a estação meteorológica mais próxima da área central da lagoa, distante cerca de 80 km da parte central da lagoa.

Produto MODIS – MOD11 LST

O sensor MODIS é um dos mais utilizados para este tipo de estimativa. Ele está a bordo do satélite Terra e possui duas bandas termais, com resolução espacial de 1000 m e resolução temporal de um dia. O sensor já foi validado na Lagoa Mangueira (Tavares *et al.*, 2019), e possui uma acurácia próxima a 1°C.

O MODIS possui produtos de temperatura de superfície continental (LST) já disponíveis para *download*. Aqui, foi utilizado o produto MOD11A1, que é o produto de LST diário. Este produto é pré-processado com a remoção de pixels contaminados por nuvens, e por isto é um produto final que pode ser diretamente usado. As imagens de LST foram baixadas da plataforma da NASA LAADS DAAC (disponível em <https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>) para o período de estudo. Então, a temperatura de superfície de cada data foi extraída considerando os 4 pixels que envolvem a área da estação Central, utilizando uma rotina desenvolvida em R.

Modelo de temperatura de lagos

O modelo de temperatura utilizado é o modelo híbrido *air2lake*, desenvolvido por Piccolroaz *et al.* (2013). Ele tem uma base física, fazendo uma série de simplificações da equação de trocas de energia do epilímnio, a camada superior do lago, com a atmosfera e com o hipolímnio, a camada mais profunda do lago. O modelo resulta em uma equação diferencial com 8 parâmetros que devem ser calibrados para um ponto do lago (o modelo não é espacializado), para o período de tempo estudado. Para cada passo de tempo, esta equação é integrada numericamente, e a calibração é feita utilizando um algoritmo de otimização para minimizar uma função-objetivo, calculada entre a temperatura da água medida e simulada. Para mais detalhes do modelo, referir ao trabalho de Piccolroaz *et al.* (2013).

Inicialmente, foi utilizada uma função para definir os limites físicos dos parâmetros do modelo, levando em consideração a profundidade média da lagoa, de 2,6 m. Então, o modelo foi rodado utilizando 2/3 dos dados para calibração (de 01-01-2001 a 31-12-2012) e 1/3 para validação (de 01-01-2013 a 13-12-2017). Foi utilizado o modelo em sua forma completa, com os 8 parâmetros, com o esquema Runge-Kutta de 4ª ordem para integração numérica, o PSO (Particle Swarm Optimisation) para otimização dos parâmetros e a raiz do erro quadrático médio (REQM) como função-objetivo.

Tendência das temperaturas

Com os dados de temperatura do ar e da água, foi utilizado o teste de tendência de Mann-Kendall para verificar se há uma tendência observada nestas séries. Para isto, foram calculadas as médias mensais da temperatura da água e do ar, considerando um limite de 3 falhas de dados para o cálculo, isto é, se o mês teve 3 ou mais falhas de dados, ele foi considerado falho. Como a série de dados de temperatura do MODIS possui muitas falhas, para a temperatura do ar foi utilizada a série de saída do modelo *air2water*, que possui falhas apenas nos dias em que há falhas na série de temperatura do ar. Além disso, como a série de temperatura do ar também apresenta muitas falhas, impedindo uma análise de tendência mais longa, o teste de Mann-Kendall foi aplicado apenas no mesmo período de 2002 a 2017. Para a aplicação do teste, foi feita a dessazonalização da série, subtraindo as médias mensais e dividindo pelo desvio-padrão de cada mês. Então, o teste foi aplicado de a estas séries, e para aumentar a confiança do método, foi utilizado um *bootstrap* com 1000 réplicas.

Cenários de mudança

Os cenários de mudança utilizados foram cenários simplificados, de forma a se obter valores médios de temperatura esperados na lagoa para estes cenários. Para se gerar estes cenários de temperatura do ar, foi considerada uma série de temperatura média para o período de 2002 a 2017, calculando a média da temperatura para cada dia do ano. Este cenário, chamado aqui de Controle, seria um comportamento médio da temperatura do ar na região, desconsiderando variações “aleatórias”, causadas por frentes frias ou quentes ou precipitação, por exemplo. Como pode ser observado na Figura 2, apesar desta série não refletir o comportamento diário desta variável durante um ano, ela compreende bem os valores mensais, sazonais e anuais da temperatura na região. Comparando os valores médios de temperatura do ar com os do ano de 2002, por exemplo, obteve-se valores de 17,11°C e 17,12°C, respectivamente. Para os cenários de mudança, foram considerados dois grupos: um de aumento de temperatura ao longo de todo o ano, e outro de aumento apenas nos meses de verão, considerados aqui como o período de Outubro a Março. Para os dois grupos, o aumento de temperatura foi aplicado de forma uniforme ao longo dos dias, isto é, o valor esperado de aumento foi somado a série de temperatura do ar de controle (toda a série ou apenas nos meses de verão), já que o objetivo é observar o comportamento médio da lagoa com estas mudanças. Estas séries foram, então, usados como entrada para o modelo de temperatura.

Dentre os cenários já utilizados para trabalhos na região, o trabalho de Fragoso Jr *et al.* (2011) utilizou o cenário A2 do relatório do IPCC para 2071–2100, o qual previa um aumento na temperatura de cerca de 3–4°C, bem distribuídos ao longo do ano, mas com maior amplitude no verão. No trabalho de Adam e Collischonn (2013), foi observado aumento de 1–2°C para a bacia do rio Ibicuí, na região oeste do Rio Grande do Sul, analisando diversos modelos climáticos de circulação geral, que foram rodados utilizando como base cenários de emissão do IPCC para 2050. Adotando estes cenários para mais curto prazo, aqui os cenários de aumento foram de 1°C e 2°C, para os dois grupos citados. A nomenclatura utilizada neste trabalho segue a Tabela 1.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Desempenho do modelo

O modelo teve um desempenho bastante satisfatório, com viés bem próximo a zero e REQM de 1,22°C para todo o período (Tabela 2). É interessante notar que o modelo mostrou o mesmo desempenho na calibração e validação, o que é importante porque demonstra que não houve perda de desempenho no período mais recente, que é mais quente, e indica uma consistência dos resultados gerados para os cenários futuros. Além disso, como observado na Figura 3, os dados de temperatura simulados pelo modelo se ajustam bem à reta dos dados medidos com o MODIS, com uma pequena

superestimação de temperaturas baixas e pequena subestimação de temperaturas altas. Com relação aos dados medidos, os resultados mostraram viés e REQM de $-1,04^{\circ}\text{C}$ e $1,48^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

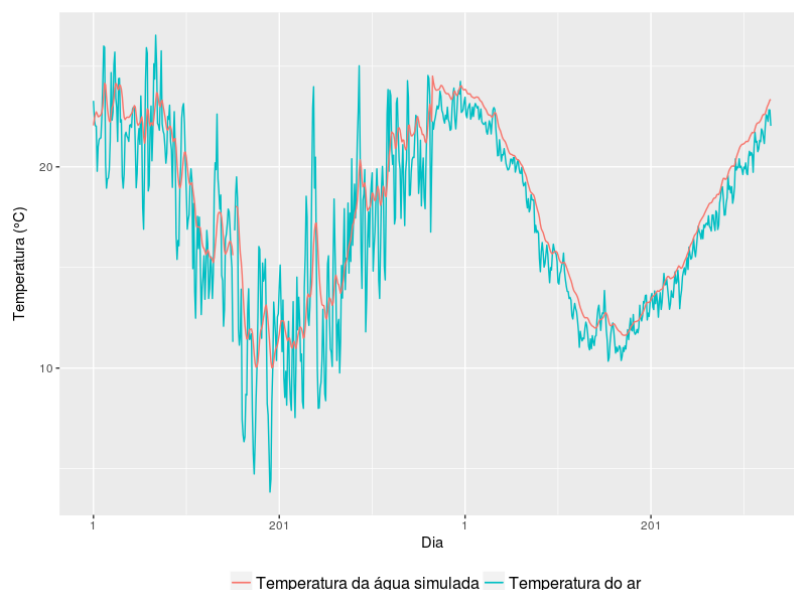


Figura 2 – Comparação da série de temperatura do ar e da água em 2002 (esquerda) e no cenário Controle.

Tabela 1 – Cenários de mudança utilizados neste trabalho.

Nome	Cenário
Controle	Valor médio da temperatura do ar de cada dia do período de 2002 a 2017
Cenário 1	Aumento de 1°C em todo o período em relação ao Controle
Cenário 2	Aumento de 2°C em todo o período em relação ao Controle
Cenário 3	Aumento de 1°C no verão em relação ao Controle
Cenário 4	Aumento de 2°C no verão em relação ao Controle

Tabela 2 – Valores das métricas calculadas entre as temperaturas simuladas pelo modelo e as medidas pelo MODIS.

Período	Viés ($^{\circ}\text{C}$)	Erro absoluto ($^{\circ}\text{C}$)	REQM ($^{\circ}\text{C}$)	NSE
Calibração	-0,01	0,93	1,21	0,93
Validação	0,08	0,95	1,25	0,92
Todo o período	0,02	0,93	1,22	0,92

Para todo o período simulado, a média da temperatura do ar foi de $17,14^{\circ}\text{C}$, da temperatura da água medida pelo MODIS, $17,94^{\circ}\text{C}$, e média da temperatura da água simulada pelo modelo *air2water* foi de $18,01^{\circ}\text{C}$. Se nota que que a lagoa tem uma temperatura, em média, superior à da temperatura do ar. Além disso, como se observa na Figura 4, na lagoa as amplitudes de temperatura são menores do que a do ar, principalmente nos meses mais frios, o que deve se deve às características físicas da água e uma resiliência da lagoa à frentes frias, comuns na região.

Tendência atual

Para o período de 2002 a 2017, se observou uma tendência de aumento de temperatura tanto do ar quanto da água (Figura 5). Para a temperatura do ar, se observa uma tendência de aumento de $0,053^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ (valor- $p < 0,01$), enquanto que para a temperatura da lagoa, se observa uma tendência de aumento de $0,061^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ (valor- $p < 0,01$). Nota-se que são tendências são bastante semelhantes,

mas que a temperatura da lagoa, que já é, na média, maior do que a do ar, mostrou tendência a aquecer ainda mais do que os acréscimos na temperatura do ar neste período.

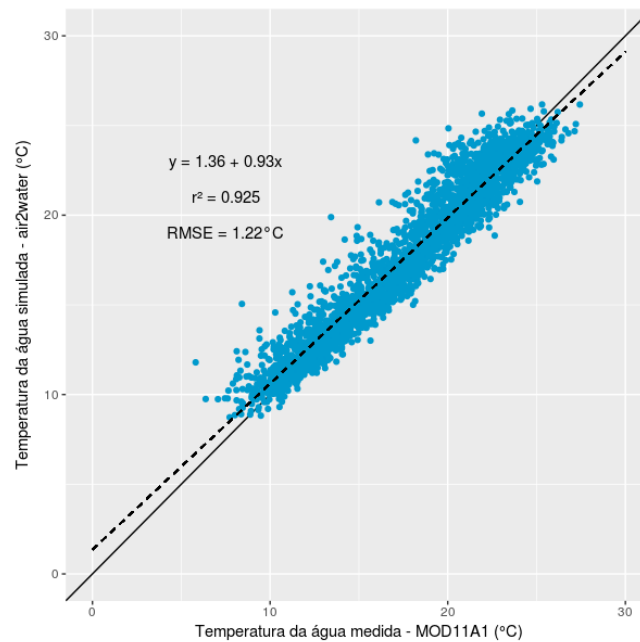


Figura 3 – Comparação dos valores de temperatura da água medidos pelo MODIS e simulados pelo modelo *air2water* para a lagoa Mangueira, no período entre 2002 e 2017.

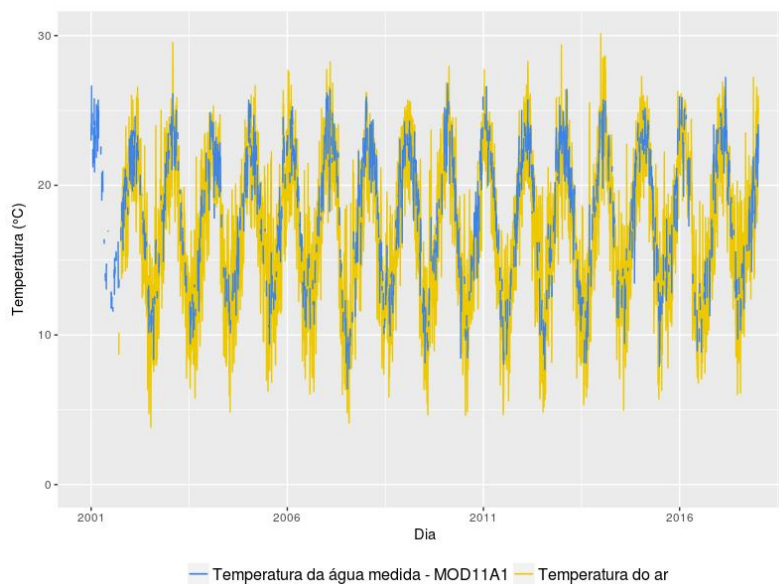


Figura 4 – Valores de temperatura do ar e da água para a lagoa Mangueira, no período entre 2002 e 2017.

Cenários futuros

Inicialmente, para se avaliar a consistência das séries de temperatura da lagoa simuladas, deve-se verificar se o modelo consegue reproduzir os padrões de temperatura do cenário de controle. Comparando os valores de temperatura simulada para o período de controle com os do ano de 2002, por exemplo, obteve-se uma média, respectivamente, de 17,85°C e 17,84°C para todo o período, 21,21°C e 21,20°C para o verão, e 14,28°C e 14,35°C para o inverno, ou seja, o cenário de controle pode funcionar como o comportamento médio da temperatura no período, e então os resultados dos

cenários futuros podem ser analisados como uma possível resposta média do sistema aquático às mudanças.

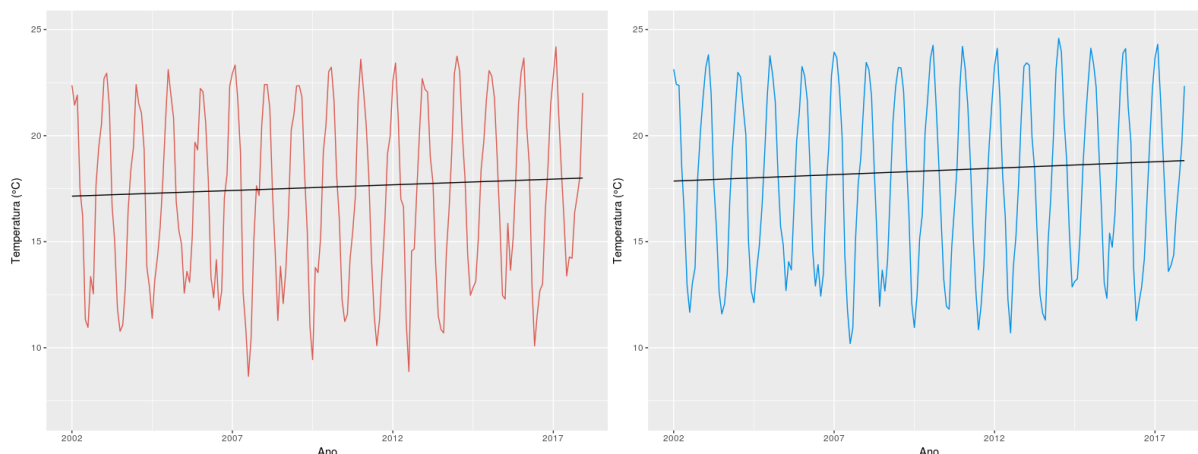


Figura 5 – Valores das médias mensais de temperatura do ar (esquerda) e da água (direita), com a tendência das séries entre 2002 e 2017, de $0,053^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para temperatura do ar, e de $0,061^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ para temperatura da lagoa.

Os resultados obtidos para cada cenário podem ser vistos na Tabela 3. O aumento de temperatura na lagoa é sempre menor do que o aumento da temperatura do ar, com diferença maior no verão do que no inverno. Nota-se que um aumento de 1°C na temperatura do ar resultou em um aumento de $0,73^{\circ}\text{C}$ na temperatura da lagoa, e um aumento de 2°C , em $1,48^{\circ}\text{C}$ na lagoa. Além disso, o comportamento exibido pela lagoa é indistinto de estações: o aumento de 2°C na temperatura do ar apenas no verão mostrou o mesmo efeito médio do que o aumento de 1°C em todo o período, isto é, um aumento de $0,73^{\circ}\text{C}$ na lagoa. Isto mostra uma certa resiliência da lagoa à variações da temperatura, que pode ser devido à seu grande tamanho e, portanto, grande inércia termal, indicando uma estabilidade do ecossistema frente a mudanças que poderão acontecer no clima da região.

Apesar das simplificações, os cenários simulados de temperatura parecem ser semelhantes aos simulados por Fragoso Jr. *et al.* (2011) para a lagoa Mangueira, em que o aumento de cerca de $3\text{--}4^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar resultou em um aumento de $1\text{--}2^{\circ}\text{C}$ na temperatura da lagoa, com maior amplitude no verão, embora haja grandes diferenças entre os cenários simulados e, portanto, esta comparação ser inconclusiva. Ressalta-se que a metodologia utilizada é bastante simplificada em relação à modelagem hidrodinâmica, utilizada no trabalho de Fragoso Jr. *et al.* (2011), com a limitação de não incluir muitas outras variáveis climatológicas que podem afetar a temperatura no lago, como precipitação, cobertura de nuvens e ventos, e a influencia de mudanças na bacia hidrográfica no ecossistema, além de modelar apenas a temperatura, enquanto que a modelagem ecológica também considera muitos parâmetros de qualidade da água e a produtividade do ecossistema. Além disso, questões como o aumento da temperatura máxima média da lagoa ou frentes quentes, que são importantes para a sobrevivência de espécies de peixes blooms de algas (Horne e

Goldman, 1994), por exemplo, não foram modeladas aqui. Contudo, isto pode ser feito utilizando esta abordagem, para se avaliar se o modelo consegue representar bem estes padrões.

Tabela 3 – Valores de temperatura da água simulados para os cenários de temperatura do ar

Cenário		T _{média} (°C)	T _{verão} (°C)	T _{inverno} (°C)
Controle	Ar	17,11	20,80	13,74
	Água	17,85	21,20	14,35
Cenário 1	Ar	18,12	21,38	14,74
	Água	18,58	21,92	15,10
Cenário 2	Ar	19,12	22,38	15,74
	Água	19,33	22,68	15,85
Cenário 3	Ar	17,67	21,38	13,74
	Água	18,21	21,92	14,35
Cenário 4	Ar	18,12	22,38	13,74
	Água	18,58	22,68	14,35

Apesar das limitações apresentadas, os resultados indicam que a abordagem empregada aqui pode ser utilizada para análise de flutuações e tendências de séries da temperatura de lagos sem dados medidos, já que para a construção das séries de temperatura da água podem ser utilizados dados das missões Landsat 5 em diante, com dados dos sensores termais de modo contínuo, a cada 16 dias, a partir de 1984. Uma análise inicial, mais simplificada, dos possíveis efeitos futuros da mudança climática na temperatura de lagos também pode ser feita, já que o método é facilmente aplicável e demanda muito menos dados e tempo de processamento do que modelos ecológicos, por exemplo.

CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi utilizado o modelo *air2water*, em conjunto com dados da temperatura da água medidos pelo sensor MODIS e dados de temperatura do ar de uma estação meteorológica, para se modelar a temperatura da água entre os anos de 2002 e 2017 e em alguns cenários futuros simplificados de mudança climática. O modelo teve um bom desempenho, simulando bem as temperaturas observadas pelo sensor, com REQM de 1,22°C. A série gerada permitiu a análise de tendência da série de temperatura da lagoa, que está aumentando a uma taxa de 0,061°C/ano, enquanto que a temperatura do ar na região mostrou uma tendência de aumento de 0,053°C/ano no período analisado.

Para os cenários de mudança a lagoa Mangueira mostrou resiliência frente às mudanças. Apesar de a lagoa ser, em média, mais quente do que o ar, ela tende a aquecer menos do que o mesmo, em que um aumento de 2°C na temperatura média do ar resultou em aumento de 1,48°C na média. Ressalta-se a simplicidade desta abordagem para análise de tendências de séries da temperatura de lagos com poucos ou nenhum dado medido, com uso de dados termais provenientes de sensoriamento remoto, para a construção das séries de temperatura da água, assim como para uma análise inicial, mais simplificada, para se estimar os efeitos de aumento de temperatura do ar na temperatura da água. Contudo, efeitos importantes da mudança climática não são levados em consideração, como

mudanças nos padrões de precipitação e aumento da incidência de eventos extremos de precipitação e temperatura. Além disso, destaca-se que os valores estimados de temperatura da água valem apenas para a superfície do lago, considerando que não há mudança significativa no seu regime de mistura.

Recomendamos testes desta abordagem em outros lagos com dados medidos de temperatura, de forma a fornecer maior embasamento para sua aplicação, uma avaliação da variação noturna da temperatura, que pode ser feita também utilizando dados da passagem noturna do MODIS, e uma comparação com uma técnica mais robusta para se fazer este tipo de análise, como modelos ecológicos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento, à Sebastião Piccolroaz e Marco Toffolon por disponibilizarem gratuitamente o modelo *air2water*, à NASA por disponibilizar gratuitamente os produtos do sensor MODIS, e ao INMET pelos dados meteorológicos, e à Hugo Cunha pela revisão deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K.N.; COLLISCHONN, W. (2013). “Análise dos impactos de mudanças climáticas nos regimes de precipitação e vazão na bacia hidrográfica do rio Ibicuí”. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 18(3), pp. 69–79.
- FRAGOSO JR, C R.; MOTTA-MARQUES, D.M.L.; FERREIRA, T.F.; JANSE, J.H.; VAN NES, E.H. (2011). “Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake”. *Environmental Modelling & Software* 26(11), pp. 1337–1348.
- GRAY, D.K.; HAMPTON, S.E.; O’REILLY, C.M.; SHARMA, S.; COHEN, R.S. (2018). “How do data collection and processing methods impact the accuracy of long-term trend estimation in lake surface-water temperatures?” *Limnology and Oceanography: Methods* 16(8), pp. 504–515.
- HORNE, A. J.; GOLDMAN, C. R. (1994). *Limnology*. McGraw-Hill, New York, 576 pp.
- KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. (2006). “World map of the Köppen-Geiger climate classification updated”. *Meteorologische Zeitschrift* 15(3), pp. 259–263.
- O’REILLY, C.M.; *et al.* (2015). “Rapid and highly variable warming of lake surface waters around the globe”. *Geophysical Research Letters* 42(24), pp. 10.773–10.781.
- PICCOLROAZ, S.; HEALEY, N.; LENTERS, J.; SCHLADOW, S.; HOOK, S.; SAHOO, G.; TOFFOLON, M. (2018). “On the predictability of lake surface temperature using air temperature in a changing climate: A case study for Lake Tahoe (USA)”. *Limnology & Oceanography* 63, pp. 243–261.
- PICCOLROAZ, S.; TOFFOLON, M.; MAJONE, B. (2013). “A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes”. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, pp. 3323–3338.
- TAVARES, M.H.; *et al.* (2019). “Comparison of methods to estimate lake-surface-water temperature using Landsat 7 ETM+ and MODIS imagery: case study of a large shallow subtropical lake in Southern Brazil”. *Water* 11(1), pp. 168.