

MODELO DE ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DA ÁGUA A PARTIR DE IMAGENS DO INFRAVERMELHO TERMAL NO RIO SÃO FRANCISCO VERDADEIRO, LAGO ITAIPU, PR

Gisieli Kramer¹, Patrícia Michele Trindade², Cristiano Niederaurer da Rosa³, Thomas Gabriel Binder⁴, Ademir de Cássio Machado Peransoni⁵ e Waterloo Pereira Filho⁶

^{1, 4, 5, 6} Universidade Federal de Santa Maria

Caixa Postal – CEP: 97.105-900 – Santa Maria - RS

gisieli@outlook.com.br; thomasgbinder@hotmail.com; ademirperansoni@unipampa.edu.br; waterloopf@gmail.com

^{2, 3} Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Caixa Postal – CEP: 91.501-970 – Porto Alegre - RS

patriciatrindade.sr@gmail.com; cristiano.nrd@gmail.com

RESUMO

O objetivo da presente pesquisa foi estimar a temperatura de superfície (TS) da água a partir de imagens *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), Landsat 8, no rio São Francisco Verdadeiro, Lago Itaipu, PR. Para tanto, utilizou-se 33 observações em campo e em imagens de satélite (banda 10 TIRS). O cálculo de TS das imagens foi realizado no complemento *Land Surface Temperature* (LST) no QGIS. A partir de regressão linear gerou-se um modelo para estimativa de temperatura de campo, sendo avaliado por seis indicadores. O modelo apresentou r^2 de 0,86 a um nível de confiança de 95%. Os resíduos apresentaram-se menores que 0,5°C em 72% dos dados, de 0,5°C a 1°C em 14% e maiores que 1°C em 14%. O resultado dos indicadores foram aceitáveis e o modelo foi considerado satisfatório para temperaturas entre 15°C a 25°C. Pode-se dizer que a TS da água pode ser estimada com o sensoriamento remoto.

Palavras-chave — TIRS, LST, Regressão linear, Monitoramento, Ecossistema hídrico.

ABSTRACT

The objective of the present study was to estimate the surface temperature (TS) of the water from Thermal Infrared Sensor (TIRS) images, Landsat 8, in the São Francisco true River, Itaipu Lake, PR. For this purpose, 33 field observations and satellite images (TIRS band 10) were used. The TS calculation of the images was performed in the Land Surface Temperature (LST) complement in the QGIS. From the linear regression, a model was generated to estimate the field temperature, being evaluated by six indicators. The model had r^2 of 0.86 at a confidence level of 95%. Residues were lower than 0.5 ° C in 72% of the data, from 0.5 ° C to 1 ° C in 14% and greater than 1 ° C in 14%. The results of the indicators were acceptable and the model was considered satisfactory for temperatures between 15 ° C and 25 ° C. It can be said that TS of water can be estimated with remote sensing.

Key words — TIRS, LST, Linear Regression, Monitoring, Water Ecosystem.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de dados de sensoriamento remoto para estimar a Temperatura de Superfície (TS) da água tem auferido avanços expressivos na comunidade científica [1] [2], ainda que incipientes no Brasil. O conjunto de dados advindos dos sensores *Operational Land Imager* (OLI) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) embarcados no satélite Landsat 8, integram parte do programa de tecnologias evolucionárias da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Algumas das vantagens da utilização destes dados deve-se a capacidade proeminente desses sensores em apresentar calibração radiométrica e geométrica melhorada e melhor desempenho sinal-ruído nas imagens. Ainda, mais praticidade na aquisição dos dados espaciais (especialmente naquelas avaliações de medidas atempadas), maior abrangência espacial e de baixo custo [3]. Nesse sentido, a temática apresenta um campo vasto para a apresentação de novas abordagens na estimativa de temperaturas em rios e lagos brasileiros.

Estudos evidenciaram que a dinâmica da temperatura da água de rios pode influenciar no habitat de peixes, regular a taxa de decomposição da matéria orgânica e dos níveis de oxigênio dissolvido, além de diversas outras reações químicas intrínsecas ao ecossistema hídrico [4] [5] [6]. Ainda, fontes de poluição térmica ou de atividades decorrentes da urbanização podem alterar a dinâmica natural da temperatura da água [7].

A inércia térmica da água apresenta estabilidade se comparada a temperatura do ar, no entanto, é indicado que os registros da TS da água sejam realizados em até duas horas da passagem do satélite a fim de alcançar estimativas que não ultrapassem $\pm 0,5$ ° C da medida real [2]. Nesse contexto, a hipótese desse estudo é de que a temperatura relativa de superfície da água pode ser estimada no compartimento aquático do rio São Francisco Verdadeiro (SFV), Lago Itaipu, PR, a partir de dados do sensor TIRS a bordo do satélite Landsat 8.

Diante disso, emerge a seguinte questão: considerando medidas de TS da água de até uma hora após a passagem do satélite Landsat 8 (TIRS) é possível gerar estimativas da TS da água com diferenças de $\pm 0,5$ °C dos valores reais? Assim, o estudo teve por objetivo estimar a TS da água de campo a partir de imagens TIRS (Landsat 8), no rio SFV, Lago Itaipu, PR.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados da TS de campo foram coletados em situ pela equipe da Itaipu, em 13 missões, com 13 pontos amostrais em cada missão, distribuídos ao longo do curso do rio SFV. O curso do rio apresenta uma superfície hídrica de aproximadamente 22,5 km², largura mínima de 0,2 km, largura máxima 1 km e 16 km de extensão (Figura 1).

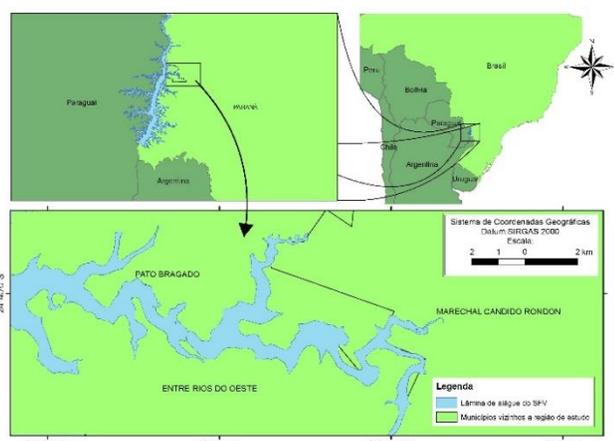


Figura 1. Localização do rio São Francisco Verdadeiro, Lago da Itaipu, PR

Na análise foram utilizadas efetivamente as missões 03 (09/08/2015), 06 (08/06/2016), 07 (11/08/2016), 08 (27/08/2016), 09 (28/09/2016), 11 (11/06/2017), 12 (13/07/2017) e 13 (29/07/2017) e os pontos amostrais correspondentes ao intervalo de registro entre 09:45 e 11:00 horas, resultando em 33 amostras. As missões com problemas na qualidade da imagem ou na logística de campo foram descartadas.

Para a geração das estimativas interpretou-se as imagens de satélite do Landsat 8, sensor OLI e TIRS, órbita/ponto 077/224, para cada ponto amostral, no dia das coletas dos dados de campo. O processamento digital das imagens foi realizado nos softwares Envi 5.4 e QGIS 2.14 [8].

Para o cálculo da TS foi utilizada a banda 10 do Landsat 8 TIRS, devidamente corrigida e em temperatura de brilho, obtida diretamente do site do *United States Geological Survey* (USGS). A TS em graus celsius (°C) foi obtida a partir da aplicação do complemento *Land Surface Temperature (LST)* desenvolvido por [9], disponível no software QGIS, a qual aplica apenas a correção da emissividade para estimar a TS. Ressalta-se, ainda, que a emissividade utilizada na ferramenta supracitada foi obtida a partir da metodologia

desenvolvida por [10] a qual relaciona a emissividade com o NDVI.

Para verificar a relação entre os dados estimados (em imagens) e o observado (em campo) gerou-se um modelo de regressão linear [5] [11] com 60% das amostras (de distribuição normal, selecionadas aleatoriamente e de forma uniforme). Sequencialmente foi realizada a validação do modelo com os outros 40% das amostras.

A fim de avaliar estatisticamente o desempenho do modelo, o conjunto de amostras da validação foi submetida a testes de comparação entre o estimado e observado mediante os seguintes indicadores: coeficiente de correlação (r); coeficiente de determinação (R^2); teste F; índice de Willmott (d); coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE); erro médio absoluto (EMA) e raiz do erro médio quadrático (REMQU) [11].

O coeficiente de correlação de Pearson é uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas. E quanto mais próximos de 1, melhor o desempenho de correlação das variáveis [11].

O índice de Willmott (d) indica o grau de concordância do modelo [12], com valores que variam de zero a 1, para nenhuma concordância e concordância perfeita, respectivamente. Valores de d acima de 0,75 são considerados satisfatórios. O coeficiente de Nash e Sutcliffe (NSE) [13] é um critério estatístico importante para avaliar a precisão de modelos [14]. Quanto mais próximo do 1, melhor o modelo. O erro médio absoluto (EMA) é definido como sendo a diferença entre a previsão e a observação, dividida pelo número de observações. Quando uma previsão for perfeita o EMA será igual a zero [11]. A raiz do erro médio quadrático (REMQU) indica o grau de similaridade entre os dados medidos e os estimados usando os modelos, sendo o valor ideal igual a zero [11].

3. RESULTADOS

Para a estimar o valor da variável condicional (TS de campo) o modelo de regressão linear apresentou coeficiente de determinação 0,86 a um nível de confiança de 95%. Nesse sentido, dado o conjunto de 21 amostras (60%) pareadas e aleatórias da TS em campo e TS na imagem pode-se afirmar que o modelo apresentou um ajuste forte (Figura 2).

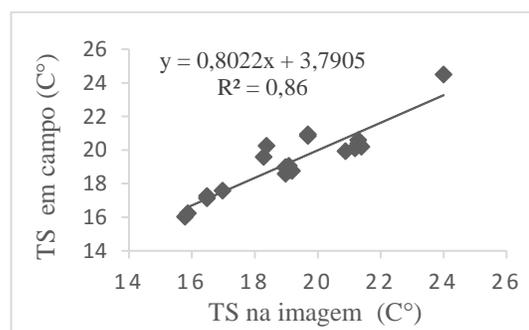


Figura 2. Modelo para estimar a Temperatura de Superfície (TS) do campo a partir da imagem de satélite pelo método Planck

Sequencialmente gerou-se o gráfico dos resíduos dado a diferença entre a variável resposta observada e a variável estimada. Nesse sentido, observou-se que não ocorre um aumento sistemático evidente conforme o aumento ou diminuição da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) medida em campo. Nota-se, ainda, que os resíduos são distribuídos aleatoriamente próximos do zero e entre $-0,7$ e $1,7$. A maior parte da amostra dos resíduos (72%) concentra valores menores ou igual a $0,5^{\circ}\text{C}$, de modo que 14% apontam valores entre $0,5^{\circ}\text{C}$ e 1°C e 14% acima de 1°C (Figura 3).

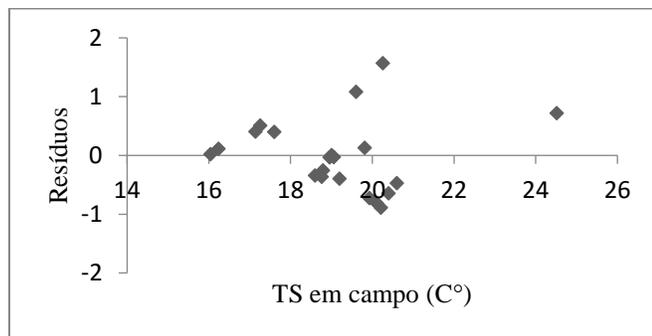


Figura 3. Dispersão entre os resíduos e a Temperatura de Superfície (TS) medida em campo

Para validar o modelo de regressão aplicou-se a fórmula no restante das amostras pareadas e aleatórias (40%). Desse modo, obteve-se um desempenho forte para o R^2 e moderado para o r . Em relação ao Índice de Willmott (d), o desempenho e concordância do modelo foi satisfatório ($d=0,87$). Para o NSE o desempenho e precisão do modelo foi considerado muito bom (0,83 está próximo de 1).

EMA e REMQ mostraram-se relativamente baixos com os resíduos distribuídos aleatoriamente próximos do zero e entre $-1,2$ e $1,4$. Nesse sentido, os valores de TS da água em campo foram subestimadas em 58% e superestimadas em 42% das amostras (Figura 4).

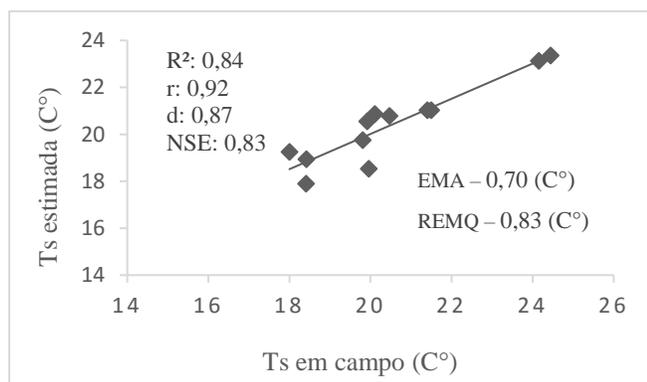


Figura 4. Validação do modelo para estimar a Temperatura de Superfície (TS) do campo a partir da imagem de satélite

4. DISCUSSÃO

Caracterizando a qualidade das águas do reservatório Orós no Ceará [11] encontraram modelos que resultaram em Índices de Willmott (d) = 0,79, 0,89, 0,68 e 0,53; e Coeficientes de Nash e Sutcliffe (NSE) = 0,42, 0,81, 0,44 e 0,76. Nesse sentido, o resultado de concordância e precisão do modelo de estimativa de temperatura de superfície da água gerado nesse trabalho apresentou um bom desempenho ($d=0,87$ e $NSE=0,83$). O EMA encontrado de $0,7^{\circ}\text{C}$ pode ser considerado aceitável dado o objetivo desse trabalho, pois 72% das amostras do modelo concentraram valores menores ou iguais a $0,5^{\circ}\text{C}$.

O modelo estatístico gerado apresentou desempenho aceitável mediante os índices aplicados (em um intervalo de 15°C a 25°C). Ainda, a um nível de significância estatística de 0,05 os dados de TS medidos em campo e estimados na imagem de satélite podem ser quantificados remotamente. No entanto, apresentam algumas limitações e melhoramentos.

As imagens do Infravermelho Termal registram apenas a temperatura de superfície da água haja vista a existência de processos complexos de mistura na coluna da água. Para amostras mais representativas o ideal que a água da superfície fosse bem misturada (os ventos contribuem para esse processo) [15] [16] [2]. No cenário modelado, registros de valores da temperatura em profundidade na coluna da água apresentariam afirmações mais assertivas sobre a precisão do modelo.

A temperatura da água passa por transições de ganhos e perdas de energia ao longo do dia a medida que o ângulo de elevação do sol muda. Nesse sentido, o ideal que as coletas das amostras e o registro de sua temperatura ocorra o mais próximo possível do tempo da passagem do satélite. Assim, as observações em campo devem ser inferiores a $\pm 1^{\circ}\text{C}$ da imagem em um intervalo de registro de até 4 horas [2]. Neste contexto, o modelo gerado poderá ter um melhor ajuste se os registros ocorrerem mais próximos da passagem do satélite.

Outro importante aspecto é a questão da escala espacial do sensor uma vez que a combinação da largura do rio e do tamanho do pixel proporcionarão distinções entre o rio e os bancos de materiais, logo, resultará nos níveis desejados de precisão e exatidão [2]. No entanto, a área de estudo do rio São Francisco Verdadeiro apresenta largura do rio aceitável para o sensor TIRS e dados *in situ* que ajudam na aferição das respostas da imagem. Além disso, o Landsat 8 apresenta desempenho radiométrico e geométrico melhorado. Por outro lado, não se exclui a possibilidade de obter melhor exatidão com sensores de alta resolução e melhor precisão com a repetitividade dos registros [3].

5. CONCLUSÕES

A qualidade da água de rios e lagos pode ser afetada pela variação de uma série de elementos limnológicos quando a Temperatura de Superfície (TS) da água é alterada. Pesquisas

que envolvem estimativas e previsões a partir de imagens na banda do infravermelho termal ainda são incipientes no Brasil. Adicionalmente, identificar e analisar a temperatura das águas por meio de imagens desse instrumento apresenta-se como uma das abordagens que eficientemente identificam cenários e mostram correlação significativa com a realidade. Nesse sentido, o sensor TIRS apresentou resultados preliminares satisfatórios na área de estudo, pois o modelo teve no geral uma boa precisão. Além disso, a validação do modelo revelou bom desempenho já que os indicadores apresentaram valores consideráveis.

Indubitavelmente, o modelo gerado pode ser melhorado sob diversos aspectos: a) expansão da frequência amostral (aumento do n); b) sazonalidade dos dados (para as quatro estações do ano); c) registros de temperatura da água no ambiente lântico do Lago da Itaipu (recorte espacial maior e distinto); d) a aplicação de outros métodos de estimativas de temperatura de superfície; e) registros de temperatura da coluna da água (estratificação térmica); e f) utilização de sensores com melhor resolução espacial.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e da CAPES/FAPERGS - Nº Processo: 8888.162068/2017-00 (Bolsa de Doutorado em Geografia pela Universidade Federal de Santa Maria). Especial agradecimento a Itaipu Binacional pela geração e disponibilização dos dados desse estudo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Raphael, J.M. (1962) Prediction of Temperature in Rivers and Reservoirs. **Journal of the Power Division**, 88, 157-181.
- [2] Handcoc, R. N. et al. Thermal Infrared Remote Sensing of Water Temperature in Riverine Landscapes. **Fluvial Remote Sensing for Science and Management**, 85-113, 2012.
- [3] United States Geological Survey (USGS). Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 5 set. 2018.
- [4] Hébert, C. Predicting Hourly Stream Temperatures Using the Equilibrium Temperature Model. **Journal of Water Resource and Protection**, 2015, 7, 322-338.
- [5] Deas, M. L. e Lowney, C. L. Water Temperature Modeling Review. **Califórnia Water Modeling Forum**, 1-113, 2000.
- [6] Bradley, A.A., Holly, F.M., Walker, W.K. and Wright, S.A. (1998) Estimation of Water Temperature Exceedance Probabilities Using Thermo-Hydrodynamic Modeling. **Journal of the American Water Association**, 34, 467-480
- [7] Kinouchi, T., Yagi, H. and Miyamoto, M. (2007) Increase in Stream Temperature Related to Anthropogenic Heat Input from Urban Wastewater. **Journal of Hydrology**, 335, 78-88. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.11.002>.
- [8] Trindade, P. M. T.; Saldanha, D. L.; Pereira Filho, W. Utilização do infravermelho termal na análise espaço temporal da temperatura de superfície e ilhas de calor urbanas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v.69, n. 4, p. 837-855, 2017.
- [9] Ndossi, M. I.; Avdan, U. Application of Open Source Coding Technologies in the Production of Land Surface Temperature (LST) Maps from Landsat: a PyQGIS Plugin. **Remote Sensing**, v. 8, n. 5, 2016.
- [10] Van de Griend, A. A.; Owe, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal Remote Sensing**, v. 14, p. 1119 – 1131, 1993.
- [11] Lopes, F. B.; Barbosa, C. C. F.; Novo, E. M. L.; Andrade, E. M.; Chaves, L. C. G. Modelagem da qualidade das águas a partir de sensoriamento remoto hiperespectral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 13 – 19, 2014.
- [12] Willmott, C. J.; Ackleson, S. G.; Davis, R. E.; Feddema, J. J.; Klink, K. M.; Legates, D. R.; Rowe, C. M.; O'donnell, J. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, v.90, p.8995-9005, 1985.
- [13] Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V.: River flow forecasting through conceptual models, Part I - A discussion of principles, **Journal of Hydrology**, v.10, p.282-290, 1970.
- [14] Machado, R. E.; Vettorazzi, C. A.; Cruciani, D. E. Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.8, p.147-155, 2003.
- [15] Torgersen, C.E., Faux, R.N., McIntosh, B.A., Poage, N.J., and Norton, D.J. (2001). Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. **Remote Sensing of Environment**, 76, 386–398.
- [16] Jessup, A.T., Zappa, C.J., Loewen, M.R., and Hesany, V. (1997). Infrared remote sensing of breaking waves. **Nature**, 385(6611), 52–55.