



AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE DA ÁGUA EM UM RESERVATÓRIO ARTIFICIAL NO RECÔNCAVO DA BAHIA: MEDIÇÃO E ESTIMATIVA

T. K. S. Borges¹, A. S. Oliveira², N. D. Silva³, J. P. C. Couto⁴

RESUMO: O número de moléculas que se depreendem no processo de evaporação é determinado por alguns fatores, dentre os quais está a temperatura da superfície (T_{sw}). Assim, determinações incoerentes de T_{sw} podem ocasionar uma evaporação não representativa do corpo hídrico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a medição da temperatura da superfície da água de um reservatório artificial, por três métodos distintos, como também avaliar a influência das variações climáticas no seu comportamento. A pesquisa foi conduzida em um reservatório de uma Fazenda localizada no município de Governador Mangabeira-BA (12°37' S; 39°03' W; 218 m). Uma estação meteorológica automática foi instalada ao lado do reservatório para o monitoramento durante o período de 11/07/2015 a 09/10/2015. Os sensores foram instalados em uma plataforma flutuante de baixo custo. Como os dados não seguiram distribuição normal, ou seja, foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, para todas as variáveis, então, a correlação de Spearman foi a mais indicada. Notou-se de maneira geral, uma correlação significativa a 1% de probabilidade entre os métodos, e também que houve influência das condições atmosféricas na T_{sw} .

PALAVRAS-CHAVE: saldo radiômetro, termopar, termômetro infravermelho

EVALUATION OF WATER SURFACE TEMPERATURE IN AN ARTIFICIAL RESERVOIR AT BAHIA'S RECONCILIATION: MEASUREMENT AND ESTIMATION

ABSTRACT: The number of molecules that appear in the evaporation process is determined by some factors, among which is the surface temperature (T_{sw}). Thus, incoherent determinations of T_{sw} may cause unrepresentative evaporation of the water body. In this context, the objective

¹ Doutoranda em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas - Bahia. Profª do IF-Sertão Pernambucano. E-mail: tatyana_kayty@yahoo.com.br /tatyana.borges@ifsertao-pe.edu.br

² Professor, UFRB Cruz das Almas - Bahia. E-mail: aureo@ufrb.edu.br

³ Doutorando em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas, Bahia. E-mail: neylon_duart@hotmail.com

⁴ Mestre em Engenharia Agrícola, UFRB, Cruz das Almas, Bahia. E-mail: jpauloengagro@gmail.com

of this work was to measure the water surface temperature of an artificial reservoir by three different methods, as well as to evaluate the influence of climatic variations on its behavior. The research was conducted in one reservoir of the Fazenda that is owned by DANCO, located in the municipality of Governador Mangabeira - BA (12° 37 'S, 39° 03' W; 218 m). These sensors were installed on a low-cost floating platform. An automatic weather station was installed next to the reservoir for the monitoring of the meteorological variables during the period from 07/11/2015 to 09/10/2015. As the data did not follow normal distribution, ie, they were significant at 1% probability by the Kolgomorov-Smirnov test, for all variables, so the Spearman correlation was the most indicated. A significant correlation was observed at 1% probability between the methods, and also that there was influence of the atmospheric conditions in T_{sw} .

KEYWORDS: balance radiometer, thermocouple, infrared thermometer

INTRODUÇÃO

A temperatura da superfície da água (T_s) é considerada um parâmetro físico imprescindível para compreensão da dinâmica dos processos e fluxos que ocorrem entre a atmosfera e a superfície da água (Alcântara et al., 2011). Pelo fato da diferença de temperatura que existe entre a água e o ar, controlar a troca de energia entre um lago e a atmosfera (Piccolroaz et al., 2013), como também provocar modificações na composição química e biológica do ecossistema desse lago (Kirillin, 2010).

Esse regime térmico da água possui várias aplicações práticas, como por exemplo: regular a temperatura do ambiente, auxiliar em estudos de pesca, clima, previsão do tempo, investigação oceanográfica, operações militares, bem como influenciar nas variações da umidade relativa (Alvera-Azcárate et al., 2011; Donlon et al., 2008; Donlon & Robinson, 1997).

Estudos detalhados sobre a temperatura da camada superficial de um lago (epilímnio), de acordo com Piccolroaz et al. (2013) são desafiadores e podem ser limitados pela ausência de informações de variáveis atmosféricas de fácil obtenção. Considerando-se que, para uma análise mais adequada sobre as oscilações na T_s da água requerer a disponibilidade de séries temporais desses dados ao longo do dia, para avaliar como cada uma das variáveis ambientais atuam sobre seu comportamento.

Geralmente, a determinação da T_s pode ser realizada via medição por contato (método direto) ou sem contato (método indireto). Esses métodos foram testados por Konda et al. (1994)

na Baía de Tanabe, no Japão e por Davies et al. (1971) no lago Ontário, no Canadá. No método direto, é necessário que o sensor entre em contato físico com o alvo e, a troca de energia para medição da temperatura ocorra por condução térmica. No entanto, no método indireto, a transmissão da energia ocorre por radiação. A seleção do método a ser empregado depende da acessibilidade dos dados atmosféricos e da disponibilidade dos sensores.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi realizar a medição da temperatura da superfície da água por três métodos distintos, como também a avaliar a influência das variações climáticas no seu comportamento.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Fazenda Santo Antônio, propriedade da empresa Danco Indústria e Comércio de Fumos Ltda., localizado no município de Governador Mangabeira-BA (12°37' S, 39°03' W, 220). Na Fazenda, irriga-se um tipo especial de fumo (*Nicotiana tabacum* L.) denominado Sumatra para exportação. A água é proveniente de um açude e passar por dois processos de tratamento (filtração e osmose reversa), com a finalidade de retirar impurezas sólidas (orgânicas e inorgânicas), principalmente sais de cloro.

Após o tratamento essa água com baixa turbidez (3 NTU) é armazenada em reservatórios artificiais escavados com seções trapezoidais e tamanhos distintos, revestidos com geomembrana de polietileno preto e 2 mm de espessura. O reservatório utilizado possui as seguintes dimensões: 5,8 m de profundidade média, 85 m de comprimento na direção N-S e 35 m de largura na direção L-O. No fundo, as dimensões aproximadas são 69 m de comprimento e 20 m de largura. Estas dimensões resultam em paredes com inclinação aproximada de 55°. O clima na região é do tipo Am, caracterizado por bosque chuvoso quente e úmido, conforme a classificação de Koppen, com temperatura média de 25 °C. A precipitação média anual é de 1150 mm, com 65% de UR, velocidade do vento média de 2,5 m, com direção predominante no setor sudeste.

Três métodos foram utilizados para determinar a T_s no reservatório, tais como: No método M1 (contato direto), utilizaram-se dois termopares tipo T (cobre-constantan) de 10 cm de comprimento com a junção de medição localizada na ponta do sensor. Cada termopar foi posicionado na vertical, na parte central de uma placa de isopor flutuante (50 cm x 50 cm x 2,5 cm). O termopar foi inserido na placa de maneira a atravessá-la ficando o termopar apenas 1 mm abaixo do lado inferior da placa em contato com a água. Tubos de PVC de 15 cm de comprimento e 25 mm de diâmetro também inseridos na placa foram utilizados como suporte

para manter os termopares na vertical, bem como protegê-los da radiação solar direta. Em uma das placas de isopor foram feitos orifícios com o mesmo diâmetro do tubo de PVC (total de 56 orifícios), com a finalidade de favorecer o processo de evaporação da água. Um terceiro termopar foi instalado horizontalmente, dentro da placa de isopor não-vazada, para medição da temperatura do isopor.

No método M2 a T_s foi determinada de maneira indireta por meio de um radiômetro infravermelho (*modelo SI-111, Apogee Instruments, Logan, UT, USA*), usualmente denominado de termômetro infravermelho. O SI-111 é um radiômetro de precisão composto por uma termopilha e um termistor. O termistor mede a temperatura do próprio sensor. O radiômetro SI-111 considera que o alvo é um corpo negro, e portanto, a temperatura radiométrica fornecida pelo sensor assume para o alvo emissividade igual a 1. Como as superfícies naturais em geral não se comportam como corpo negro, então o fluxo de radiação termal ao nível do sensor é formado por radiação emitida somada à radiação termal refletida pela superfície, conforme a Eq. (1).

$$L_t = L_{es} + L_{rs} \quad (1)$$

Em que: L_t = radiação de onda longa total ao nível do sensor oriunda do alvo; L_{es} = radiação de onda emitida pela superfície e L_{rs} = radiação de onda longa refletida pela superfície. Desenvolvendo a eq. (1) tem-se:

$$\sigma T_r^4 = \varepsilon_s \sigma T_s^4 + (1 - \varepsilon_s) L_i \quad (2)$$

Em que: T_r = temperatura radiométrica (K), σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), ε_s = emissividade da superfície da água (adimensional), considerou-se esse valor constante (0,980), T_s = temperatura "verdadeira" da superfície da água (K) e L_i = radiação de onda longa atmosférica incidente. Resolvendo a eq. (2) para T_s tem-se:

$$T_s = \left(\frac{\sigma T_r^4 - (1 - \varepsilon_s) L_i}{\varepsilon_s \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Na equação 3, como se vê, a contribuição da radiação de onda longa refletida é subtraída do total que alcança o sensor. A não correção para emissividade superestima a temperatura da superfície, ao se assumir $T_r = T_s$. O valor de L_i na equação 3 foi obtido por meio do pirgeômetro de radiômetro líquido de quatro componentes, modelo CNR4 (*Kipp & Zonen B.V., Delft, The Netherlands*).

O método M3 é semelhante ao M2, à diferença é que ao invés de radiômetro infravermelho utiliza-se um pirgeômetro para medição da radiação de onda longa total (L_t)

oriunda da superfície e, outro pirgeômetro para medir a radiação atmosférica incidente (L_i). Para obtenção de L_t e L_i o saldo radiômetro CNR4 foi utilizado. Além dos pirgeômetros, o CNR4 também é equipado com um par de piranômetros para medição da radiação solar incidente e radiação solar refletida pela superfície. A medição da temperatura interna é necessária para correção do sinal gerado pelos sensores de onda longa (OL), já que o próprio sensor é também uma fonte emissora deste tipo de radiação. Também baseado na lei de Stefan-Boltzmann, a OL medida pelo pirgeômetro da face inferior do CNR4 (L_i) expressa o somatório da OL incidente e OL refletida, conforme as equações 1 e 2. A temperatura da superfície T_s é calculada substituindo σT_r^4 por L_t na equação 3, como se segue:

$$T_s = \left(\frac{L_t - (1 - \varepsilon_s)L_i}{\varepsilon_s \sigma} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Para coleta de dados sobre o espelho d'água do reservatório artificial, foi desenvolvida uma plataforma flutuante artesanal (PF) com base de madeira e tubos de PVC. Detalhes da confecção e operação da PF podem ser observados no trabalho de Borges et al. (2016). Além disso, uma estação meteorológica automática foi instalada ao lado do reservatório, para o monitoramento das variáveis meteorológicas, durante o período de 11/07/2015 a 09/10/2015. Os dados foram submetidos à análise de estatística descritiva, teste de normalidade, correlação de Spearman com o auxílio do programa SAS – *Statistical Analytical System* (SAS, 1998). Para comparação entre os métodos na determinação da T_s foi realizada regressão simples.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 representa o erro absoluto da T_s da água medida pelos dois termopares das placas de isopor vazada (TPIV) e não vazada (TPINV), durante o período de 11/07/2015 a 05/08/2015. Os maiores erros estão associados entre as temperaturas de 24°C e 26°C, com um pequeno decréscimo a partir de 25°C. O erro absoluto variou entre -0,64 a 1,44 para todo intervalo de dados, com 95,47% dos valores concentrados entre -0,3°C e 0,2°C. O desvio-padrão de todas as medições para os dois termopares das duas placas de isopor foi de 0,5°C.

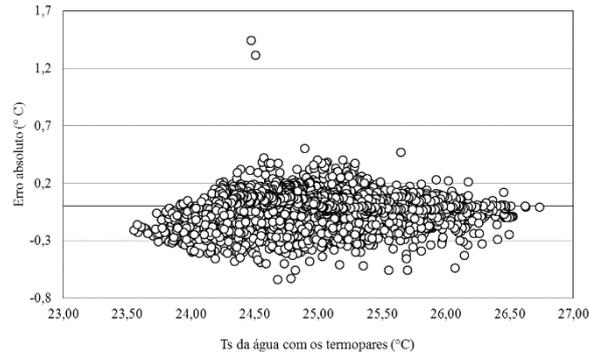


Figura 1. Erro absoluto da Ts da água entre os termopares dos flutuadores (placas de isopor) em função da média.

A Figura 2 mostra a comparação das medições de Ts da água (°C) obtidas TPIV e TPINV (medição por contato, método1) a partir de leituras realizadas a cada 5 min, para o período de 11/07/2015 a 01/10/2015.

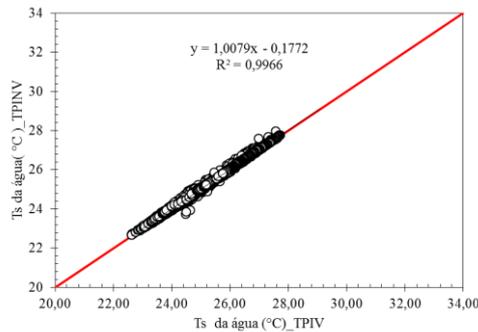


Figura 2. Regressão linear dos dados de Ts da água medidos pelos dois termopares das placas de isopor vazada (TPIV) e não vazada (TPINV) no reservatório artificial.

Verifica-se que ambos os sensores apresentaram um bom desempenho, uma vez que as leituras foram muito próximas entre esses dois sensores, correspondendo a um ajuste satisfatório do modelo. O coeficiente linear próximo de zero, coeficiente angular em torno de 1 e o coeficiente de determinação (r^2) representa o grau de concordância entre os dados, que para esses dois termopares foi considerado alto, com valor acima de 0,99. No método da Ts da água por contato, uma das placas de isopor foi vazada com a finalidade de favorecer o processo de evaporação, porém, observou-se que, não houve diferença nas medições, independente da placa de isopor ser vazada ou não. Os resultados indicam que o aquecimento do isopor (vazado ou não), não interferiu nas leituras dos termopares, visto que há concordância entre os valores dos sensores e uma divergência com a temperatura do isopor.

No período diurno, a Tar e do isopor tendem a aumentar de valor no decorrer do dia, desde o nascer do sol até atingir seu valor máximo, em torno da passagem meridiana do sol (meio dia solar), diminuindo novamente no final à tarde. Varejão-Silva (2005) comenta que o movimento aparente do sol (variação da radiação solar incidente com ou sem nuvem) é a

principal causa da acentuada variação diária da temperatura do ar. Por outro lado, no período noturno, verifica-se que a T_s é superior a T_{ar} e do isopor, já que não há radiação solar para absorverem calor. Tanto a temperatura da placa de isopor como a T_{ar} ocorre um decréscimo e atingem valores mínimos durante a noite. Alcântara et al. (2011) verificaram que a variabilidade da média mensal da T_s diurna foi superior a noturna, baseados em imagens de satélite do reservatório de Itumbiara-GO, Brasil. Esse estudo comprovou também que, ao correlacionar os fluxos de calor com a T_s , a radiação de onda curta explicou 89% da variação da temperatura durante o dia; enquanto que a noite, a onda longa, fluxo de calor sensível e latente explicam 94%.

Na água, a variação da temperatura é menor por causa de suas propriedades, pois a mesma consegue absorver calor, devido sua alta capacidade calórica que é 3500 vezes maior que a do ar. A elevada capacidade de calor da água associada com a troca de calor vertical eficaz possibilita elevado potencial de armazenamento de calor em lagos (Nordbo et al. 2011).

A Figura 3 corresponde à variação dos valores da T_s da água monitorada pelos TPIV e TPINV (método 1), como também da T_{ar} e do isopor durante três dias. Verifica-se que no dia 01/08/2015 houve uma redução brusca na T_{ar} e na temperatura do isopor, possivelmente por causa da menor incidência da radiação solar ($93,91 \text{ W m}^{-2}$), com maior presença de nebulosidade. Durante o dia, o ar cede calor para água, depois a um momento de inversão térmica em que a água cede calor para o ar. A perda de onda longa é contínua durante a noite, então a temperatura diminui.

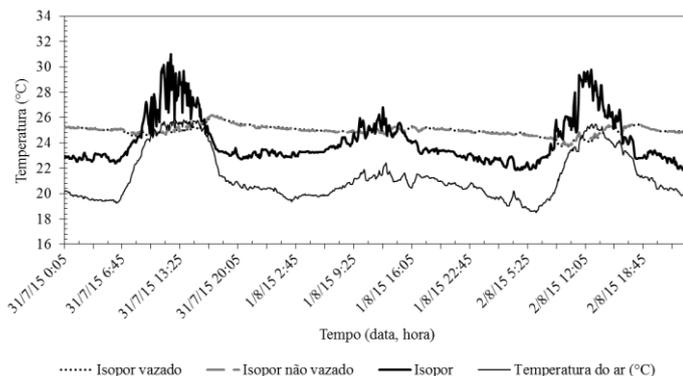


Figura 3. Variação temporal da temperatura da superfície hídrica nas duas placas de isopor, temperatura da placa de isopor e temperatura do ar.

As regressões lineares entre os dados de T_s da água determinados por meio das leituras direta (método 1) e indireta (métodos 2 e 3), para o período de 11/07/2015 a 01/10/2015 são representados na Figura 4.

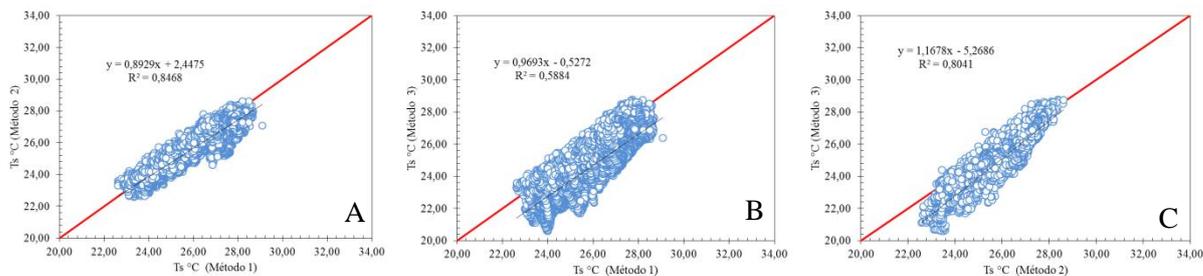


Figura 4. Regressões lineares dos dados de T_s da água determinada com: A. Termopares (método 1), B. TIV (método 2) e C. CNR4 (método 3).

O coeficiente de determinação evidenciou que houve uma boa concordância ($r^2 > 0,80$) entre os métodos 1 e 2, como também entre os métodos 2 e 3 independente do princípio de funcionamento dos sensores, porém a relação entre os métodos 1 e 3 foi considerada média ($r^2 > 0,58$). Na Figura 4B verifica-se uma superestimava dos dados da T_s da água com a média dos termopares em relação à determinada pelo saldo radiômetro. O método 2 também superestimou os dados da T_s quando comparado com o saldo radiômetro (Figura 4C).

Em geral, os instantes mínimos e máximos da temperatura do isopor coincidem com a temperatura do ar, entretanto, no dia 04/08/2015 ocorreu para ambos a menor temperatura, a do ar as 3:50 h da madrugada ($17,27^\circ\text{C}$) e a do isopor as 6:10h da manhã ($21,01^\circ\text{C}$). A maior temperatura ocorreu em dias distintos, a temperatura do isopor ocorreu no dia 25/07/2015 às 12:20 h ($31,41^\circ\text{C}$), já a do Tar 11 dias depois, no dia 05/08/2015 as 14:20h ($26,87^\circ\text{C}$).

A amplitude da T_s registrada pelos dois TPIV e TPINV foi três vezes menor que a do Tar e do isopor, com valores da ordem de $3,18^\circ\text{C}$, $9,6^\circ\text{C}$ e $10,4^\circ\text{C}$, respectivamente. Observa-se que a oscilação da T_s da água é menor em relação à do isopor e do ar, uma vez que a água possui um calor específico ($4,18 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$) maior, que a Tar ($1,005 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$) e o isopor ($1,3 \text{ kJ kg}^{-1}\text{C}^{-1}$).

A análise estatística descritiva e o teste de normalidade das condições atmosféricas, bem como dos três métodos de determinação da temperatura da superfície da água (T_s) estão apresentados na Tabela 1. Na qual se observa que os dados não seguiram distribuição normal, ou seja, foram significativos a 1% de probabilidade pelo teste de Kolgomorov-Smirnov, para todas as variáveis, então, a correlação de Spearman foi a mais indicada (Tabela 2).

**significativo a 1% de probabilidade pelo teste de “t” Student; ^{ns}não significativo. TPIV = Temperatura da superfície da água, em °C (Ts), com termopar na placa de isopor vazado (método 1); TPINV = Ts com termopar na placa de isopor não vazado (método 1), em °C; TIV = Ts com termômetro infravermelho (método 2), em °C; TCNR4: Ts com saldo radiômetro (método 3), em °C. Condições atmosféricas: temperatura do ar (Tar, em °C), precipitação (PPT, em mm), velocidade do vento (Vvento, em m s⁻¹), umidade relativa do ar (UR, em %), radiação solar incidente na superfície (Rsi, em W m⁻²).

Percebeu-se correlação positiva entre a temperatura do ar com a Ts medida pelos três métodos, entretanto, a correlação com o M3 foi alta, com o M2 foi média, e com o M1 foi baixa. Possivelmente por causa do princípio de funcionamento dos sensores. Arfi (2003) observou que as características térmicas da coluna do corpo hídrico são afetadas pela temperatura do ar, além disso, correlacionou a Ts com a temperatura do ar e obteve um r^2 de 0,998. O autor verificou ainda que o regime do vento foi responsável pelo resfriamento (alísios de nordeste) e aquecimento (alísios de sul-oeste) da superfície do reservatório Selingué, em Mali na África, dependendo da época do ano.

CONCLUSÕES

A temperatura da superfície da água pode ser medida via método direto (termopares) e métodos indiretos (saldo radiômetro e termômetro infravermelho), obtendo-se uma boa correlação principalmente entre termopares - termômetro infravermelho e termômetro infravermelho - saldo radiômetro. Portanto, obteve-se uma correlação significativa a 1% de probabilidade entre os métodos, como também da influencia das condições atmosféricas em relação à temperatura da superfície da água.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCÂNTARA, E. H.; STECH, J. L.; LORENZZETTI, J. A.; NOVO, E. M. L. M. Time series analysis of water surface temperature and heat flux components in the Itumbiara Reservoir (GO), Brazil. *Acta Limnologica Brasiliensia*, v. 23, n. 3, p. 245-259, 2011.
- ALVERA-AZCÁRATE, A.; TROUPIN, C.; BARTH, A.; BECKERS, J. M. Comparison between satellite and in situ sea surface temperature data in the Western Mediterranean Sea. *Ocean Dynamics*, v. 61, n. 6, p. 767-778, 2011.
- ARFI, R. The effects of climate and hydrology on the trophic status of Selingué Reservoir, Mali, West Africa. *Lakes e Reservoirs: Research e Management*, v. 8, p. 247-257, 2003.

BORGES, T. K. D. S.; DE OLIVEIRA, A. S.; DA SILVA, N. D.; SANTANA, C. E. Plataforma flutuante de baixo custo para pesquisas em micrometeorologia e qualidade da água em reservatórios. *Revista Geama*, v. 4, n. 1, p. 38-45, 2016.

DAVIES, J. A.; ROBINSON, P. J.; NUNEZ, M. Field determinations of surface emissivity and temperature for Lake Ontario. *Journal of Applied Meteorology*, v. 10, n. 4, p. 811-819, 1971.

DONLON, C.; ROBINSON, I. S.; REYNOLDS, M.; WIMMER, W.; FISHER, G.; EDWARDS, R.; NIGHTINGALE, T. J. An infrared sea surface temperature autonomous radiometer (ISAR) for deployment aboard volunteer observing ships (VOS). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 25, n. 1, p. 93-113, 2008.

DONLON, C. J.; ROBINSON, I. S. Observations of the oceanic thermal skin in the Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 102, n. C8, p. 18585-18606, 1997.

GUSMÃO, A. C. V. L.; SILVA, B. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; GALVINCIO, J. D. Determinação do saldo radiativo na Ilha do Bananal, TO, com imagens orbitais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 10, p. 1107-1114, 2012.

KIRILLIN, G. Modeling the impact of global warming on water temperature and seasonal mixing regimes in small temperate lakes. *Boreal Environment Research*, v. 15, p. 279-293, 2010.

KONDA, M.; IMASATO, N.; NISHI, K.; TODA, T. Measurement of the sea surface emissivity. *Journal of Oceanography*, v. 50, n. 1, p. 17-30, 1994.

LI, Z.; LYU, S.; AO, Y.; WEN, L.; ZHAO, L.; WANG, S. Long-term energy flux and radiation balance observations over Lake Ngoring, Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, v. 155, p. 13-25, 2015.

NORDBO, A.; LAUNIAINEN, S.; MAMMARELLA, I.; LEPPÄRANTA, M.; HUOTARI, J.; OJALA, A.; VESALA, T. Long-term energy flux measurements and energy balance over a small boreal lake using eddy covariance technique. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116, n. D2, 2011.

PICCOLROAZ, S.; TOFFOLON, M.; MAJONE, B. A simple lumped model to convert air temperature into surface water temperature in lakes. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 17, n. 8, p. 3323-3338, 2013.

SAS Institute. *The SAS System for Windows: Release version: 6.8. 3.ed.* Cary, 1998.

SOUZA, A. P.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A.; GOMES, E. N. Estimativas das componentes da radiação solar incidente em superfícies inclinadas baseadas na radiação global horizontal. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 277-288, 2011.

VAREJÃO-SILVA, M. *Meteorologia e Climatologia*. Gráfica e editora Pax, INMET, Brasília, Brasil, 2001, 532 pp.