XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DA ÁGUA EM RIOS UTILIZANDO A MÉDIA MÓVEL DA TEMPERATURA DO AR

Geovana Thaís Colombo [1] & Michael Mannich [2]

RESUMO – Embora a temperatura da água seja um bom indicativo da qualidade da água – por afetar propriedades físicas, químicas e biológicas – a mesma geralmente não é medida com frequência em rios. Contudo, é possível estimar a temperatura da água através de modelos determinísticos e estatísticos, utilizando outros parâmetros meteorológicos. Deste modo, o presente trabalho avalia a dinâmica térmica do rio Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, e explora diferentes formas de estimar a temperatura da água: avaliando a correlação entre a temperatura do ar e da água através das regressões linear e não linear; utilizando um modelo determinístico simplificado e a equação para estimativa da temperatura da água utilizada pelo software SWAT. Ao se realizar uma comparação entre a média móvel de 4 dias da temperatura do ar e a média diária da temperatura da água, foi ajustada uma regressão não linear com valor de NS de 0,97 e REQM de 0,47ºC, e essa regressão se mostrou mais efetiva em estimar a temperatura da água do que um modelo determinístico simplificado e que a equação utilizada no SWAT.

Palavras-Chave – Temperatura da água em rios, regime térmico, regressões.

ESTIMATING STREAM TEMPERATURE USING MOVING AVERAGE OF AIR TEMPERATURE

ABSTRACT– Although water temperature is a good indicator of water quality - because it affects physical, chemical and biological properties - it is not often measured in rivers. However, it is possible to estimate water temperature through deterministic and statistical models using other meteorological parameters. Thus, the present work evaluates the thermal dynamics of the Passaúna River, located in the Metropolitan Region of Curitiba, and explores different ways of estimating water temperature: evaluating the correlation between air and water temperature through linear and non-linear regressions; using a simplified deterministic model and the equation for estimating the water temperature used by SWAT software. When a comparison was made between the 4-day moving average of the air temperature and the daily mean of the water temperature, a non-linear regression with NS value of 0.97 and RMSE of 0.47 was adjusted, and this regression was was more effective in estimating water temperature than a simplified deterministic model and the equation used in SWAT.

Palavras-Chave – Stream temperature, thermal regime, regressions.

1) Afiliação: Mestranda, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, (UFPR), email: geocolombo@gmail.com
2) Afiliação: Professor do Departamento de Engenharia Ambiental , Universidade Federal do Paraná (UFPR), email: mannich@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Entender o regime térmico em rios é de extrema importância para auxiliar na gestão dos recursos hídricos (Hebert *et al.*, 2015). A temperatura da água afeta aspectos físicos, como a concentração de saturação de oxigênio dissolvido na água e a massa específica, além de alterar reações químicas e biológicas (Chen *et al.*, 2016), e por essa razão é um parâmetro significativo para a avaliação da qualidade da água.

A dinâmica térmica em um rio é influenciada por condições atmosféricas, como temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa e velocidade do vento, e por características físicas, como velocidade do fluido, profundidade e largura do rio (Benyahya *et al.*, 2007). Atividades antrópicas, como o desmatamento da vegetação ripária e lançamento de efluentes, também podem afetar a temperatura da água (Caissie *et al.*, 2006).

A medição contínua da temperatura da água seria uma ferramenta para o monitoramento e gestão da qualidade da água em rios, podendo gerar um diagnóstico inicial para avaliação. Contudo, na maioria dos casos essa medição não é realizada. Em contrapartida, variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar e radiação solar, são medidas regularmente em muitos locais (Jeppesen e Iversen, 1987), e a partir dessas é possível que modelos sejam desenvolvidos para estimativa da temperatura da água.

Existem diversos tipos de modelos para estimar a temperatura da água em rios. De forma geral, existem modelos determinísticos, que são baseados no balanço de energia e necessitam de muitos dados de entrada, e modelos estatísticos, que buscam correlacionar a temperatura da água com outra variável e obter uma descrição matemática dessa relação. Em seu estudo, Larnier *et al* (2010) observou que a temperatura do ar explicou mais de 75% da variância da estatística descritiva da temperatura da água, e que a evolução temporal das temperaturas do ar e da água são similares. Por essa razão, é comum que os modelos estatísticos de regressão sejam aplicados entre essas duas variáveis.

Dessa forma, o presente estudo tem como objetivo avaliar a relação entre as temperaturas da água e do ar, e estimar da temperatura da água utilizando a regressão linear e não linear a partir da temperatura do ar. A partir disso, comparar os modelos de regressão com a equação que é utilizada no SWAT para estimar a temperatura da água e com um modelo determinístico simplificado.

MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Passaúna situa-se na Região Metropolitana de Curitiba (RMC), e a mesma integra a bacia do Alto Iguaçu. A bacia está localizada na APA do rio Passaúna, e a mesma

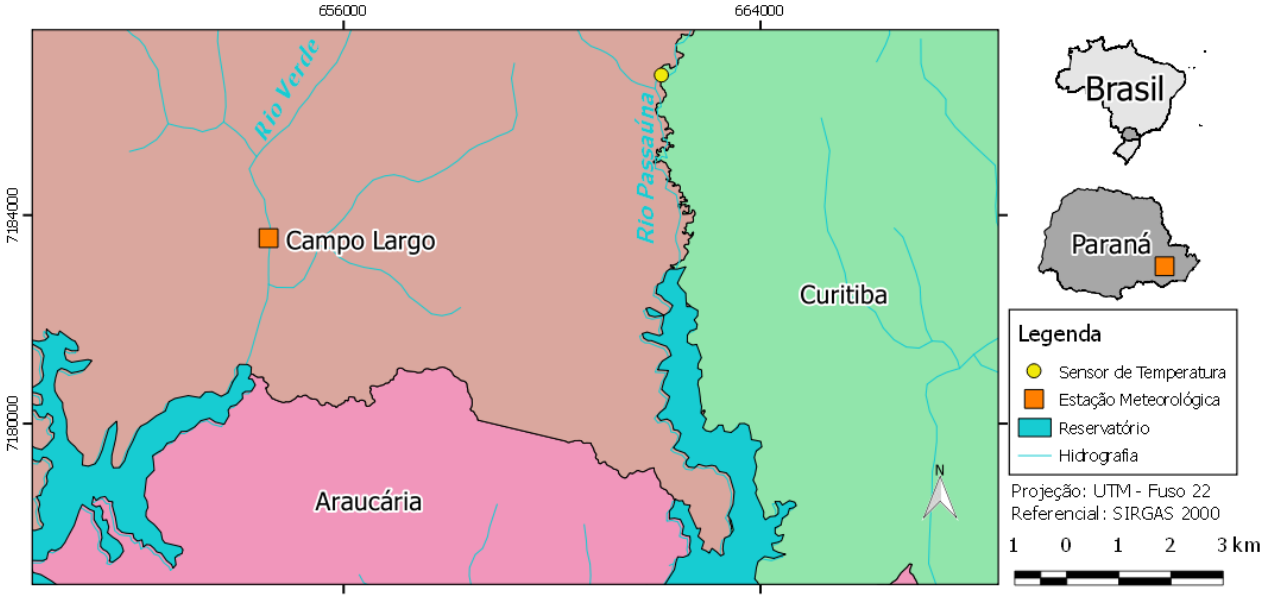

Figura 1 – Localização do rio Passaúna.

constitui um dos mananciais de água para abastecimento público da RMC (SUDERHSA, 2002). O ponto de medição da temperatura da água no rio está à montante do reservatório do Passaúna (Figura 1). A Tabela 1 mostra alguns parâmetros hidrológicos da bacia do rio em estudo, obtidos através do software Regionaliza, em que a localização da exutória é informada e o programa retorna o contorno da bacia à montante e resultados relacionados à vazão, hidrograma de cheias, entre outros (Saboia e Lopardo, 2015).

Tabela 1 – Parâmetros hidrológicos da bacia do rio Passaúna.

	Rio Passaúna
Coordenadas da exutória	25,43ºS 49,39ºO
Área de drenagem da bacia (km²)	83,59
Altitude média da bacia (m)	978,47
Vazão específica média (l s^{-1} km^{-2})	15,70

Com relação à frequência de medição, a temperatura da água foi medida a cada 15 minutos, e a estação meteorológica mais próxima do ponto de medição no rio foi a estação do rio Verde, a qual possui uma frequência de medição de 10 minutos e mede a temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação. Para aplicação das regressões e do modelo determinístico, foram calculadas médias diárias de todas as variáveis.

Implementação dos modelos de temperatura da água

O modelo determinístico foi aplicado através da equação do transporte de calor simplificada (Caissie *et al.*, 2007):

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{H}{c\rho h}, \tag{1}$$

onde T_s é a temperatura da água, c é o calor específico da água, ρ é a densidade da água, h é a profundidade média do rio e H é o fluxo de calor total entre a atmosfera e a água, calculado como (Bogan *et al.*, 2003)

$$H = H_{ns} + H_{la} - H_{lw} - H_e + H_c + H_p, \tag{2}$$

em que H_{ns} é a radiação solar líquida, H_{la} é a radiação atmosférica de onda longa, H_{lw} é a radiação de onda longa emitida pela água, H_e é o fluxo de calor por evaporação, H_c é o fluxo convectivo de calor e H_p é o fluxo de calor por precipitação. Os fluxos foram calculados através das variáveis meteorológicas medidas (temperatura do ar, radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação), e a equação foi resolvida pelo método das diferenças finitas progressivo.

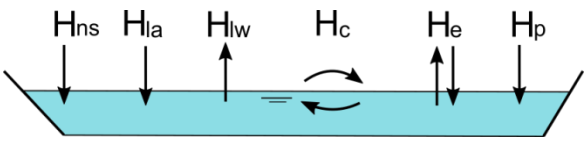

Figura 2 – Fluxos de calor considerados no modelo determinístico.

De forma geral, utilizar uma regressão entre duas variáveis é buscar uma equação para se estimar a condicional de uma variável, dado os valores da outra. A regressão linear é dada pelo ajuste dos dados em uma função linear, entre a temperatura da água (variável dependente) e a temperatura do ar (variável independente):

$$T_s = aT_a + b, \tag{3}$$

em que T_a é a temperatura do ar, e a e b são os coeficientes angular e linear, obtidos através do método dos mínimos quadrados.

A relação entre a temperatura da água e do ar pode ser representada também por uma função logística (Mohseni *et al.*, 1998), dada por

$$T_s = \mu + \frac{\alpha - \mu}{1 + \exp(\gamma(\beta - T_a))}, \tag{4}$$

onde μ é a temperatura mínima estimada da água, α é a temperatura máxima estimada, γ é a inclinação do ponto de inflexão e β é o valor da temperatura nesse ponto de inflexão (Mohseni *et al.*, 1998). Os parâmetros foram determinados utilizando o critério de minimização do valor da soma do erro quadrático entre o valor da temperatura da água observado e simulado.

O modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) emprega a regressão linear para cálculo da temperatura da água, utilizando a equação desenvolvida por Stefan e Preud'homme (1993), considerando o rio bem misturado (Neitsch *et al.*, 2011):

$$T_s = 0{,}75T_a + 5{,}0\,. \tag{5}$$

Análise dos dados ajustados aos dados medidos

Para avaliar a qualidade de ajuste de cada um dos modelos aplicados, o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) foi calculado. O mesmo é obtido por

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - T_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - \overline{T}_{s,obs})^2}\,, \tag{6}$$

onde T_{sim} e T_{obs} são as temperaturas da água simuladas e observadas, respectivamente. O NS atinge como valor máximo 1 e não há um valor mínimo (Morril et al., 2005), contudo valores positivos indicam que a temperatura estimada é uma aproximação melhor que a utilização de somente o valor médio das temperaturas observadas.

Além do NS, a Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) também é calculada para avaliar os modelos, sendo calculada como (Mohseni *et al.*, 1998)

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(T_{obs,i} - T_{sim,i})^2}{n}}\,. \tag{7}$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra a evolução temporal das médias diárias das temperaturas da água e do ar, sendo que os *boxplots* em preto são em relação à variação mensal da temperatura da água. Foram utilizados dados de dezembro de 2016 até setembro de 2018, e dentro desse período existem algumas falhas que ocorreram devido a problemas nos sensores e no armazenamento dos dados. A partir dessa Figura, é possível observar a existência de um ciclo anual para ambas as temperaturas, que atinge os menores valores no inverno e os maiores no verão.

Ao comparar T_s e T_a, observa-se que a temperatura do ar possui flutuações mais acentuadas que a temperatura da água, contudo a temperatura da água acompanha essas variações, se comportando como um indicador da tendência da temperatura do ar. A partir dessa observação, calculou-se a média móvel simples (MMS) da temperatura do ar, a fim de se avaliar qual intervalo de dias para cálculo da média se ajusta melhor aos valores da temperatura da água medidos. A média móvel foi calculada para o intervalo de 2, 3, 4, 5, 6, 7, 10 e 15 dias, e o melhor ajuste obtido foi para a média móvel de 4 dias (Figura 4). Em seu estudo, Morril *et al.* (2005) também utilizou a

média móvel da temperatura do ar em comparativo com a média diária da água, contudo os mesmos testaram os intervalos de 3 e 7 dias e obtiveram o melhor ajuste pra 7 dias.

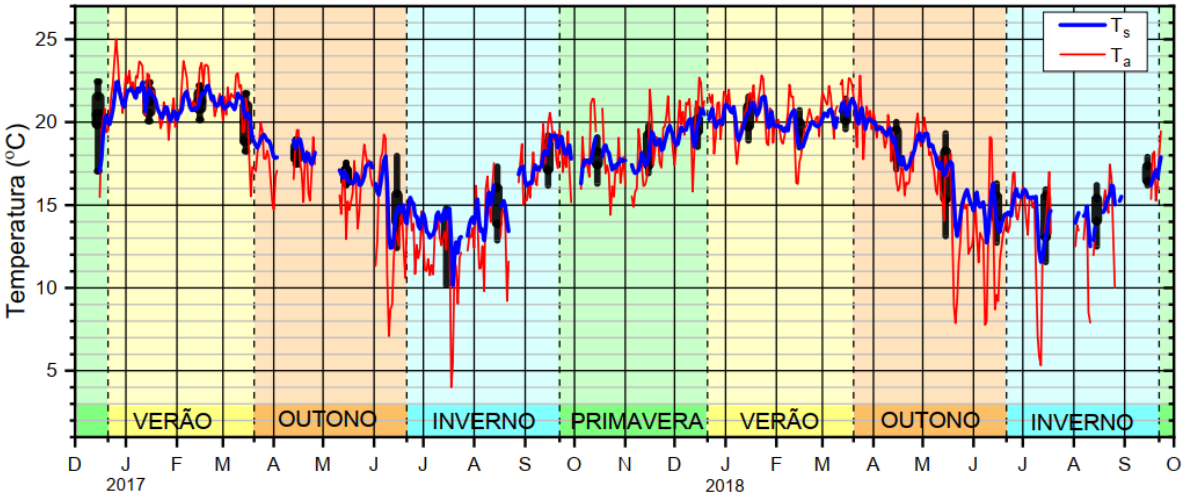

Figura 3 – Variação anual das médias diárias das temperaturas da água e do ar no rio Passaúna.

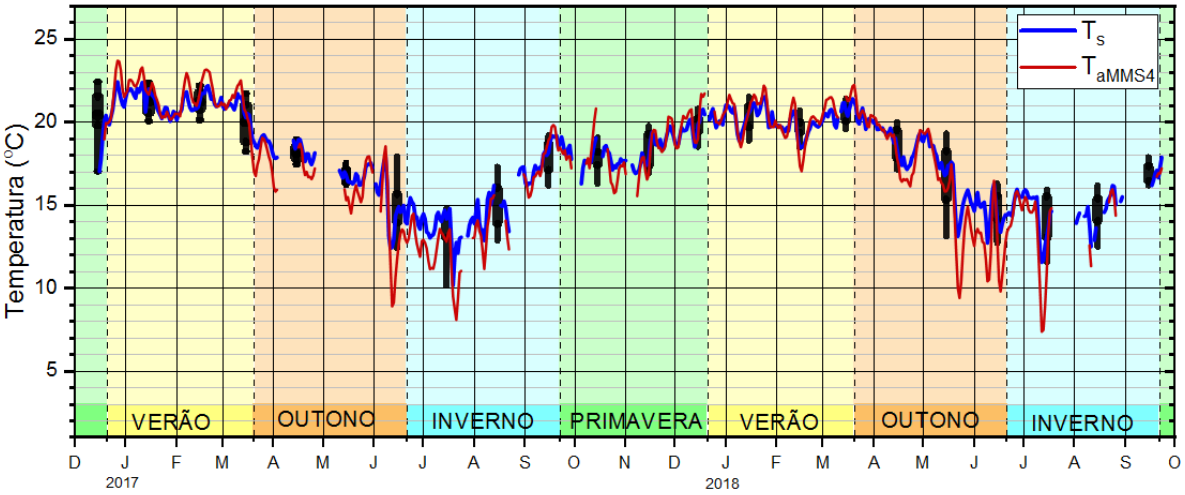

Figura 4 – Temperatura da água e média móvel simples de 4 dias da temperatura do ar.

Os resultados dos ajustes das regressões aos dados são mostrados na Figura 5 e na Tabela 2. A apresentação dos resultados na Tabela 2 é feita através da sigla apresentada abaixo, sendo que a primeira letra (A) representa que a variável independente é a temperatura do ar, o número (1 ou 4) representa o número de dias utilizado para cálculo da média móvel simples (no caso de 1, a média móvel simples é igual a média diária) e a letra (L ou N) representa se a regressão aplicada foi a linear ou a não linear.

Ao observar a Figura 5, é possível verificar que a utilização da média móvel da temperatura do ar diminuiu a variação entre os dados e o comportamento dos pares de dados parece mais similar ao de uma reta. Contudo, para as temperaturas do ar mais extremas (acima de 20ºC e abaixo de 10ºC), a temperatura da água parece não acompanhar o mesmo comportamento de T_a, e para esses

casos a utilização da regressão não linear é mais recomendada. Ao analisar os valores de NS e REQM, é possível observar que utilizar a regressão não linear obteve o melhor ajuste, independente do número de dias do cálculo da média, e a utilização da média móvel de 4 dias reduziu pela metade o REQM, comparando as duas regressões não lineares. O modelo não linear também foi o tipo de regressão com os melhores ajustes para Morril *et al.* (2005).

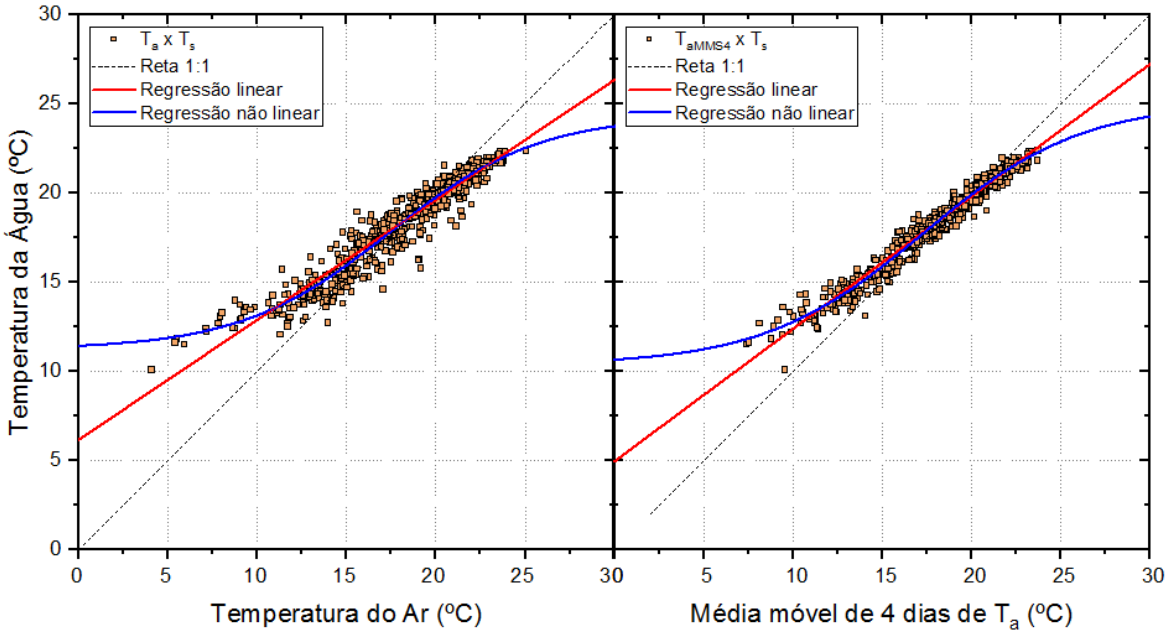

Figura 5 – Regressões linear e não linear aplicadas às médias diárias de T_s, utilizando a média diária de T_a e a média móvel de 4 dias de T_a.

Tabela 2 – Equações obtidas com a aplicação das regressões linear e não linear.

Análise	Equação	NS	REQM (ºC)
A1L	$T_s = 0{,}65T_a + 6{,}63$	0,84	1,04
A1N	$T_s = 12{,}09 + \dfrac{23{,}50 - 12{,}09}{1 + \exp(0{,}28(17{,}42 - T_a))}$	0,86	0,98
A4L	$T_s = 0{,}74T_a + 4{,}96$	0,96	0,51
A4N	$T_s = 10{,}37 + \dfrac{25{,}11 - 10{,}37}{1 + \exp(0{,}22(17{,}30 - T_a))}$	0,97	0,47

Para comparar a regressão obtida com os dados com o modelo determinístico (DET) e com a equação do SWAT, foi selecionado o melhor resultado da análise anterior, que foi a aplicação da regressão não linear utilizando a média móvel de 4 dias da temperatura do ar. A Figura 6 mostra a variação temporal dos dados observados e dos dados simulados, e a Tabela 3 mostra os valores de NS e REQM para cada modelo. A partir do gráfico, nota-se que o modelo determinístico é o que

possui as maiores flutuações, especialmente nos momentos de máxima e de mínima no ciclo anual. A regressão linear utilizada pelo SWAT também tem alguns pontos com grandes flutuações, especialmente no inverno. Ao verificar os valores na Tabela 3, constata-se que a análise A4N é a que possui o maior valor para o NS e menor valor para o REQM, que o modelo determinístico é o que teve o pior ajuste, devido ao menor NS e maior REQM, e para a equação utilizada pelo SWAT o valor de NS ficou razoável, porém a raiz do erro quadrático médio possui um valor alto, comparado ao A4N.

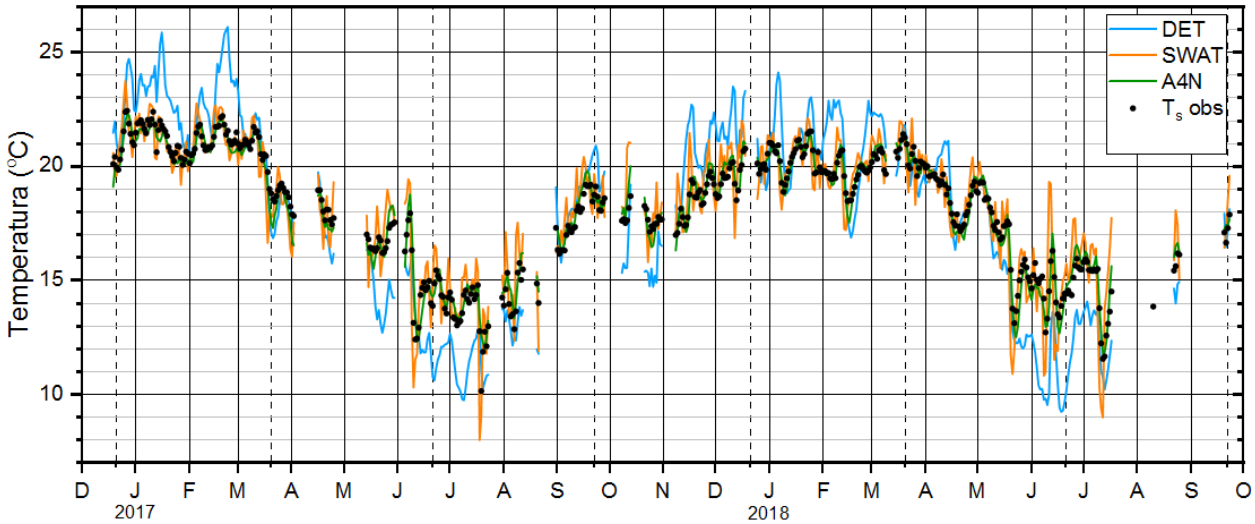

Figura 6 – Comparativo entre os dados observados e os dados simulados pelos modelos.

Tabela 3 – Comparação da qualidade do ajuste dos modelos.

Análise	NS	REQM (ºC)
A4N	0,97	0,47
DET	0,44	1,96
SWAT	0,82	1,12

CONCLUSÕES

Considerando que a temperatura da água em rios geralmente não é medida, e que a simulação desse parâmetro através de modelos determinísticos requer parâmetros muitas vezes também indisponíveis, é interessante avaliar a utilização de modelos mais simples e que requerem um número menor de parâmetros de entrada, como os modelos de regressão.

Para o rio Passaúna, a utilização da média móvel de 4 dias melhorou a qualidade do ajuste das regressões. De acordo com Erickson e Stefan (2000), existe um *lag* de tempo entre as temperaturas do ar e da água, sendo esse um período de atraso de resposta da água a variações na temperatura do

ar. O aumento do uso de dias no cálculo da média reduz esse efeito de atraso entre as temperaturas, melhorando o ajuste.

Em relação ao tipo de regressão, a não linear gerou o melhor ajuste, independente do intervalo de dias utilizado no cálculo da média. Apesar de a regressão linear obter resultados para NS e REQM similares ao caso não linear, em um caso de temperaturas do ar mais extremas, a regressão linear pode subestimar a temperatura da água para temperaturas do ar baixas e superestimar para temperaturas do ar altas, de forma que é possível perceber que a relação entre a temperatura do ar e da água é mais bem representada pela regressão não linear para essas ocorrências. Além disso, a regressão não linear se mostrou mais efetiva em estimar a temperatura da água do que um modelo determinístico simplificado e que a equação utilizada no SWAT.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Agradecimentos ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFPR (PPGEA-UFPR), pelo auxílio no desenvolvimento do projeto; ao Sistema Meteorológico do Paraná (Simepar), pela concessão dos dados de temperatura do rio Passaúna e ao Laboratório de Estudos em Modelagem e Monitoramento Ambiental (LEMMA-UFPR) por conceder os dados da estação meteorológica do rio Verde.

REFERÊNCIAS

BENYAHYA, L.; CAISSIE, D.; ST-HILAIRE, A.; OUARDA, T.; BOBÉE, B. *"A Review of Statistical Water Temperature Models"*. Canadian Water Resources Journal 32(3), pp. 179–192.

BOGAN, T.; MOHSENI, O.; STEFAN, H. *"Stream temperature-equilibrium temperature relationship"*. Water Resources Research 39(9), pp. 1–12.

CAISSIE, D. (2006). *"The thermal regime of rivers: a review"*. Freshwater biology 51, pp. 1389–1406.

CAISSIE, D.; SATISH, M.; EL-JABI, N. (2007). *"Predicting water temperatures using a deterministic model: Application on Miramichi River catchments (New Brunswick, Canada)"*. Journal of Hydrology 336, pp. 303–315.

CHEN, G.; FANG, X.; FAN, H. (2016). *"Estimating hourly water temperatures in rivers using modified sine and sinusoidal wave functions"*. Journal of Hydrologic Engineering 26(10), pp. 1–12.

ERICKSON, T. R.; STEFAN, H. G. (2000). *"Linear air/water temperature correlations for streams during open water periods"*. Journal of Hydrological Engineering 5(3), pp. 317–321.

HEBERT, C.; CAISSIE, D.; SATISH, M.; EL-JABI, N. (2015). *"Predicting hourly stream temperatures using the equilibrium temperature model"*. Journal of Water Resource and Protection 7, pp. 322–338.

JEPPESEN, E.; IVERSEN, T. M. (1987). *"Two simple models for estimating daily mean water temperatures and diel variations in a Danish low gradient stream"*. OIKOS 49(2), pp. 149–155.

LARNIER, K.; ROUX, H.; DARTUS, D.; CROZE, O. (2010). *"Water temperature modeling in the Garonne River (France)"*. Knowledge and Management of Aquatic Ecosystems 398(4), pp. 1–10.

MOHSENI, O.; STEFAN, H.; ERICKSON, T. (1998). *"A nonlinear regression model for weekly stream temperatures"*. Water Resources Research 34(10), pp. 2685–2692.

MORRILL, J. C.; BALES, R. C.; CONKLIN, M. H. (2005). *"Estimating stream temperature from air temperature: implications for future water quality"*. Journal of Environmental Engineering 131(1), pp. 139–146.

NEITSCH, S. L.; ARNOLD, J. G.; KINIRY, J. R.; WILLIAMS, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009*. Texas Water Resources Institute, 647 p.

SABOIA, J. P. J.; LOPARDO, N. (2015). *"Software para cálculo de regionalização de parâmetros hidrológicos em bacia do estado do Paraná"* in Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Brasília, Nov. 2015.

STEFAN, H.; PREUD'HOMME, E. (1993). *"Stream temperature estimation from air temperature"*. Water Resources Bulletin 29(1), pp. 27–45.

SUDERHSA. (2002). *Plano Diretor de Drenagem para a bacia do rio Iguaçu na região metropolina de Curitiba*. Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – SUDERHSA.