

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE UM RESERVATÓRIO MONOMÍTICO QUENTE A PARTIR DE UM MODELO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA DIREÇÃO VERTICAL

Ferreira¹, D. M.; Cunha², C. L. N.

Resumo – O conhecimento do comportamento térmico de um reservatório é importante para o estudo da distribuição de nutrientes ao longo da coluna d'água e, assim, definir regiões onde a fotossíntese ocorre. Como a distribuição não é uniforme, é possível que espécies adaptadas em regiões de maior concentração de nutrientes levem vantagem em relação a outras, principalmente em períodos em que ocorre uma queda da concentração dessas substâncias. Ainda, a variação da temperatura afeta a densidade da água e, como consequência, altera os processos de transporte. Neste trabalho, um modelo unidimensional de transferência de calor é utilizado para simular a distribuição vertical de temperatura no reservatório do Rio Verde, localizado na região metropolitana de Curitiba, Estado do Paraná. Utilizam-se duas formulações para o cálculo do coeficiente de difusão turbulenta na vertical: a primeira considera um valor constante, enquanto a segunda é baseada na variação do número de Richardson e na posição da termoclina. O modelo foi aplicado em dois períodos: junho e dezembro de 2010. Os resultados mostram uma razoável aproximação entre os valores simulados e observados. Estes resultados ainda permitem avaliar a concordância de resultados para as duas formas de avaliação do coeficiente de difusão turbulenta.

Palavras-Chave – modelo de temperatura; coeficiente de difusão turbulenta vertical; reservatório do Rio Verde.

CHARACTERIZATION OF THERMAL BEHAVIOR IN A WARM MONOMITIC RESERVOIR BASED ON A HEAT TRANSFER MODEL IN VERTICAL DIRECTION

Abstract – The knowledge of the thermal behavior of a reservoir is important to study the distribution of nutrients throughout the water column, and then to define regions where photosynthesis occurs. Since the distribution is not uniform, it is possible that species adapted at higher concentration of nutrients take advantage over other. Also, the temperature variation affects the water density and, therefore, changes the transport processes. In this paper a one-dimensional heat transfer model is used to simulate the vertical distribution of temperature at reservoir Rio Verde, located in the metropolitan region of Curitiba, State of Paraná. Two formulations are used to calculate the turbulent diffusion coefficient in the vertical: the first considers a constant value, while the second is based on the variation of the Richardson number and the thermocline position. The model was applied in two periods: June and December 2010. The results show a reasonable approximation between simulated and observed values. Besides, allow to evaluate the concordance for the two forms of evaluation of the turbulent diffusion coefficient.

Keywords – temperature model; vertical turbulent diffusion coefficient; Rio Verde reservoir.

¹ Engenheira Ambiental. Mestranda do Programa de Pós-Graduação de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba (PR), Brasil. Email: danielimaraferreira@gmail.com.

² Departamento de Engenharia Ambiental da UFPR, Laboratório de Estudos em Modelagem e Monitoramento Ambiental (LEMMA/UFPR) e Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA-UFPR) – Curitiba (PR), Brasil. Email: cynara@ufpr.br.

INTRODUÇÃO

A formação de reservatórios artificiais para armazenamento de água pode gerar impactos ambientais negativos, como a modificação das condições de escoamento, por meio da transformação de um ambiente lótico em lêntico. Estas modificações alteram o regime térmico dos fluxos, além de introduzir novas condições químicas e biológicas no meio. Outra característica importante nos reservatórios, relacionada à maior profundidade e à baixa velocidade longitudinal, é a estratificação térmica e química, principalmente na região próxima à barragem. Uma parte significativa da produtividade e do crescimento e/ou morte da biomassa de fitoplâncton são controlados pelas variações da temperatura do corpo d'água, pela morfologia do reservatório e pelas variações de nutrientes, entre outros. Dentre estes estão incluídas as variações das vazões afluentes e efluentes, e o tempo de residência deste corpo d'água. Deste modo, alterações nestas variáveis podem acelerar o crescimento dos fitoplânctons, estabelecendo uma floração de algas, onde algumas espécies, mais adaptadas, se tornam predominantes.

A dinâmica vertical está relacionada à presença ou não da estratificação que, no caso dos reservatórios continentais, refere-se à variação térmica. A penetração da luz na coluna d'água pode definir a região onde a fotossíntese ocorre e, conseqüentemente, determinar a migração de espécies para a superfície. Em lagos rasos, o efeito do vento é maior nos processos de mistura vertical, além de aumentar a turbidez, diminuindo a penetração da luz. Outro fator a ser considerado é a distribuição de nutrientes ao longo da coluna d'água. Como esta distribuição não é uniforme, é possível que espécies adaptadas em regiões de maior concentração de nutrientes levem vantagem em relação a outras, principalmente em períodos quando ocorre diminuição da disponibilidade dessas substâncias.

Parte da radiação incidente que atinge a superfície líquida do reservatório é absorvida e outra parte é refletida, voltando para a atmosfera. A porcentagem de radiação refletida depende das condições da superfície e do ângulo de incidência, que varia ao longo do dia, do ano, e com a latitude. Considerando as condições locais, pode-se estimar que uma pequena parcela desta radiação é refletida durante o verão, quando ocorre ângulo de incidências menores; no inverno, a reflexão é maior, quando o ângulo de incidência é maior.

O domínio estudado, o reservatório do Rio Verde, situa-se na região metropolitana de Curitiba (RMC), na longitude 49° 31'O e na latitude 25° 31'S. O sistema representa uma área de aproximadamente 5.971.731,0 m², e constitui um manancial para abastecimento industrial da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR). A represa encontra-se inserida na bacia hidrográfica do Rio Verde, onde existem atividades industriais e agrícolas, além de áreas de ocupação irregular. O reservatório teve sua construção finalizada em 1976, e apresenta um volume médio de 25.643.732,0 m³, com uma profundidade média de 4,30 m. Houve uma elevada concentração de algas em maio de 2001 no reservatório. Desde então não registram-se eventos de florações de fitoplâncton significativas, garantindo uma boa qualidade da água.

O objetivo deste trabalho é descrever o comportamento térmico de um lago monomítico quente, que apresenta uma circulação completa por ano e estratificação térmica nos meses mais quentes, usando um modelo unidimensional na vertical como ferramenta. O modelo usado é baseado na equação de transferência de calor e tem produzido resultados satisfatórios em diversos trabalhos (Antonopoulos e Gianniu, 2003; Cancelli, 2006), e tem sido usado no reservatório do Rio Verde (Ferreira e Cunha, 2013). Neste sentido, são comparadas diferentes formulações para o coeficiente de difusão turbulenta na vertical, com o objetivo de melhorar a acurácia do modelo. Busca-se ainda definir qual a melhor formulação; neste estudo são utilizadas e comparadas duas formas de aplicação do coeficiente de difusividade turbulenta na vertical (**E**). A primeira assume

um valor constante de E para toda a coluna de água, enquanto a segunda considera uma variação ao longo da profundidade, determinada a partir de um parâmetro de estabilidade, dado pelo número de Richardson.

De acordo com McCormick e Scavia (1981), a difusão turbulenta é uma boa aproximação para o estudo de trocas verticais de calor e outros materiais na coluna de água, em pequena escala. A mistura turbulenta é avaliada a partir do coeficiente de difusividade turbulenta na vertical, o qual tem fundamental importância nos cálculos dos perfis verticais de temperatura. Este parâmetro é considerado constante por alguns autores, enquanto outros o consideram como função da profundidade e da temperatura da água (Cancelli, 2006). Há diversas parametrizações para E propostas na literatura (Sundaram e Rehm, 1973; Henderson-Sellers, 1976, 1984; McCormick e Scavia, 1981; Babajimopoulos e Papadopoulos, 1986). Henderson-Sellers (1976;1984) propôs formulações que utilizam o número de Prandtl, a velocidade da água, e a frequência de Brunt-Vaisala.

METODOLOGIA

O sistema estudado, o reservatório do Verde, situa-se na região metropolitana de Curitiba (RMC), Paraná, Brasil, e apresenta tempo de residência médio de 218 dias (Andreoli *et al.*, 2011). O reservatório encontra-se inserido na bacia hidrográfica do Rio Verde, pertence à bacia do Alto Iguazu, um dos principais mananciais de abastecimento desta região. Apresenta como principais tributários o ribeirão dos Pessegueiros, o ribeirão Iguazu, o arroio Rondinha, o rio cristal e o arroio Formigueiro. A bacia hidrográfica do Rio Verde que drena suas águas para o reservatório possui área de 165,0 km², onde existem uma predominância da vegetação arbórea natural (30 %) e cultivo temporário (36%), além de áreas de pequenos núcleos urbanos (3%).

O reservatório do Rio Verde apresenta uma circulação que abrange toda a coluna de água, com predominância anual durante o outono e o inverno, e temperatura sempre superior a 4°C. Segundo a classificação apresentada em Wetzel (1981), o reservatório é definido como monomítico quente. De acordo com a classificação de Koeppen, o reservatório do Rio Verde está localizado na região climática do tipo Cfb, clima temperado propriamente dito; a temperatura média no mês mais frio fica abaixo de 18°C (mesotérmico), com verões frescos, e a temperatura média no mês mais quente é abaixo de 22°C, sem estação seca definida.

Neste artigo são utilizados os valores das variáveis meteorológicas medidas em uma estação de monitoramento localizada próxima à barragem, na Latitude 25°31'36,83''S e Longitude 49°31'39,07''O. Tal estação fornece dados desde julho de 2008, que incluem direção e velocidade do vento, temperatura do ar, radiação incidente e umidade. Acoplado ao datalogger da estação há quatro sensores de temperatura, instalados a 2,0 (T_1), 3,5 (T_2), 5,5 (T_3) e 7,0 (T_4) metros abaixo da superfície livre, para medição da temperatura da água a cada 15 minutos. Os sensores da estação meteorológica estão instalados a aproximadamente 10 metros da superfície livre, utilizando a estrutura da captação de água existente no local. Como as variações de níveis da superfície livre observadas neste período foram pequenas, na ordem de ± 20 cm, neste trabalho o nível da superfície livre é considerado como estático.

As simulações de temperatura do reservatório foram realizadas usando um modelo unidimensional de transferência de calor, dado por (Henderson-Sellers, 1984):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho c_p} \frac{\partial q}{\partial z} \quad (1)$$

Onde $T(z,t)$ é a temperatura da água ($^{\circ}\text{C}$), variando com o tempo t e a profundidade z , K_z é o coeficiente de difusão ($\text{m}^2.\text{dia}^{-1}$), $q(z)$ é a distribuição interna de calor dentro da coluna de água devido à absorção da radiação solar ($\text{cal}.\text{m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$), ρ é a massa específica da água ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$) e c_p é o calor específico da água ($\text{cal}.\text{C}^{-1}.\text{g}^{-1}$). A condição de contorno da superfície ($z = 0,0$) descreve as transferências de calor entre o reservatório e a atmosfera:

$$q_n = -\rho c_p K_z \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} \quad (2)$$

Onde q_n é o fluxo de calor na superfície linearizado. No fundo, a condição de contorno consiste na ausência de fluxo de calor:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=H} = 0 \quad (3)$$

Onde H é a profundidade do reservatório. Maiores detalhes sobre o modelo podem ser encontrados em Ferreira e Cunha (2013).

O coeficiente de difusão K_z é dado pela soma da difusão molecular, D_0 , com a difusão turbulenta, E . A difusão molecular pode ser desprezada, uma vez que seu valor é muito menor quando comparado ao da difusão turbulenta. O coeficiente de difusão turbulenta E descreve os processos de mistura turbulenta que ocorrem dentro do reservatório, e sua estimativa é uma das dificuldades na aplicação da Equação 1. Ele pode ser baseado em valores de estudos similares ou em formulações empíricas.

Neste trabalho, utilizam-se duas propostas para a aplicação de tal coeficiente na simulação dos valores de temperatura. Uma delas considera um valor de E constante para toda a coluna de água; no trabalho considerou-se igual a $4,0 \times 10^{-5} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. A outra considera que, na camada superior de fluido, definida a partir da profundidade da termoclina, o coeficiente de difusão turbulenta é definido como constante e igual ao coeficiente de difusão turbulenta em meio neutro; na camada abaixo, o coeficiente de difusão turbulenta passa a ser dado pelas seguintes expressões:

$$E = E_0 f \quad (4)$$

$$f = (1 + \sigma Ri)^{-n} \quad (5)$$

$$E_0 = c_2 w^* \quad (6)$$

Onde E_0 é o coeficiente de difusão turbulenta em meio neutro ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), c_2 , σ e n são constantes (nas simulações foram usados os valores 0,15; 1,0; 1,0, respectivamente), w^* é a velocidade de atrito do vento ($\text{m}.\text{s}^{-1}$) e Ri é o número de Richardson. O número de Richardson descreve a estabilidade da coluna, e representa uma estimativa de ocorrência da mistura entre as camadas estratificadas. O valor de Ri é dado pela razão entre as forças de empuxo e a energia para mistura causada pelo cisalhamento do vento, sendo representado por (Henderson-Sellers, 1984):

$$Ri = - \frac{g \Delta \rho h}{\rho w^{*2}} \quad (7)$$

Onde g é a aceleração da gravidade ($\text{m}.\text{s}^{-2}$), $\Delta \rho$ é a diferença de densidade entre o epilímnio e o hipolímnio ($\text{kg}.\text{m}^{-3}$), h é a profundidade de formação da termoclina (m). A profundidade da termoclina é avaliada segundo a expressão (Gorham e Boyce, 1989):

$$h = 2,0 \left(\frac{\tau}{g \Delta \rho} \right)^{1/2} L^{1/2} \quad (8)$$

Onde τ é a tensão superficial gerada pelo vento ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$) e L é a raiz quadrada da área superficial do reservatório (m).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O modelo unidimensional de transferência de calor foi aplicado para o reservatório do Rio Verde em dois períodos: junho de 2010, para caracterizar a época em que a coluna d'água está bem misturada, e dezembro de 2010, período em que a coluna d'água apresenta-se estratificada. O reservatório foi dividido em camadas com $\Delta z = 0,5$ m. Os valores obtidos pelo modelo foram comparados com os valores de temperatura medidos em diferentes profundidades no reservatório.

Os valores de temperatura da água nas diferentes profundidades foram obtidos a partir de leituras realizadas a cada 15 minutos, para o período de 01/06/2010 a 30/06/2010. A comparação com os valores obtidos pelo modelo, considerando o coeficiente de difusão turbulenta E constante e variável, é mostrada na Figura 1. Pode-se verificar que durante este período a coluna d'água está bem misturada, com uma boa correlação entre os dados medidos e os valores obtidos pelo modelo. No segundo período simulado, de 01/12/2010 a 31/12/2010 (Figura 2), os dados mostram que na camada mais profunda (T4) as flutuações térmicas são pequenas quando comparadas com as flutuações da camada superficial (T1). A camada mais profunda apresenta, portanto, flutuações da temperatura conforme as estações do ano. O reservatório do Verde não apresenta estratificação significativa entre os meses de abril e julho, e a partir de agosto ocorre uma tendência maior de estratificação, provocada por um aquecimento da camada superior.

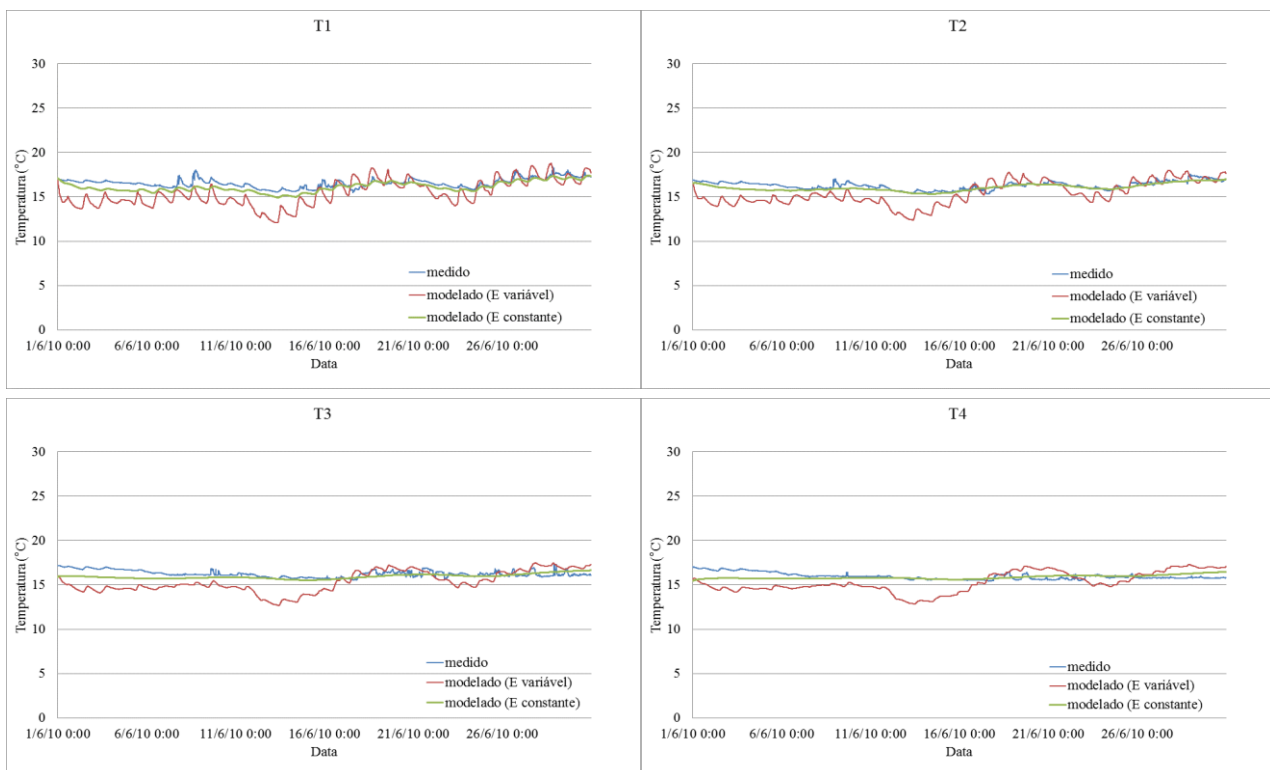


Figura 1 – Valores de temperatura simulados e medidos no reservatório do Rio Verde em junho de 2010.

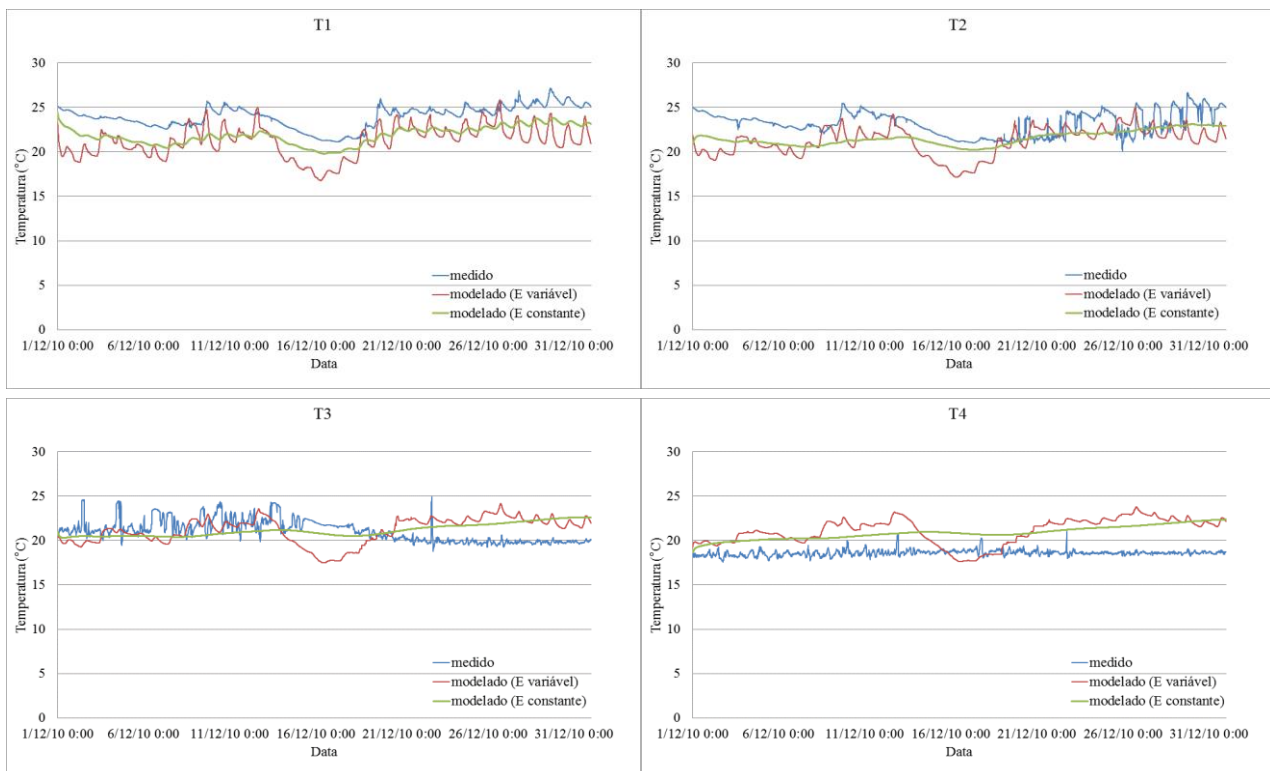


Figura 2 – Valores de temperatura simulados e medidos no reservatório do Rio Verde em dezembro de 2010.

A Tabela 1 mostra os erros médios absolutos e os erros médios quadráticos para as simulações de junho e dezembro no reservatório do Rio Verde. Os resultados obtidos pelo modelo com E variável reproduzem melhor as flutuações diárias de temperatura, enquanto E constante produz resultados praticamente sem flutuação. Entretanto, os erros de simulação são maiores quando se utiliza o coeficiente de difusão turbulenta na vertical corrigido a partir do número de Richardson. Esta formulação é altamente sensível à variação da velocidade do vento, em detrimento das outras interferentes da temperatura, como a radiação solar.

No mês de junho de 2010, período de inverno, pode-se observar que os erros de simulação são menores, uma vez que as flutuações de temperatura ao longo da vertical são menos intensas do que no verão. No período de verão, principalmente nas camadas mais profundas e no final do mês, pode ter acontecido uma mudança na capacidade de absorver e transmitir calor, que não foi bem representada pelo modelo.

Nos dois períodos simulados observa-se que na camada mais próxima à superfície as diferenças entre valores simulados e medidos são maiores. Estas diferenças podem ser creditadas aos coeficientes de extinção de radiação solar na água e de extinção vertical, que permanecem constantes durante a simulação, mas que podem variar ao longo do tempo. Outra questão importante relaciona o regime térmico de lagos continentais com a variação das variáveis meteorológicas, principalmente da energia solar disponível e do vento, e da sua morfologia. No reservatório do Rio Verde, a ação do vento não é capaz de diminuir a estratificação térmica de forma considerável, ou seja, quando E é calculado a partir da velocidade de atrito do vento, os resultados obtidos pelo modelo não são plenamente satisfatórios. De acordo com Caprariis (1981), não é clara a existência de uma correlação significativa entre as flutuações da velocidade do vento e o perfil de temperatura. Fee *et al* (1996) sugerem que, em lagos pequenos, o aprofundamento da termocline depende

principalmente da radiação incidente, enquanto o efeito do vento é maior em lagos maiores. Além disso, as diferenças entre dados medidos e simulados podem ser creditadas ao processo de formação da termoclina. De acordo com Gorham e Boyce (1989), a formação da termoclina ocorre por interações entre a turbulência gerada pelo vento e o empuxo devido ao gradiente de densidade do fluido, em um processo instável mesmo quando as condições ambientais são estáveis. A profundidade da camada de mistura ainda é influenciada por fatores geométricos, como área superficial e profundidade máxima do reservatório.

Tabela 1 – Erros entre valores medidos e simulados de temperatura (com *E* constante e variável) para junho e dezembro de 2010.

| PONTOS | ERRO MÉDIO ABSOLUTO MENSAL (°C) | | | |
|--------|---|-------------------|--------------------|-------------------|
| | JUNHO 2010 | | DEZEMBRO 2010 | |
| | <i>E</i> constante | <i>E</i> variável | <i>E</i> constante | <i>E</i> variável |
| T1 | 0,47 | 1,35 | 2,10 | 2,78 |
| T2 | 0,28 | 1,15 | 1,76 | 2,35 |
| T3 | 0,42 | 1,28 | 1,46 | 1,94 |
| T4 | 0,37 | 1,26 | 2,26 | 2,61 |
| | ERRO MÉDIO QUADRÁTICO MENSAL (°C ²) | | | |
| | JUNHO 2010 | | DEZEMBRO 2010 | |
| | <i>E</i> constante | <i>E</i> variável | <i>E</i> constante | <i>E</i> variável |
| T1 | 0,30 | 2,60 | 4,68 | 9,14 |
| T2 | 0,12 | 1,94 | 3,99 | 6,91 |
| T3 | 0,26 | 2,23 | 2,97 | 5,09 |
| T4 | 0,24 | 2,03 | 5,63 | 8,34 |

CONCLUSÕES

Neste trabalho são mostradas duas simulações do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde, por meio da aplicação de um modelo unidimensional de transferência de calor. Utilizaram-se duas formulações para o coeficiente de difusão turbulenta na vertical, a primeira adotando um valor constante e a segunda aplicando uma correção a partir do número de Richardson e da profundidade da termoclina. Os resultados mostram que os erros obtidos nas simulações são maiores no mês de dezembro, quando ocorre estratificação, e menores em junho, quando a coluna está misturada. Os erros são devidos, principalmente, a pouca precisão das estimativas de fluxos de calor, calculados a partir de dados meteorológicos medidos em uma estação instalada próximo ao reservatório. Nos dois períodos estudados, junho e dezembro de 2010, o coeficiente de difusão turbulenta constante gerou resultados melhores que a formulação com o coeficiente variável. Esta formulação tem uma significativa dependência da velocidade do vento.

Os resultados obtidos indicam que a acurácia do modelo desenvolvido pode ser aprimorada, principalmente em relação ao modelo usado para estimar o coeficiente de difusão turbulenta na vertical e a posição da termoclina. A simulação correta do regime térmico de um reservatório é essencial para o conhecimento dos processos limnológicos, uma vez que a posição da termoclina representa uma informação importante para o estudo das condições do hipolímnio, possibilitando o conhecimento das variações da produção primária e, conseqüentemente, da variação do crescimento e/ou morte da biomassa de fitoplâncton presente no reservatório.

REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C.V. *et al.* (2011). Caracterização geral da bacia. In: *Eutrofização em reservatórios. Estudo interdisciplinar na bacia do Rio Verde*. Org. por Cunha, C.L.N. *et al.*, ed. UFPR, Curitiba - PR, pp. 39-58.
- ANTONOPOULOS, V. Z; GIANNIOU, S. K. (2003). Simulation of water temperature and dissolved oxygen distribution in Lake Vegoritis, Greece. *Ecological Modelling* 160 (1-2), pp. 39-53.
- BABAJIMOPOULOS, C.; PAPADOPOULOS, F. (1986). Mathematical prediction of thermal stratification of lake Ostrovo (Verigotis, Greece). *Water Resources Research* 22 (11), pp. 1590-1596.
- CANCELLI, D.M. (2006). *Um modelo para a evolução térmica de lagos profundos*. Dissertação (Mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CAPRARIIS, P. (1981). A note on the development of the thermocline in temperate lakes. *Ecological Modelling* 12 (4), pp. 213-219.
- FEE, E.J. *et al.* (1996). Effects of lake size, water clarity, and climatic variability on mixing depths in Canadian Shield lakes. *Limnology and Oceanography* 41 (5), pp. 912-920.
- FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. L. N. (2013). Simulação Numérica do Comportamento Térmico do reservatório do Rio Verde. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. Aceito para publicação em 09/04/2013.
- GORHAM, E.; BOYCE, F.M. (1989). Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline. *Journal Great Lakes Research* 15 (2), pp. 233-245.
- HENDERSON-SELLERS, B. (1976). Role of eddy diffusivity in thermocline formation. *Journal of the Environmental Engineering Division* 102 (EE3), pp. 517-530.
- HENDERSON-SELLERS, B. (1984). *Engineering limnology*. London: Pitman Publishing.
- LAM, D.C.L.; SCHERTZER, W.M. (1987). Lake Erie thermocline model results: comparison with 1976-1982 data and relation to anoxic occurrences. *Journal Great Lakes Research* 13 (4), pp. 757-769.
- MCCORMICK, M. J.; SCAVIA, D. (1981). Calculation of vertical profiles of lake-averaged temperature and diffusivity in lakes Ontario and Washington. *Water Resources Research* 17 (2), pp. 305-310.
- MOMMI, K.; ITO, Y. (2008). Heat budget estimates for Lake Ikeda, Japan. *Journal of Hydrology* 361 (3-4), pp. 362-370.
- PEREIRA, A.; TASSIN, B. (1995). Modelagem matemática do regime térmico do reservatório do Tucuruí. *Revista Brasileira de Engenharia (RBE) - Caderno de Recursos Hídricos* 13 (1), pp. 57-76.
- SUNDARAM, T.; REHM, R. (1973). The seasonal thermal structure of deep temperate lakes. *Tellus* 25 (2), pp. 157-168.
- THOMANN, R.V.; MULLER, J.A. (1987). *Principle of surface water quality modeling and control*. New York: Harper Collins.
- WETZEL, R. G. (1981). *Limnologia*. Barcelona: Eiciones Omega. 679 p.