

MODELAGEM AMBIENTAL DO RESERVATÓRIO DO RIO VERDE – ESTUDO PRELIMINAR

Gabriela Pacheco Corrêa^{1} & Cynara Lourdes Nóbrega da Cunha²*

Resumo – Como um importante instrumento na gestão de recursos hídricos em reservatórios, estudos voltados à qualidade da água têm por objetivo analisar o comportamento e os mecanismos de transporte de nutrientes no meio, de modo que os resultados auxiliam as decisões que asseguram as demandas hídricas atuais e futuras em padrões qualitativos e quantitativos adequados aos usos da água. Dentro desse contexto, o parâmetro de temperatura destaca-se pela influência na variação da densidade da água e, por consequência, nas alterações dos processos de transporte. No presente trabalho, é apresentado um estudo preliminar da modelagem ambiental do reservatório do Rio Verde/PR através do modelo de qualidade da água do SisBaHiA[®] para o parâmetro de temperatura em 2DH no período de 27/02/2010 a 11/07/2010. Os resultados obtidos foram confrontados com dados medidos em campo. A simulação da variação diária da temperatura mostrou um leve resfriamento próximo ao rio Verde (região mais rasa e com característica lótica) no mês de março, quando o reservatório está estratificado. O contrário foi verificado no mês de maio, quando o reservatório está misturado. Apesar da falta de dados ambientais para que se promovesse uma melhor calibração do modelo, uma boa concordância foi alcançada.

Palavras-Chave – Modelagem ambiental; SisBaHiA[®]; Reservatório do Rio Verde.

ENVIRONMENTAL MODELING OF RIO VERDE RESERVOIR – PRELIMINARY STUDY

Abstract – As an important instrument in the water resources management of reservoirs, studies focused on water quality aims to analyze the behavior and the mechanisms of nutrient transport in order to produce results which assist decisions that ensure the current and future water demands, according to appropriate water uses standards of quality and quantity required. In this context, the temperature parameter is distinguished by influencing the density range and therefore changes in the transport processes. This paper presents a preliminary study of environmental modeling reservoir of Rio Verde/PR through the 2DH water quality model of SisBaHiA[®] for temperature in the period from 2010/02/27 to 2010/07/11. The results were compared with field data measured. The simulation of daily temperature range showed a slight cooling near the Rio Verde (shallower region and with lotic characteristic) in March, when the reservoir is stratified. The opposite was observed in May, when the reservoir is mixed. Despite the lack of environmental data to promote a better calibration, a good level of agreement was achieved.

Keywords – Environmental modeling; SisBaHiA[®]; Rio Verde reservoir

INTRODUÇÃO

Estudos voltados à qualidade da água em reservatórios têm por objetivo entender os mecanismos de transporte e mistura dos nutrientes para que, dessa forma, análises de cenários em diferentes horizontes temporais e espaciais gerem uma aproximação mais fidedigna ao que se observa no ambiente natural. O conhecimento do padrão de circulação hidrodinâmica é de

^{1*} Pós-graduanda em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. Fone: +55(41)3320-2027. E-mail: gabrielapaco@yahoo.com.br

² Professora. Departamento de Engenharia Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR. Fone: +55(41)3320-2027. E-mail: cynara@ufpr.br

fundamental importância para o entendimento dos processos de transporte de nutrientes, através da advecção, ligada às velocidades na escala resolúvel, e da difusão turbulenta, também chamada de dispersão, dada pelo movimento randômico das partículas do meio. (CHAPRA, 1997).

A representatividade de cada parcela do transporte de nutrientes está intrinsecamente ligada à resposta do corpo hídrico aos fatores externos, como a radiação solar e o vento, variáveis relacionadas à estratificação térmica do sistema. Nos momentos de estabilidade, ou seja, quando a circulação vertical é pouco significativa, pode ocorrer o fenômeno de estratificação térmica, no qual as diferenças de densidade ao longo do perfil interferem no transporte de nutrientes, gerando processos físicos, químicos e biológicos distintos no epilimnio e no hipolimnio. Em momentos de instabilidade térmica, a energia do vento pode ser suficiente para promover a mistura da coluna d'água. (ESTEVES, 1998). Em termos de modelagem matemática, essa característica no comportamento hidrodinâmico é traduzida geralmente na dimensão espacial do domínio em 2DH, quando as variações verticais das grandezas hidrodinâmicas não são significativas, como no caso de reservatórios mais rasos e em situações que as substâncias estão bem misturadas na coluna d'água, ou em modelos tridimensionais, quando as variações verticais são significativas.

A temperatura influencia a variação da densidade da água e, por consequente, as alterações dos processos de transporte. Por esse motivo, o conhecimento da variação da temperatura do corpo d'água é relevante e pode ser usado como parâmetro de calibração para as variáveis relacionadas ao transporte difusivo e advectivo e ainda, a sua determinação é importante nos processos de transformações, já que a temperatura influencia também na cinética das reações químicas e biológicas. Outro ponto de relevância se deve à descarga de efluentes em diferentes temperaturas, o que pode causar efeitos negativos no ecossistema aquático.

Alguns modelos específicos de temperatura podem ser encontrados na literatura. Culberson & Piedrahita (1996) apresentam um modelo, onde a temperatura é modelada junto com o oxigênio dissolvido, permitindo verificar a influência da mesma nas reações químicas ligadas ao oxigênio. O modelo CE-QUAL-W2, desenvolvido pela *US Army Corps of Engineers* permite a simulação das variações hidrodinâmicas e de qualidade das águas, inclusive temperatura, ao longo dos eixos longitudinal e vertical. (GASTALDINI et al., 2001). O presente trabalho utilizou o SisBAHiA[®] Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental), um modelo que tem sido desenvolvido desde de 1987 pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Neste artigo é mostrada a implementação da modelagem bidimensional de qualidade no reservatório do Rio Verde, com destaque para a temperatura (CUNHA et al., 2011). A simulação foi realizada entre os dias 27/02/2010 e 11/07/2010. Neste período, através do Projeto Interdisciplinar de Pesquisa sobre Eutrofização de Águas na Bacia do Rio Verde, foram feitas medições de temperatura em um ponto do reservatório próximo à barragem. Os resultados obtidos pelo modelo foram confrontados com dados de campo medidos na estação do reservatório, e apesar da falta de dados ambientais para que se promovesse uma calibração do modelo, apresentaram uma boa concordância.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia do rio Verde, localizada na porção oeste da Região Metropolitana de Curitiba (RMC). A barragem do rio Verde foi construída entre os anos de 1974 e

1976 pela Petróleo Brasileiro S. A (PETROBRAS) com a finalidade de atendimento da Refinaria Presidente Getúlio Vargas (REPAR). Passados 28 anos, este reservatório conta com 6.750 m³/h de vazão regularizada, e de duas outorgas, a da própria PETROBRAS, com 3.024 m³/h e a da Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), que será utilizada para abastecimento público com 900 m³/h (DOETZER *et al*, 2009). Na Figura 1 é apresentada a localização da área de estudo, com destaque para o domínio do modelo e a malha usada pelo SisBAHiA[®] e para a estação de monitoramento de qualidade de água R4.

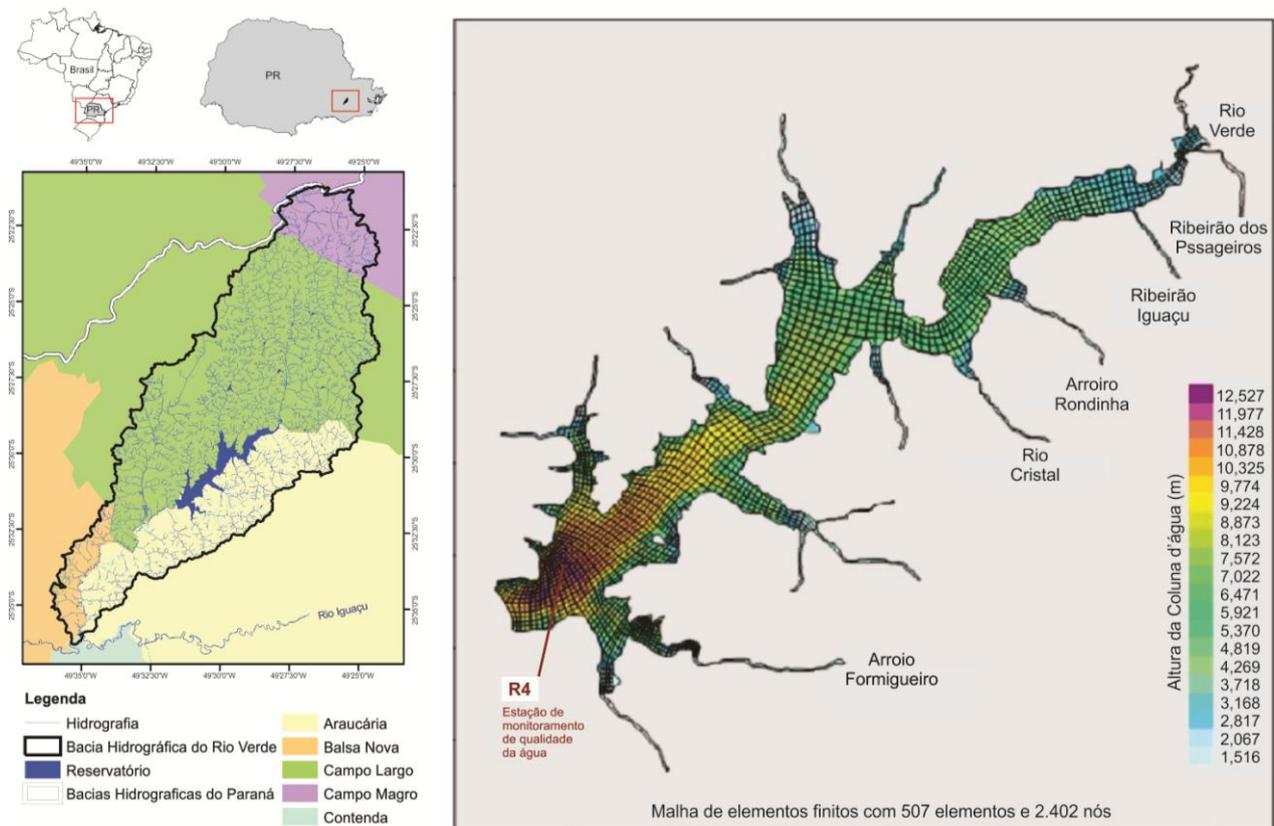


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Verde, PR, e malha de elementos finitos do modelo SisBAHiA[®]

Modelo SisBAHiA[®]

O SisBAHiA[®] é usado na modelagem de corpos de água costeiros e continentais, sendo constituído por vários modelos. Maiores detalhes em www.sisbahia.coppe.ufrj.br. O modelo de qualidade da água e eutrofização do SisBAHiA[®], que é usado neste trabalho, é um modelo de transporte euleriano advectivo-difusivo integrado na vertical, para escalares não-conservativos, ou seja, que sofrem modificação de concentração através de processos físicos, químicos e biológicos. Neste caso, o campo de velocidades usado é médio na vertical, não permitindo a descrição do perfil de velocidades.

O modelo de qualidade de água consiste na solução da equação do balanço de massa para cada substância constituinte do modelo. Basicamente o modelo de qualidade de água resolve a equação do balanço de massa para várias substâncias relacionadas, ou seja, resolve um modelo de transporte euleriano para cada constituinte. A descrição do modelo de qualidade de água usado neste trabalho pode ser encontrada em Cunha *et al.* (2006). Muitos modelos de qualidade de água simulam as mudanças (trocas) de concentração considerando a substância inerte, ou seja, sua

concentração só se altera por diluição. Entretanto, a maioria das substâncias encontradas na água muda a sua concentração devido a processos químicos, físicos e biológicos. O entendimento e o modelamento destes processos são importantes na construção de modelos de qualidade de água de substâncias não-conservativas. Estas relações podem ser primárias ou secundárias. Um exemplo de uma relação primária é o crescimento das algas e a sua relação com a intensidade de luz e com a variação de nutrientes. A correção da temperatura sendo necessária para definir o crescimento e a respiração das algas é um exemplo de relação secundária.

Modelo Hidrodinâmico

O domínio definido na modelagem é mostrado na Figura 1, onde também pode ser observada a malha de elementos finitos quadráticos usada na discretização do domínio. A batimetria do reservatório, apresentada na Figura 1, foi obtida a partir de medições realizadas em 2008. Na simulação do padrão de circulação hidrodinâmico foram consideradas vazões de entrada e saída do reservatório estimadas pelo modelo chuva-vazão SWAT para os 14 tributários do reservatório, seguindo a metodologia adotada em Cunha *et al.* (2011) entre os dias 27/02/2010 e 11/07/2010, como o principal forçante, uma vez que a circulação é regida principalmente pelo afluxo e efluxo e pelo vento. A vazão de captação da REPAR foi considerada constante durante todo período e a vazão do vertedouro representou a diferença entre as entradas e as saídas do sistema. Os dados de vento utilizados, direção e velocidade, foram medidos na estação de meteorológica instalada junto à tomada d'água da REPAR. Considerou-se o campo de vento uniforme no espaço, mas variando ao longo do tempo, com valores definidos a cada 15 minutos. O período simulado compreende os dias 135 dias no total.

O coeficiente de atrito do fundo pode ser calculado via coeficiente de Chèzy. Este coeficiente depende da amplitude da rugosidade equivalente de fundo, definida a partir da composição e da distribuição de sedimentos no fundo (ABBOT e BASCO, 1989). Os dados de rugosidade de fundo consideraram um valor maior na porção do reservatório com grande número de árvores submersas, na ordem de até 0,25 m. Nas demais regiões do reservatório foram consideradas a predominância de sedimentos argilo-siltosos, com valores mínimos de 0,013 m. O volume do reservatório foi calculado previamente pelo estudo de Gobbi e Nocko (2011), através da campanha de medição da batimetria feita nos dias 07 a 10 de abril de 2008 e pelas cartas topográficas da época em que o reservatório não existia. Neste artigo não serão apresentados os resultados das simulações hidrodinâmicas, que foram anteriormente e apresentadas em Cunha *et al.* (2011).

Modelo de Qualidade da Água

O modelo de qualidade de água do SisBAHiA[®] considera o ciclo do oxigênio, do nitrogênio e do fósforo, além da temperatura e clorofila-a. Os processos cinéticos de transformações incluem fotossíntese, respiração, desnitrificação, nitrificação, oxidação, reaeração, decaimento e deposição (MUHAMMETOGLU e SOYUPAK, 2000). Em sua maior parte, estes processos são modelados usando reações de primeira ordem, estabelecendo valores dentro de uma faixa específica. Com isso, são grandes as incertezas sobre estes processos de transformações. A calibração do modelo de qualidade de água passa obrigatoriamente pela correta definição destes coeficientes. O SisBAHiA[®] resolve a equação de advecção-difusão para cada substância, separadamente. Esta equação é formada por três parcelas: o transporte advectivo, o transporte difusivo e os processos de transformação e é dada por (SHENG e VILLARET, 1989):

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + U_i \frac{\partial C_m}{\partial x_i} = \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(H \left[D_{ij} \delta_{jk} + \frac{\Lambda_k^2}{12} \left| \frac{\partial U_j}{\partial x_k} \right| \right] \frac{\partial C_m}{\partial x_k} \right) \pm \Sigma R \quad (1)$$

onde C_m é a concentração da substância de interesse, U_i são as componentes da velocidade na direção x_i promediadas na direção vertical, ΣR representa as fontes/sumidouros de massa integradas na direção vertical, H é a altura da coluna d'água, D_{ij} é o tensor que representa o coeficiente de difusão turbulenta de massa, δ_{jk} representa o delta de Kronecker e $\Lambda_k = \alpha_k \Delta x_k$ é a largura do filtro na dimensão x_k . Na equação (1), $i, j = 1, 2$, $k = 1, 2, 3$, sendo $k = 3$ correspondente ao tempo t , e m é interpretado como variável para cada substância. Maiores detalhes podem ser obtidos em Cunha *et al.* (2006).

As reações cinéticas envolvidas nos processos de transformação, considerando apenas a temperatura é:

$$\frac{\partial C_T}{\partial t} = \frac{Hn}{\rho c H} \quad (2)$$

onde Hn é o fluxo de energia na interface ar-água ($\text{cal}/\text{cm}^2/\text{dia}$), ρ é a massa específica da água (kg/m^3) e c é a energia específica ($\text{cal}/\text{kg } ^\circ\text{C}$). As demais reações podem ser obtidas em Rosman (2011).

Os dados de temperatura do ar, radiação solar e umidade relativa do ar usados para alimentar o modelo de qualidade de água foram medidos na estação de meteorológica instalada junto à tomada d'água da REPAR, com valores definidos a cada 15 minutos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da modelagem da variação da temperatura no reservatório do Rio Verde devem ser considerados quantitativamente, visto que foi possível fazer a calibração e validação do modelo dentro do intervalo de tempo simulado. As medições disponíveis para comparação referem-se ao ano de 2010, sendo necessário alimentar o modelo com dados referentes a este período. Os dados relativos às trocas de calor na interface ar-água foram coletados neste período, as curvas de variação da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e da radiação solar, usadas pelo modelo de qualidade de água, são baseadas em registros de uma única estação meteorológica localizada junto à tomada d'água da REPAR, sendo considerada uma distribuição uniforme destes parâmetros. Tal fato pode explicar a diferença encontrada entre os valores de temperatura medidos e os calculados pelo modelo. Ressalta-se que com um trabalho de ajustamentos pode-se obter uma melhor concordância entre as medições e os resultados obtidos pelo modelo, aumentando assim o caráter quantitativo da modelagem.

O período de simulação de 135 dias permite uma avaliação das transformações identificadas para a temperatura. A partir da distribuição espacial da temperatura em dois momentos, em 10 de março de 2010, observa-se um leve resfriamento quando se compara os instantes 12:00 hs e 00:00 hs, com a temperatura máxima reduzindo (Figura 2). As pequenas variações de temperatura são mais expressivas na região próxima ao rio Verde, que corresponde à região mais rasa e com característica lótica do sistema. Na porção próxima a barragem, na região mais profunda do reservatório, a temperatura manteve-se constante. A análise diária em 10 de maio de 2010, para os instantes 12:00 hs e 00:00 hs apresenta uma variação oposta daquela vista em março. Na região mais rasa do reservatório não se observou uma variação de temperatura, ao contrário do que se

verifica na região mais profunda, com uma pequena diminuição da temperatura quando se analisa a variação diária, como mostra a Figura 3. Esse comportamento para as variações diárias dos meses de março e maio está condizente com as medições de temperatura realizadas ao longo do perfil vertical do reservatório na estação R4, localizada na parte mais interna do reservatório onde as profundidades são maiores. Na Figura 4 é possível identificar uma variação da temperatura na direção vertical, maior no mês de março, ao contrário do que se observa em maio, quando o reservatório não sofreu variações térmicas verticais diárias. Isso expressa o efeito de resposta do corpo hídrico aos fatores de radiação solar e vento, demonstrando uma estratificação térmica em março e uma coluna d'água misturada em maio.

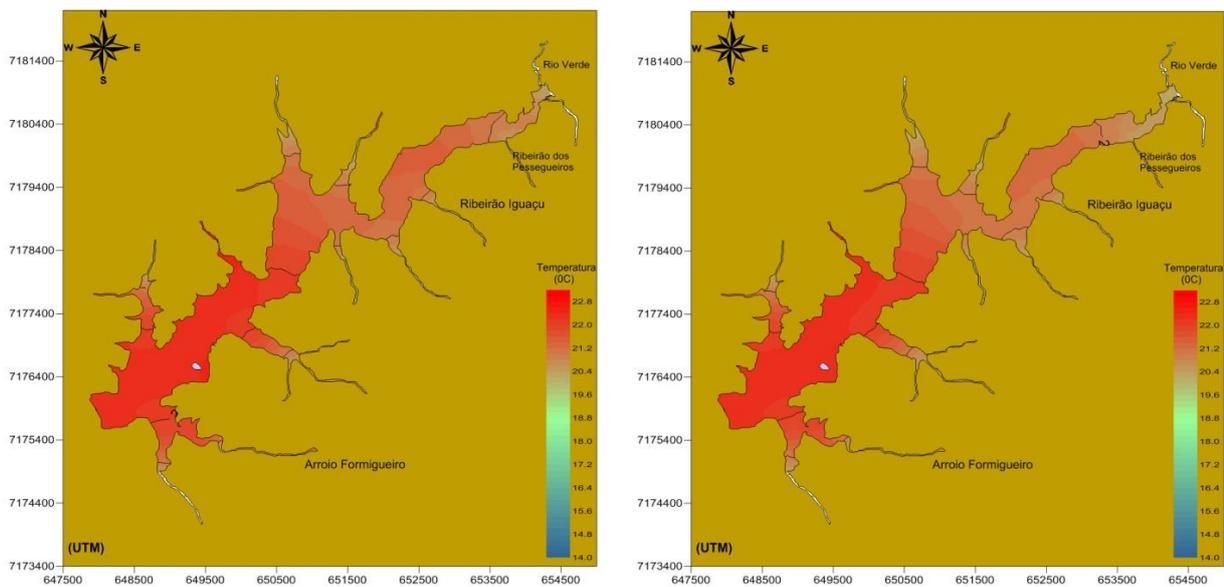


Figura 2 – Distribuição de temperatura simulada pelo SisBaHiA[®] no dia 10 de março de 2013, as 12:00hs (Intervalo de variação: 20,3 a 22,6 °C) e 24:00 hs (Intervalo de variação: 20,3 a 22,3 °C)

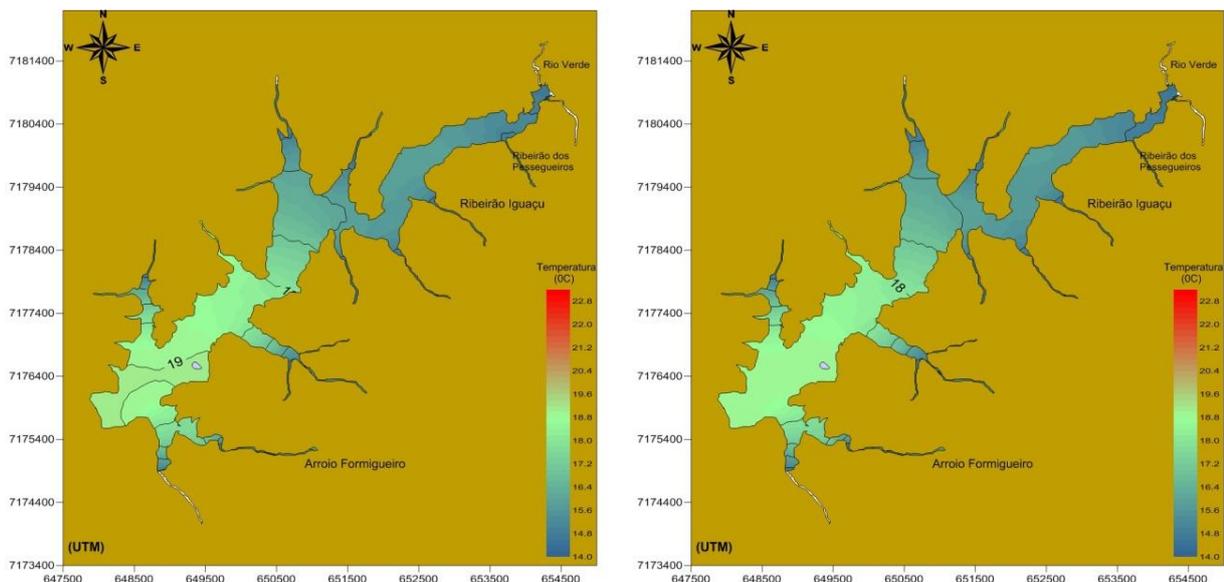


Figura 3 – Distribuição de temperatura simulada pelo SisBaHiA[®] no dia 10 de maio de 2013, as 12:00hs (Intervalo de variação: 14,6 a 19,2°C) e 24:00 hs (Intervalo de variação 14,5 a 19,0 °C)

A Figura 4 mostra a comparação entre os resultados obtidos pelo SisBaHiA[®] e os dados medidos. É possível observar que o modelo consegue descrever a tendência observada nos dados, mesmo considerando que o modelo é bidimensional e, portanto, calcula a temperatura média. Neste sentido, é correto afirmar que o modelo consegue bons resultados no período onde não acontece estratificação (mês de maio), mas nos intervalos onde a coluna d'água se apresenta estratificada, o modelo pode apresentar erros importantes. Observando a região do reservatório localizada na parte mais próxima ao rio Verde, onde as profundidades são menores, as temperaturas se apresentam estáveis, com uma queda no final do período simulado. Comparando os dados medidos e os resultados calculados pelo SisBaHiA[®], nota-se uma boa concordância entre os valores. No início do inverno há uma pequena amplificação nos valores obtidos pelo SisBaHiA[®] em relação aos valores medidos.

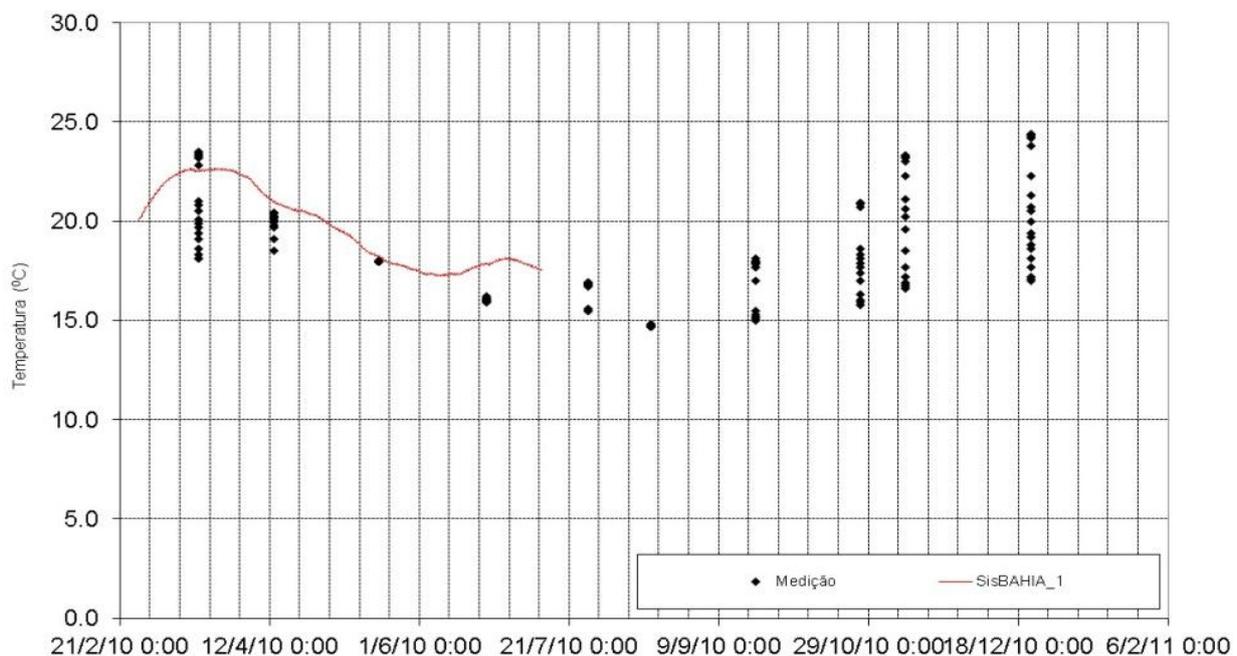


Figura 4 – Valores de temperatura medidas na estação R4 e obtidas numericamente pelo SisBaHiA[®].

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados neste trabalho mostram que o estudo preliminar da modelagem ambiental do reservatório do Rio Verde é adequado e pode ser usado de modo quantitativo. Pode-se considerar a modelagem da variação de temperatura com base na simulação de outros parâmetros de comportamento semelhante, como o oxigênio dissolvido. Considerando que o transporte advectivo e difusivo é independente do parâmetro modelado, com a correta definição dos processos químicos, físicos e biológicos envolvidos em cada parâmetro de qualidade de água é possível, a partir desta modelagem, caracterizar a distribuição de outros parâmetros de qualidade de água no reservatório do Rio Verde. Por outro lado, o conhecimento dos valores de temperatura no reservatório é necessário na correção das variáveis envolvidas nos processos químicos, físicos e biológicos, que variam fortemente com a temperatura. Os resultados obtidos pelo modelo quando são comparados com os dados medidos em campo, mesmo considerando que o padrão de circulação hidrodinâmico do modelo não tenha sido calibrado, mostram que o sistema apresentado é capaz de responder aos objetivos deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOT, M. B. AND BASCO, R. (1989). *Computational Fluid Mechanics, An Introduction for Engineering*. Longman Group, UK Limited.
- CHAPRA, S. C. (1997). Diffusion. In: *Surface water quality modeling*. Ed. Waveland Press, Long Grove, Illinois, p 137-157.
- CUNHA, C.L.N.; FRANZ, G.; SOARES, A.P.K.; GONÇALVES, J.E.; ROSMAN, P.C.C. (2011) Hidrodinâmica e transporte no reservatório Rio Verde. In: *Eutrofização em Reservatórios: Gestão Preventiva. Estudo Interdisciplinar na Bacia do Rio Verde*. Org. por Cunha, C.L.N., Gobbi, E.F., Cleverson V.A. e Carneiro C., ed. UFPR, Curitiba-PR, v.1, pp. 249-282
- CUNHA, C. L. N.; ROSMAN, P. C. C.; FERREIRA, A. P.; MONTEIRO, T. C. N. (2006) Hydrodynamics and water quality models applied to Sepetiba Bay. *Continental Shelf Research*, v. 26, pp. 1940-1953.
- DOETZER, B. H. W.; BERTHOL, O.; BUBLITZ, U.; CARNEIRO, S. (2009). Diagnóstico e Avaliação Agropecuárias na Bacia do Rio Verde. Relatório Semestral nº03. In: *Projeto Interdisciplinar sobre Eutrofização na Bacia do Rio Verde*.
- ESTEVES, F. A. (1998). Papel da Água e da Limnologia na Sociedade Moderna. A Radiação Solar e seus Efeitos em Ecossistemas Aquáticos Continentais. In: *Fundamentos de Limnologia*. Ed. Interciência/FINEP, Rio de Janeiro-RJ, pp.47-55 e pp. 123-140.
- GASTALDINI, M. C. C.; PAZ, M. F.; THOMAZ, F.; KRAEMER, M. C. N. (2001). Simulação de Oxigênio Dissolvido e da Temperatura no Reservatório do Arroio Vacaraí-Mirim Utilizando o Modelo CE-QUAL-W2. In: *Anais do 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, João Pessoa-PB, Set.2001, v.1, pp. 1-9.
- GOBBI, M. F.; NOCKO, H. (2011). Capacidade de Abastecimento do Reservatório do Rio Verde. In: *Eutrofização em Reservatórios: Gestão Preventiva. Estudo Interdisciplinar na Bacia do Rio Verde*. Org. por Cunha, C.L.N., Gobbi, E.F., Cleverson V.A. e Carneiro C., ed. UFPR, Curitiba-PR, v.1, pp. 145-168.
- ROSMAN, P. C. C. (2011) Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL, Programa COPPE: Engenharia Oceânica, Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Rio de Janeiro, Brasil: www.sisbahia.coppe.ufrj.br/SisBAHIA_RefTec_V92.pdf.
- MUHAMMETOGLU, A. B.; SOYUPAK, S. (2000). A three-dimensional water quality-macrophyte interaction model for shallow lakes. *Ecological Modelling*, v. 113, pp. 161-180.
- SHENG, Y. P.; VILLARET, C. Modeling the effect of Suspended Sediment Stratification on Bottom Exchange Processes. *Journal Geophys. Res.*, v. 94, pp.1429-1444.