

## Aplicação de Modelo Matemático a Dados de Ciclos de Estratificação Térmica e de Qualidade da Água do Reservatório do Vacacaí-Mirim

Maria do Carmo Cauduro Gastaldini, Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, João Batista Dias de Paiva

Márcio Ferreira Paz, Maria Cláudia Nunes Kraemmer

Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro de Tecnologia, UFSM - 97105-900 Santa Maria, RS

mcarmo@ct.ufsm.br

Recebido: 18/11/02 – revisado: 12/05/03 – aceito: 26/04/04

---

### RESUMO

Nos lagos e reservatórios profundos de clima tropical ocorre, normalmente, estratificação térmica no período de verão. A permanência ou semi-permanência da estratificação térmica determina, que a esta se superponham estratificações químicas e biológicas. O trabalho de modelagem matemática da qualidade da água, nesses corpos d'água, está na dependência direta da modelagem da estrutura térmica. O reservatório do Vacacaí-Mirim apresenta ciclos de estratificação térmica, que iniciam na primavera e acabam no outono. Dos modelos disponíveis na literatura um dos que melhor se adapta as características do reservatório do Vacacaí-Mirim é o CE-QUAL-W2. Este modelo é bidimensional com médias laterais, foi desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers e combina, diretamente, os algoritmos da hidrodinâmica e da qualidade da água. Realizou-se levantamentos de perfis de oxigênio dissolvido e temperatura no ponto de maior profundidade do reservatório do Vacacaí-Mirim, no ano de 1999. O modelo CE-QUAL-W2 foi calibrado e os perfis de temperatura e oxigênio dissolvido foram satisfatoriamente previstos pelo modelo, reproduzindo a variação dos ciclos de estratificação durante o ano.

**Palavras-chave:** modelagem matemática, qualidade da água, estratificação de reservatório

---

### INTRODUÇÃO

Nos lagos e reservatórios os problemas de qualidade da água diferem daqueles que ocorrem nos rios e estuários, devido à variação da escala temporal-espacial dos fenômenos, embora os elementos que contribuem para a existência dos problemas, na maioria das vezes, sejam os mesmos.

A estratificação térmica ocorre nos lagos e reservatórios quando a turbulência é insuficiente para destruir o aquecimento diferenciado das camadas superiores. A consequência mais notável desse fenômeno diz respeito à qualidade da água, uma vez que o estabelecimento da estratificação produz reduções substanciais no transporte de massa na direção vertical, gerando situações bastante diferenciadas no epilânio e no hipolânio. Portanto, o trabalho de modelagem matemática da qualidade da água nos lagos e reservatórios estará na dependência direta da modelagem de sua estrutura térmica.

Dentre as variáveis de qualidade da água, a que fornece informações mais imediatas sobre o estado dos sistemas aquáticos, por si só, é o oxigênio dissolvido.

O objetivo deste trabalho é simular os perfis verticais da temperatura e do oxigênio dissolvido no ponto de maior profundidade do reservatório do Vacacaí-Mirim utilizando o modelo CE-QUAL-W2.

### O RESERVATÓRIO DO VACACAÍ-MIRIM

O reservatório do Vacacaí Mirim está situado na cidade de Santa Maria, centro geográfico do Estado do Rio Grande do Sul, nas coordenadas geográficas 29° 40' 31" de latitude sul e 53° 47' 6" de longitude oeste. A bacia é caracterizada por área em urbanização na margem direita do reservatório e área rural na margem esquerda. Suas principais utilizações atuais são abastecimento doméstico, uma vez que é responsável por 40% do abastecimento de água de Santa Maria, e recreação de contato primário, pois estão situados nas suas margens dois clubes de lazer. A figura 1 mostra uma fotografia aérea do reservatório do Vacacaí-Mirim e bacia hidrográfica contribuinte.

Na margem esquerda, próximo à barragem, estão situados dois clubes de campo, ambos possuem sistemas de tratamento dos efluentes líquidos gerados, não causando, até o momento, maiores problemas de poluição. As áreas à montante destes se caracterizam por pequenas propriedades com atividades agrícolas e pecuárias. Os efluentes destas atividades, carregados pelas chuvas, são lançados "in natura" no reservatório. A água começa a apresentar sinais de poluição visual. Existe uma proliferação acentuada de aguapés, que aumenta principalmente nos meses de verão. Próximo à afluência do rio principal, à montante, está se desenvolvendo uma área com ocupações

clandestinas. Essas invasões têm causado preocupações, uma vez que as pessoas que habitam estes locais consomem a água do reservatório e córregos afluentes, sem tratamento, e lançam os seus dejetos nas proximidades, possuindo um nível de vida bastante precário do ponto de vista sanitário. A água apresenta-se visualmente poluída com odor desagradável.



**Figura 1 - Vista aérea do reservatório do Vacacaí-Mirim e bacia hidrográfica contribuinte (foto: Paulo Carvalho)**

A margem direita do reservatório é caracterizada por área urbana com médio grau de ocupação, ruas sem calçamento e urbanização desordenada sem sistema público de coleta de esgotos. Próximo à barragem está se desenvolvendo uma zona de invasões com moradias precárias e sem infraestrutura sanitária.

## PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DO RESERVATÓRIO DO VACACAÍ-MIRIM

A morfologia de um ambiente aquático exerce grande influência nas suas características limnológicas. A distribuição de substâncias e organismos num corpo d'água é regulada pela dinâmica de circulação e estratificação e existe forte vinculação desta com as características morfológicas do reservatório.

Dentre os parâmetros morfométricos destacam-se a área, o volume, as profundidades (máxima, média e relativa), o desenvolvimento das margens e o número de Froude densimétrico, que possuem maior significado limnológico. Von Sperling (1999) apresenta discussão detalhada destes parâmetros.

A área do reservatório, que é a superfície de exposição do espelho da água à radiação solar, regula o processo de fotossíntese, ou seja, a atividade de produção primária. A área relaciona-se, também, com os fenômenos hidrológicos de precipitação e evaporação. As cargas superficiais de nutrientes/poluentes lançadas num lago são

expressas por unidade de área, permitindo comparação entre corpos d'água.

O volume do reservatório está associado à dimensão dos compartimentos aquáticos e à capacidade de diluição, que aumenta com o mesmo.

A profundidade de um reservatório tem grande importância no padrão de circulação e na distribuição de organismos e compostos químicos na coluna d'água. Pequenas profundidades conduzem a reservatórios com maior produtividade primária. Ambientes com profundidades máximas acima de 10-20 m são classificados como profundos (Vollenweider e Kerekes, citado por von Sperling (1999)). O ponto de profundidade máxima é denominado ponto limnológico, sendo local obrigatório de amostragem.

A profundidade média é elemento indispensável nos modelos de balanço de massa, que relacionam a carga afluente de uma substância com sua concentração no corpo d'água. O processo de difusão vertical num reservatório pode ser correlacionado com sua profundidade média.

A profundidade relativa, que é dada pelo quociente entre a profundidade máxima e o diâmetro médio do lago, é um parâmetro útil para descrever o padrão de circulação. Lagos com elevada profundidade relativa possuem dificuldade na circulação integral da coluna d'água, apresentando, portanto, anaerobiose permanente nas camadas profundas e águas normalmente transparentes. Quando a profundidade relativa não for muito elevada (2 a 5%) o lago pode circular completamente, quando houver incidência de ventos de grande intensidade.

O desenvolvimento das margens, dado pela relação entre o perímetro do lago e a circunferência de um círculo de mesma área, mostra o grau de irregularidade do corpo d'água. Um aumento nesta grandeza propicia o desenvolvimento de vegetação litorânea, aumentando a capacidade de assimilar poluentes. No entanto, favorece também a formação de focos de eutrofização.

O número de Froude densimétrico relaciona as forças de inércia e a força gravitacional que tende a manter a estabilidade densimétrica. É um adimensional que reúne as principais características, estratificação e morfometria, para classificação dos reservatórios. É expresso matematicamente pela equação (1).

$$Fd = \frac{LQ}{HV} \sqrt{\frac{\rho}{g\beta}} \quad (1)$$

onde Fd é o número de Froude densimétrico, L é o comprimento do reservatório, Q é a vazão, H é a profundidade média, V é o volume,  $\rho$  é a massa específica da água na superfície, g é a aceleração da gravidade e  $\beta = \Delta\rho/H$  é o gradiente médio de densidade.

Transformando a equação (1) para unidades convenientes (L em km, V em  $10^6$  m<sup>3</sup>, Q em m<sup>3</sup>/s, H em m) e adotando para o gradiente de massa específica o valor  $\Delta\rho/H = 0,9843 \cdot 10^{-6}$  (US Army citado por Tucci, 1998), obtém-se a equação (2).

$$Fd = 0,322 \frac{LQ}{HV} \quad (2)$$

Reservatórios fortemente estratificados possuem  $Fd \ll 1/\pi$ , reservatórios com fraca estratificação apresentam  $0,1 < Fd < 1,0$  e sistemas completamente misturados possuem  $Fd > 1,0$  (Nogueira, 1991).

As características morfométricas do reservatório do Vacacaí-Mirim são apresentadas na tabela 1. Observa-se que, de acordo com sua profundidade máxima, o reservatório em estudo é considerado profundo. Sua profundidade relativa indica que suas águas podem circular completamente, quando houver incidência de ventos de grande intensidade. O baixo índice de desenvolvimento das margens sugere, que sua forma apresenta baixa capacidade de assimilar poluentes.

**Tabela 1 - Características do Reservatório do Vacacaí-Mirim**

Q	V	P	HM	H	HR	A	IDM	T	Fd
0,5	3,8	6,4	15	4,5	1,5	0,74	2,1	87	0,02

Q = vazão média (m<sup>3</sup>/s)  
V = volume do reservatório ( $10^6$  m<sup>3</sup>)  
P = perímetro ( $10^3$  m)  
HM = profundidade máxima (m)  
H = profundidade média (m)  
HR = profundidade relativa (%)  
A = Área de inundação ( $10^6$  m<sup>2</sup>)  
IDM = índice de desenvolvimento das margens  
T = tempo de residência (dias)  
Fd = número de Froude densimétrico

Fonte: Paiva et al (1998), Gastaldini et al (2001)

Com relação à dinâmica de circulação e estratificação, o tempo de residência sugere que o reservatório seja misturado. Entretanto, o número de Froude densimétrico indica que o mesmo apresentará forte estratificação devido a sua altura.

## O MODELO CE-QUAL-W2

Dos modelos disponíveis verificou-se que um que se adapta bem às características do reservatório do Vacacaí-Mirim é o CE-QUAL-W2. Este modelo é bidimensional com médias laterais. Foi desenvolvido pelo US Army

Corps of Engineers e combina diretamente os algoritmos da hidrodinâmica e da qualidade da água.

O modelo permite a simulação de variáveis hidrodinâmicas e de qualidade da água ao longo dos eixos longitudinal e vertical de um corpo d'água. É apropriado para aplicações onde as principais variações da qualidade da água ocorram ao longo desses eixos e as variações laterais sejam pequenas. O conceito da homogeneidade lateral pode ser apropriado para corpos d'água, particularmente longos, profundos e sistemas relativamente pequenos.

O CE-QUAL-W2 descreve distribuições verticais e longitudinais da energia térmica variáveis com o tempo e seleciona os principais materiais biológicos e químicos num corpo d'água. O modelo é baseado na solução por diferenças finitas das equações com médias laterais do movimento de fluidos, compondo-se de seis equações (Cole & Buchak, 1995, Chapra, 1997):

- A equação da quantidade de movimento na direção horizontal

$$\frac{\partial UB}{\partial t} + \frac{\partial UUB}{\partial x} + \frac{\partial WUB}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial BP}{\partial x} + \frac{\partial \left( BA_x \frac{\partial U}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{B\tau_x}{\partial z} \quad (3)$$

onde U, W são as velocidades médias longitudinal e vertical, respectivamente, (m/s); B é a largura do corpo d'água (m); t é o tempo (s); x, z são as coordenadas cartesianas longitudinal e vertical;  $\rho$  é a massa específica (kg/m<sup>3</sup>); P é a pressão (N/m<sup>2</sup>);  $A_x$  é o coeficiente de dispersão da quantidade de movimento longitudinal (m<sup>2</sup>/s);  $\tau_x$  é a tensão de cisalhamento (N/m<sup>2</sup>).

- Equação de transporte de constituintes

$$\frac{\partial B\phi}{\partial t} + \frac{\partial UB\phi}{\partial x} + \frac{\partial WB\phi}{\partial z} - \frac{\partial \left( BD_x \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)}{\partial x} - \frac{\partial \left( BD_z \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)}{\partial z} = q\phi B + S\phi B \quad (4)$$

onde  $\phi$  é a concentração do constituinte (média lateral) (g/m<sup>3</sup>);  $D_x$ ,  $D_z$  são os coeficientes de dispersão longitudinal e vertical para temperatura e constituintes (m<sup>2</sup>/s);  $q\phi$  é o fluxo de massa lateral (efluentes/afluentes dos constituintes) (g/m<sup>3</sup>.s);  $S\phi$  é o termo cinético dos constituintes (g/m<sup>3</sup>.s).

- Elevação da superfície livre da água

$$\frac{\partial B_{\eta} \eta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \int_{\eta}^h U B dz - \int_{\eta}^h q B dz \quad (5)$$

onde  $\eta$  é a elevação da superfície livre da água,  $B_{\eta}$  é a largura do corpo d'água na elevação  $\eta$  (m),  $q$  é a vazão lateral ( $m^3/s$ ).

- Equação da quantidade de movimento na direção vertical

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (6)$$

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial UB}{\partial x} + \frac{\partial WB}{\partial z} = qB \quad (7)$$

- Equação de estado

$\rho = F$  (temperatura, concentração de sólidos dissolvidos e em suspensão) (8)

Como pode ser visto, o modelo utiliza seis equações principais e seis incógnitas, o sistema é determinado e a solução é encontrada para cada instante.

O CE-QUAL-W2 tem a capacidade de incluir condições de contorno variáveis no tempo, múltiplos trechos, afluentes e retiradas de água laterais, e outras características que permitem sua aplicação a uma extensa variedade de situações. O modelo prevê a temperatura média para cada célula, baseado nos afluentes, efluentes, radiação solar, e na troca de calor da superfície. Uma aproximação da temperatura de equilíbrio é usada para descrever a troca de calor da superfície.

A versão utilizada permite simular mais de 20 constituintes da qualidade da água (traçadores conservativos, sólidos dissolvidos totais, ou salinidade, coliformes, sólidos inorgânicos em suspensão, matéria orgânica biodegradável, matéria orgânica recalcitrante, um grupo de algas, detritos, fósforo, amônia, nitrito-nitrato, oxigênio dissolvido, ferro, sedimentos, alcalinidade, carbono inorgânico total, pH, espécies carbonatadas), além da temperatura e da massa específica. Os constituintes de qualidade da água podem ser omitidos onde eles não forem requeridos, fornecendo flexibilidade na aplicação do modelo.

O CE-QUAL-W2 faz o cômputo dos termos do transporte advectivo através da solução das equações hidrodinâmicas. O coeficiente de dispersão longitudinal é invariável no tempo e no espaço. O modelo também calcula o coeficiente de dispersão vertical, o gradiente das velocidades longitudinais e as densidades da água.

## PERFIL VERTICAL DE TEMPERATURA E OXIGÊNIO DISSOLVIDO

A caracterização da qualidade da água na direção vertical do reservatório do Vacacaí-Mirim foi executada utilizando-se medidor portátil de Oxigênio Dissolvido e Temperatura. O aparelho possui um cabo de amostragem de 30 m, que permite traçar o perfil destes dois constituintes em profundidades variáveis. Possui um alcance na medição de temperatura de  $-5^{\circ}C$  a  $45^{\circ}C$  com precisão de  $0,1^{\circ}C$ , e de 0 a 20 mg/L para o oxigênio dissolvido com precisão de 0,03 mg/L. O perfil foi levantado no ponto de maior profundidade do reservatório.

Observou-se que nos meses de inverno as águas do reservatório apresentam-se desestratificadas com variação de temperatura de no máximo  $2^{\circ}C$  da superfície ao fundo. As concentrações de oxigênio dissolvido apresentam apenas leve abaixamento desde a superfície até profundidades próximas de 10 m. A 1 m do fundo ocorre anaerobiose. Na primavera começa a surgir a termoclina, que desaparece somente no outono. A termoclina surge a profundidades de 4 a 5 m da superfície da água, apresentando variação da temperatura de aproximadamente  $6^{\circ}C$ . O oxigênio dissolvido apresenta-se próximo da saturação somente a profundidades até 3 m, caindo a valores próximos de 4 mg/L até 1 m do fundo, onde ocorre anaerobiose. No verão o reservatório apresenta-se completamente estratificado, as variações de temperatura entre epilimínio e hipolimínio alcançaram até  $11^{\circ}C$  e as concentrações de oxigênio dissolvido atingiram valores próximos de 0 a partir de 5 m de profundidade, aumentando a região anaeróbia.

Comparado com outros reservatórios de clima tropical, verifica-se que o reservatório em análise apresenta forte estratificação. Estudo realizado por Pereira & Tassin (1995a e 1995b), no reservatório de Tucuruí, mostram uma diferença de temperatura de apenas  $2^{\circ}C$ , quando o reservatório apresenta-se estratificado. Essa diferença de temperatura aparentemente fraca representa, entretanto um forte variação de massa específica da água.

## CALIBRAÇÃO DO MODELO

O modelo CE-QUAL-W2 foi calibrado utilizando-se os resultados experimentais dos perfis do oxigênio dissolvido e da temperatura e as concentrações afluentes, levantados no período de 22/01/1999 a 03/12/1999.

Os dados meteorológicos diários como: temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, direção e velocidade do vento e nebulosidade, foram obtidos de estação meteorológica da UFSM, situada cerca de 20 km do reservatório.

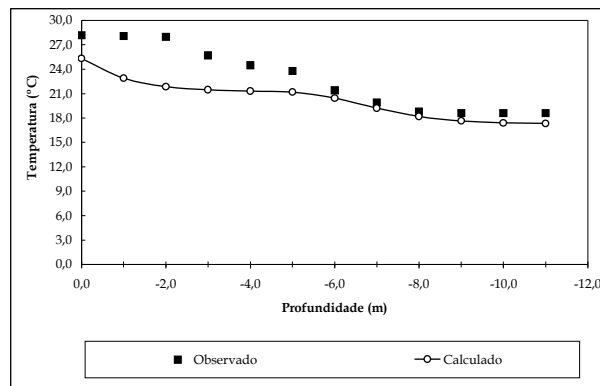


Figura 2 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 22/01/1999

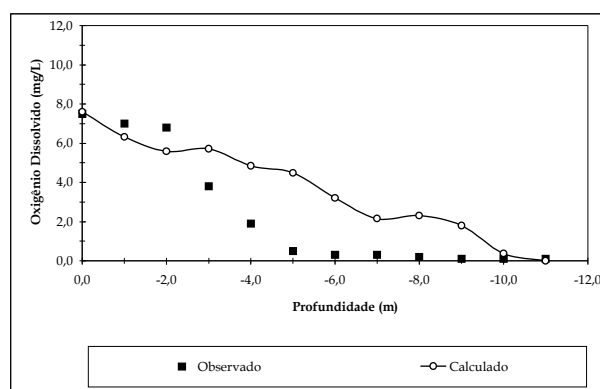


Figura 3 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 22/01/1999

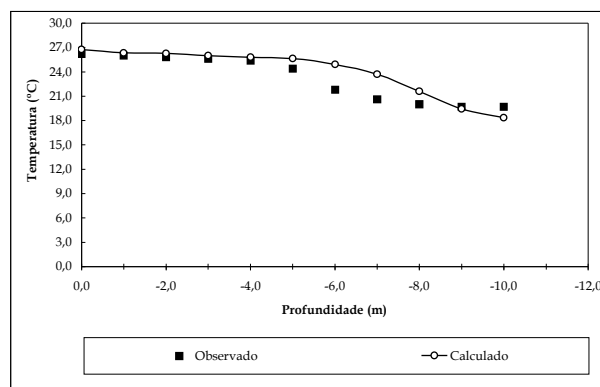


Figura 4 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 26/03/1999

Vazões médias diárias dos afluentes principais foram obtidas das estações fluviométricas Menino Deus I e Menino Deus II. A batimetria do reservatório foi obtida de Paiva et al (1998). As vazões efluentes ao reservatório foram fornecidas pela Companhia Riograndense de Saneamento (CORSAN).

O reservatório do Vacacaí Mirim, com 1858 m de comprimento, foi dividido em 10 trechos longitudinais de 155 m cada um, mais quatro trechos de 77 m de comprimento; e 15 camadas verticais de 1 metro de profundidade. Obteve-se, portanto, um total de 131 células ativas na malha computacional.

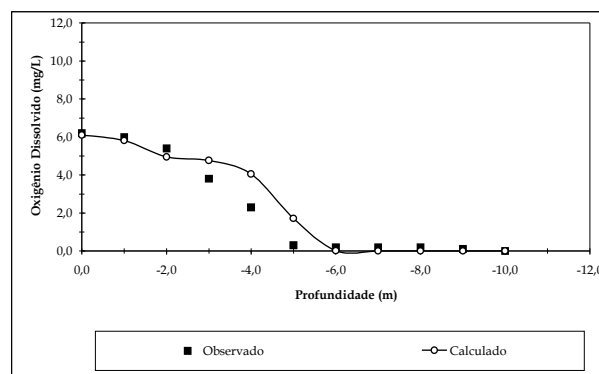


Figura 5 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 26/03/1999

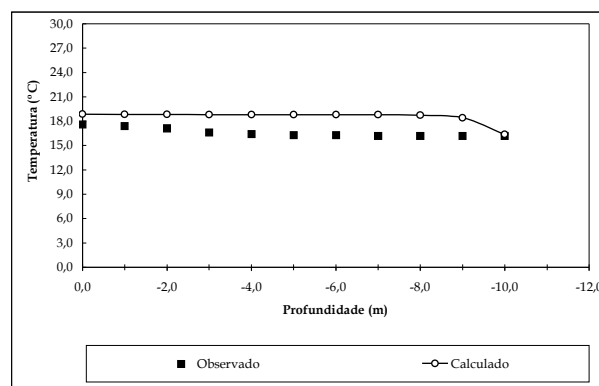


Figura 6 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 24/05/1999

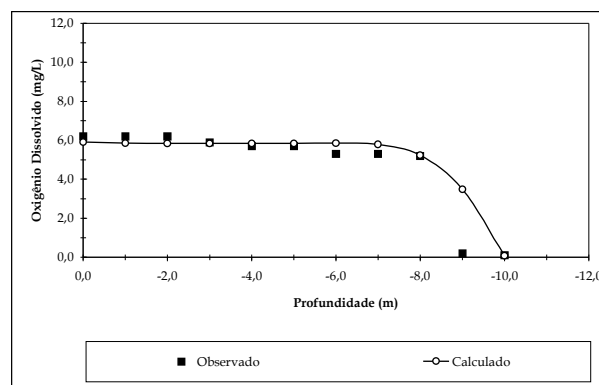


Figura 7 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 24/05/1999

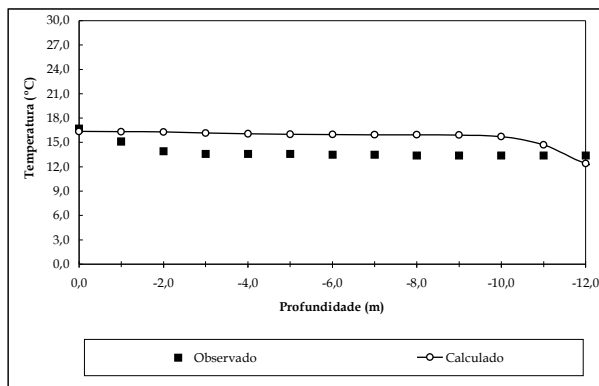


Figura 8 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 18/06/1999

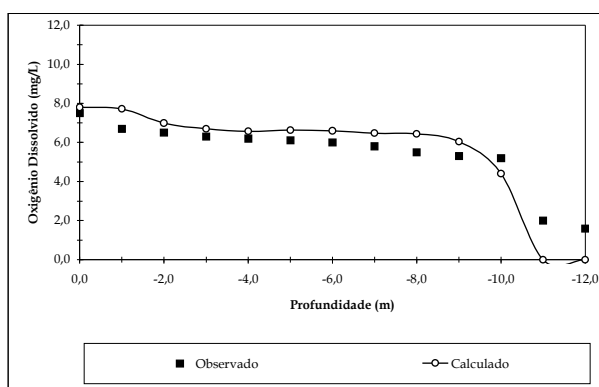


Figura 9 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 18/06/1999

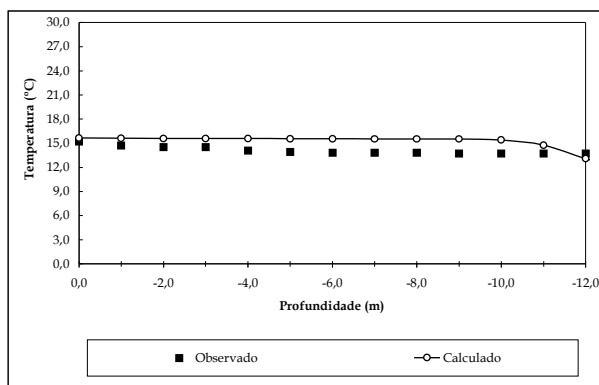


Figura 10 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 09/07/1999

Os coeficientes hidráulicos utilizados na simulação são apresentados na tabela 2.

Para o cálculo das concentrações de oxigênio dissolvido foram considerados: o acréscimo do OD pela reaeração atmosférica e o seu decaimento através da oxidação da matéria orgânica. Os processos de fotossíntese e

respiração das algas e a nitrificação não foram considerados devido a não se dispor de dados destes elementos.

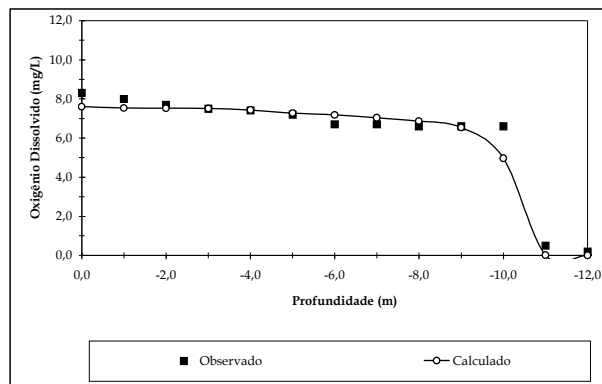


Figura 11 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 09/07/1999

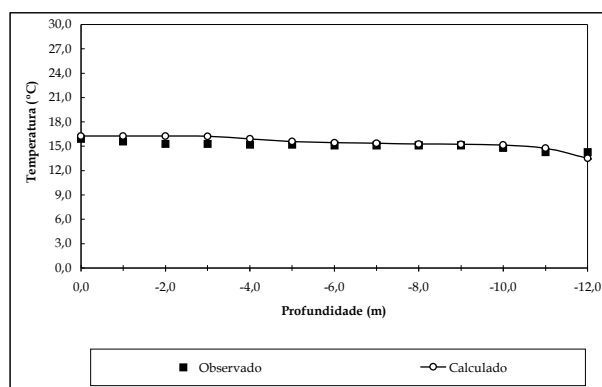


Figura 12 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 30/07/1999

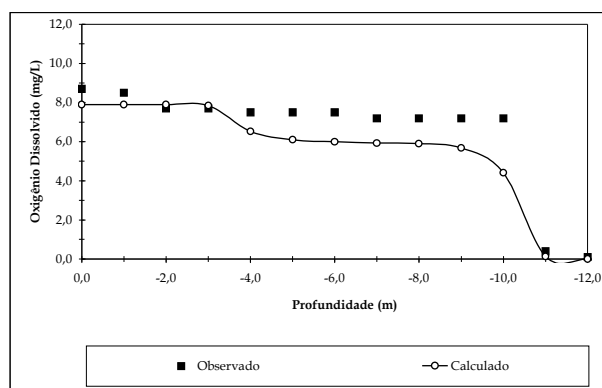
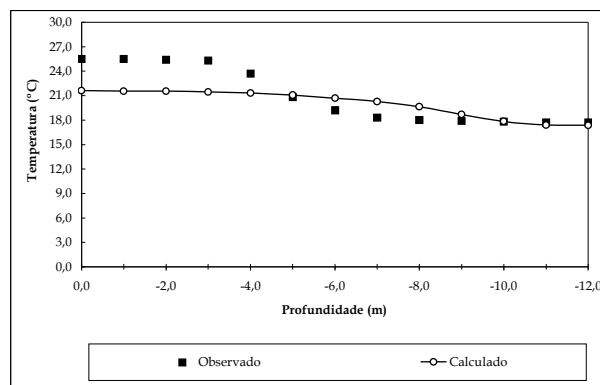
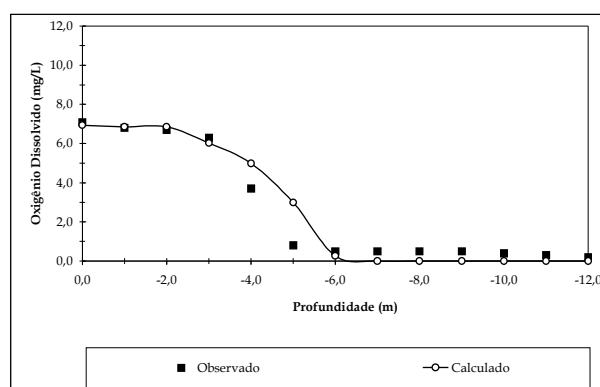


Figura 13 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 30/07/1999

Os perfis de oxigênio dissolvido e temperatura foram simulados num intervalo de tempo de 316 dias entre os dias 22/01/1999 e 03/12/1999.

**Tabela 2 - Coeficientes do modelo que afetam a temperatura**

COEFICIENTE	VALOR ADOTADO
Coeficiente de viscosidade turbulenta longitudinal	1m <sup>2</sup> /s
Coeficiente de dispersão longitudinal	1 m <sup>2</sup> /s
Coeficiente de Chezy	70 m <sup>1/2</sup> /s
Coeficiente de abrigo do vento	0

**Figura 14 - Perfil da temperatura na passarela do reservatório – simulação do dia 03/12/1999****Figura 15 - Perfil do oxigênio dissolvido na passarela do reservatório – simulação do dia 03/12/1999**

As figuras 2 e 3 mostram os perfis verticais da temperatura e do oxigênio dissolvido, respectivamente, para o dia 22/01/1999, dia inicial da simulação, no ponto de maior profundidade do reservatório, situado na passarela. Nesta data o reservatório apresentava-se estratificado com temperatura variando de 28,2°C, na superfície, a 18,6°C, no fundo do reservatório. Os valores de temperatura previstos pelo modelo mostram um desvio médio de 2,5°C em relação aos valores calculados. Nas camadas mais profundas há maior aproximação entre os valores observados e calculados. As concentrações de oxigênio dissolvido

observadas para o dia 22/01/1999 mostram valores de 7,5 mg/L, na superfície da água, chegando a condições de anaerobiose a 5 m de profundidade. Estas concentrações de oxigênio dissolvido são previstas com razoável acerto pelo modelo.

A situação do reservatório para o final do verão / início do outono é mostrada nas figuras 4 e 5, correspondentes ao mês de março/1999. A estratificação térmica do reservatório começa a diminuir, apresentando variações de temperatura entre 26,2°C, na superfície, a 19,7°C no fundo. O modelo mostra previsão adequada da temperatura até a profundidade de 4 m, a partir da qual a estratificação térmica observada é mais acentuada que a calculada. O modelo mostra melhores previsões de temperatura, comparados aos da figura 2, apresentando um desvio médio de 1,2°C em relação aos valores calculados. Nesta data, o perfil de oxigênio dissolvido é semelhante ao do dia 22/01/1999 (Figura 3) e as previsões do modelo também foram aprimoradas, amostrando um desvio médio de 0,5 mg/L em relação aos observados.

No final do outono e inverno as águas do reservatório apresentam-se desestratificadas. Esta situação é mostrada nas figuras de 6 a 13, correspondentes ao período entre 26/05 e 30/07/1999. A temperatura da água variou entre 15°C a 18°C, permanecendo aproximadamente constante, para cada dia, em toda a profundidade do reservatório. Em todos os dias o perfil de temperatura foi previsto com grande eficiência pelo modelo. Os perfis de oxigênio dissolvido tendem a aumentar a camada com oxigênio próximo a saturação. Na simulação de 26/05, figura 7, o oxigênio dissolvido mostrou concentração aproximadamente constante e igual a 6 mg/L até a profundidade de 8 m. Nos meses de junho e julho as concentrações de oxigênio dissolvido permaneceram próximas a 8 mg/L até a profundidade de 10 m, figuras 9, 11 e 13. As concentrações de oxigênio dissolvido, bem como a profundidade da camada aeróbia são previstas com grande eficiência pelo CE-QUAL-W2.

O comportamento da estratificação térmica no final da primavera / início do verão é mostrado nas figuras 14 e 15. Inicia o processo de estratificação térmica do reservatório. A temperatura da água varia entre 25,5°C, na superfície, a 17,7°C, no fundo. O modelo mostra uma estratificação térmica menor do que a observada, ou seja, não consegue prever, com eficiência, o aquecimento da camada superficial de água. Em profundidades superiores a 4 m, as previsões do modelo são mais eficientes. O desvio médio entre os valores de temperatura observados e calculados foi de 1,7°C.

Com relação às concentrações de oxigênio dissolvido apresentadas na figura 15, observa-se, novamente, a diminuição da camada aeróbia. O oxigênio dissolvido mostra concentração aproximadamente constante até 3 m de profundidade, chegando a condições anaeróbias a pro-

fundidades superiores a 6 m. Estas concentrações são previstas eficientemente pelo modelo, com um desvio médio de 0,48 mg/L entre os resultados observados e calculados.

A calibração do modelo CE-QUAL-W2 para o reservatório do Vacacaí-Mirim conduziu a uma melhor eficiência na previsão dos perfis do oxigênio dissolvido do que da temperatura, mostrando que os processos de fotossíntese, respiração das algas e a nitrificação, não consideradas nas simulações, parecem possuir menor importância para este reservatório.

A calibração dos perfis de temperatura foi menos eficiente do que a dos perfis de oxigênio dissolvido. Esta calibração apresentou grande dependência do perfil vertical da temperatura de entrada, dado utilizado para iniciar as simulações. A informação de um perfil estratificado melhorou as previsões de temperatura, mas piorou as de oxigênio dissolvido. Observou-se, também, que as maiores dificuldades de previsão foram nas camadas superficiais, onde a temperatura prevista foi, normalmente, inferior à observada. Estas previsões certamente teriam sido melhores se as medidas da temperatura afluente tivessem sido realizadas com maior frequência que a mensal.

## CONCLUSÕES

Ciclos de estratificação térmica e do oxigênio dissolvido foram levantados no ponto de maior profundidade do reservatório do Vacacaí-Mirim. Observou-se que nos meses de inverno as águas do reservatório apresentam-se desestratificadas com variação de temperatura de no máximo 2°C da superfície ao fundo; e concentrações de oxigênio dissolvido aproximadamente uniformes. Na primavera começa a surgir a termoclina, que desaparece somente no outono. No verão o reservatório apresenta-se completamente estratificado, com variações de temperatura, da superfície ao fundo, alcançando valores de até 11°C e ocorrência de condições anaeróbias a partir de 5 m de profundidade.

Para a simulação dos perfis verticais de temperatura e oxigênio dissolvido foi utilizado o modelo bidimensional com médias laterais, CE-QUAL-W2, desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers, que combina diretamente os algoritmos da hidrodinâmica e da qualidade da água.

O intervalo de simulação foi de 316 dias, iniciando no verão, dia 22/01/1999 e acabando no verão, dia 03/12/1999.

Com relação à previsão da temperatura, verificou-se que o modelo prevê apenas razoavelmente os valores observados. No período de outono e inverno, quando não ocorreu estratificação térmica no reservatório, a previsão foi mais eficiente. No verão, em que a estratificação é acentuada, o modelo apresentou dificuldades para simular

o aquecimento das camadas superiores de água do reservatório. No entanto, a posição da termoclina e as temperaturas nas maiores profundidades se aproximaram bastante dos valores observados.

As previsões da concentração de oxigênio dissolvido foram melhores previstas, pelo modelo CE-QUAL-W2, do que a temperatura. Este conseguiu mostrar, com boa precisão, a profundidade da camada aeróbia e os valores do oxigênio dissolvido.

Comparando-se os ciclos de estratificação térmica reservatório do Vacacaí-Mirim observados e as indicações deste fenômeno, decorrentes de suas características morfométricas, conclui-se que:

- o seu pequeno número de Froude densimétrico sugere que o reservatório apresenta forte estratificação, fato observado no verão;
- a sua baixa profundidade relativa, indica que suas águas podem circular completamente, fenômeno que ocorre entre o outono e a primavera.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à FAPERGS pelas bolsas de pesquisa e iniciação científicas concedidas e à FINEP, pelo auxílio concedido através do Projeto de Redes Cooperativas de Pesquisa (REHIDRO/RECOPE). Os autores agradecem ao técnico Alcides Sartori, pelo auxílio nos levantamentos de hidrometria, aos acadêmicos Fabiano Thomas e Tiago Gomes pelo auxílio no monitoramento de qualidade da água

## REFERÊNCIAS

- CHAPRA, S.C. (1997) *Surface Water-Quality Modeling*. New York, The McGraw-Hill Companies, INC., 836 p.
- COLE, T.M., BUCHAK, E.M. (1995) *CE-QUAL-W2: A two-dimensional, laterally averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model*, Version 2.0. Instruction Report EL-95-, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- GASTALDINI, M.C.C., PAIVA, E.M.C.D. & PAIVA, J.B.D. (2001) *Inter-relações entre Dados de Monitoramento de Qualidade da Água e Hidrológico – Aplicação ao Reservatório do Vacacaí-Mirim*, Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, vo. 6, nº 1 e 2, jan./jun.
- NOGUEIRA, V.P.Q. (1991) Qualidade da Água em Lagos e Reservatórios. in: Hidrologia Ambiental. E-dusp/ABRH: Coleção ABRH de Recursos Hídricos, São Paulo, v. 3, 414 p.
- PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D.; FORNO, G.L.D. et al (1998) Estimativa do Assoreamento do Reservatório do DNOS, em Santa Maria, RS. In: Congresso Nacional del Agua e II Simpósio de Recursos Hídricos del Cono Sur, Anais, Santa Fé. v.3, p.452-461.



- PEREIRA, A. & TASSIN, B. (1995a) *Modelagem Matemática do Regime Térmico do Reservatório de Tucuruí*. RBE – Caderno de Recursos Hídricos, vol. 13, n° 1, p. 57-75.
- PEREIRA, A. & TASSIN, B. (1995b) *Modelo de Qualidade da Água para Reservatórios Amazônicos: Calibração e Validação*. RBE – Caderno de Recursos Hídricos, vol. 13, n° 2, p. 115-139.
- TUCCI, C.E.M. (1998) Modelos de Qualidade da Água in: Modelos Hidrológicos. ABRH. 669 p.
- VON SPERLING, E. (1999) *Morfologia de Lagos e Represas*. DE-SA/UFMG, Minas Gerais, p.137.

***A Mathematical Model Applied to Data on Thermal Stratification Cycles and Water Quality in the Vacacaí-Mirim Reservoir***

**ABSTRACT**

*Thermal stratification usually occurs during the summer in lakes and deep reservoirs in a tropical climate. The permanence or semi-permanence of thermal stratification determines the superposition of chemical and biological stratifications on it. Mathematical modeling of water quality in those water bodies depends directly on the modeling of the thermal structure. The Vacacaí-Mirim reservoir presents cycles of thermal stratification, which begin in spring and end in fall. Among the models available in literature, the one that best adapts to the characteristics of the Vacacaí-Mirim reservoir is CE-QUAL-W2. This model is two-dimensional with lateral averages. It was developed by the U.S. Army Corps of Engineers, and directly combines the hydrodynamic and water quality algorithms. A study of the dissolved oxygen and temperature profiles at the greatest depth of the Vacacaí-Mirim was carried out in 1999. The CE-QUAL-W2 model was calibrated. The temperature and dissolved oxygen profiles were satisfactorily predicted by the model reproducing the variation of the cycles of stratification during the year.*

*Key words: mathematical modeling, water quality, reservoir stratification*