

MODELAGEM DA EUTROFIZAÇÃO DO RESERVATÓRIO DO PASSAÚNA

Bruno Victor Veiga¹ & Maurício Dzedzic²

Resumo - Este trabalho mostra a aplicação do Modelo BATHTUB ao Reservatório do Passaúna, na Região Metropolitana de Curitiba, na avaliação dos estados tróficos e o potencial de eutrofização, baseado no balanço de nutrientes e relações empíricas entre as variáveis de qualidade da água que interferem no processo. Esse trabalho ainda demonstra a adaptação das informações de qualidade da água disponíveis ao processo de modelagem, relacionando as dificuldades e simplificações adotadas na busca da melhor estimativa das condições da qualidade da água.

Abstract - This paper presents the BATHTUB model application to the Passauna Reservoir in Curitiba Metropolitan Region, in order to assess the trophic states and the eutrophication potential of the reservoir, considering a nutrient budget model and empirical relationships among the water quality variables involved in the process. This work also demonstrates the efforts to incorporate the available water quality information in the modeling process, relating the difficulties and simplifications adopted to carry on the best water quality prediction.

Palavras-chave - modelo, nutrientes, eutrofização

INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana de Curitiba, como aconteceu com os grandes aglomerados urbanos do nosso país, experimenta as dificuldades com a ocupação desordenada das suas áreas, principalmente nos municípios periféricos, dada a incapacidade de fazer frente aos vultuosos investimentos necessários em infra-estruturação e à dinâmica acelerada do processo de ocupação. Apesar dos mais recentes investimentos realizados por empréstimos contraídos juntos a organismos financiadores internacionais, a própria definição de um escopo fixo de empreendimentos, e a sua

¹ RDR Consultores Associados, Av. Visconde de Guarapuava, 45, CEP 80050-050, Curitiba – PR, bvveiga@rdr.srv.br
Centro Universitário Positivo – UnicenP, Av. Pedro Viriato Parigot de Sousa, 5300, CEP 81280-330, Curitiba – PR

² Centro Universitário Positivo – UnicenP, Av. Pedro Viriato Parigot de Sousa, 5300, CEP 81280-330, Curitiba – PR, dziedzic@unicenp.br

implantação ao longo dos anos, cria um déficit em outras áreas não abrangidas pelos programas, que são ocupadas concomitantemente.

Essas ocupações têm-se mostrado como uma importante forma de agressão aos mananciais da Região Metropolitana de Curitiba e é importante que sejam desenvolvidas ferramentas para a avaliação dos efeitos dessas fontes poluidoras. Um dos efeitos indesejados é o desenvolvimento de processos eutróficos nos reservatórios de abastecimento público na RMC.

Assim, a aplicação do modelo BATHTUB para a avaliação do potencial de eutrofização no reservatório do Passaúna é uma importante ferramenta no controle da qualidade da água dos afluentes.

MODELO BATHTUB

O Modelo BATHTUB é um modelo de balanço de nutrientes, conjugado com modelos empíricos que correlacionam os parâmetros de qualidade da água com outros parâmetros e indicadores do potencial de eutrofização. Dos diversos modelos disponíveis (Veiga, 2001), apenas alguns destes são implementados no programa, entretanto o BATHTUB os aplica em reservatórios morfometricamente complexos, segmentados espacialmente, levando em conta os processos de sedimentação, advectivos e difusivos entre esses segmentos.

Sua utilização pode ter um objetivo de diagnóstico (um reservatório já existente) ou de previsão (um reservatório futuro). Com a função de diagnosticar, o BATHTUB pode ser empregado para:

- Composição do balanço hídrico e de nutrientes, incluindo e priorizando as principais fontes de erros;
- Priorização de indicadores de estados tróficos, com base nos estudos desenvolvidos para os reservatórios do “U.S. Army Corps of Engineers”;
- Identificação dos fatores que controlam a produção de algas.
- Como instrumento de previsão, o BATHTUB é uma ferramenta importante, utilizada para:
 - Avaliar os impactos e mudanças nas cargas hídricas e de nutrientes;
 - Avaliar os impactos de alterações de níveis do reservatório;
 - Estimar as cargas aceitáveis de nutrientes dentro considerando-se os objetivos preconizados no gerenciamento do reservatório.

De modo geral, o modelo considera três aspectos: balanço hídrico, balanço de nutrientes e aplicação de correlações entre parâmetros indicadores de eutrofização. Esses resultados são apresentados em tabelas e gráficos que exprimem as condições da qualidade da água e indicadores

do potencial de eutrofização, consolidados por estatísticas associadas, e também análise de sensibilidade e intervalos de confiança.

Uma importante etapa no processo de modelagem usando o BATHTUB é a segmentação adotada para o reservatório ou conjunto de reservatórios. Segundo o Manual do Usuário (Walker, 1996) a segmentação deve ser definida em volumes de controle onde prevaleçam as mesmas propriedades quanto à sedimentação das partículas. Assim, são aspectos a considerar:

- Taxa de escoamento superficial;
- Taxa de renovação do volume do reservatório (associada ao Tempo de Residência);
- Carga total de nutrientes externos;
- Carga Total de nutrientes dos tributários;
- Carga de nutrientes inorgânicos e ortomoleculares advindos dos afluentes.

Em relação às entradas e saídas dos segmentos, são admitidas seis:

- Entradas monitoradas: vazões e concentrações controladas;
- Entradas não-pontuais: afluentes ou áreas lindeiras não monitoradas, as quais são estimadas a partir das características de uso do solo, definidas pelo usuário;
- Entradas pontuais: cargas pontuais descarregadas diretamente no reservatório;
- Captações ou retiradas: este tipo de informação é opcional, já que o modelo faz o balanço hídrico e compensa de um segmento para o outro;
- Cargas internas: cargas advindas dos sedimentos, quando essa informação for disponível;
- Cargas difusivas: cargas que possam vir de um volume de água a jusante do segmento, como quando se simula baías.

Entre os segmentos, são idealizados pelo modelo “Canais de transporte”, para os quais são atribuídos fluxos líquidos e de nutrientes, pela especificação da vazão e movimentos advectivos e difusivos. Para se realizar uma simulação típica unidimensional, segmentada, fluxo apenas na direção de jusante, a definição dos canais de transporte não é requerida.

O balanço de massa é um conceito fundamental na modelagem da eutrofização, definindo os balanços hídrico e de nutrientes, a partir do volume de controle em torno do segmento.

$$\begin{array}{l} \text{Entradas} \\ \text{(Externa)} \\ \text{(Advectiva)} \\ \text{(Difusiva)} \\ \text{(Atmosférica)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Saídas} \\ \text{(Descargas)} \\ \text{(Advectiva)} \\ \text{(Difusiva)} \\ \text{(Evaporação)} \end{array} + \text{Acréscimo de Volume} + \text{Perdas}$$

As informações relativas às cargas externas, descargas, cargas atmosféricas, evaporação e a parcela de acréscimo do volume são calculadas por dados fornecidos ao modelo via arquivo-texto. Os termos advectivos e difusivos são calculados internamente ao modelo com base no balanço e na transferência hídrica e de nutrientes entre os segmentos. Os termos de transporte difusivo são aplicáveis só em problemas envolvendo a simulação de variações espaciais dentro dos reservatórios, refletindo a difusão por correntes secundárias provocadas pela ação do vento. Estão disponíveis no BATHTUB cinco métodos para se estimar as taxas de transporte difusivo (Tabela 1), com os valores dos coeficientes de dispersão obtidos a partir dos estudos de Fischer et al. (1979).

Tabela 1 - Modelos de transporte difusivo usados no BATHTUB (Walker, 1996)

Método	Equacionamento	Variáveis
Equação de Dispersão de Fischer et al.(1979)	$E = \frac{Max(D - D_n, 0) \cdot A_C}{L}$ $D = CD \cdot 100 \cdot W^2 \cdot Z^{-0,84} Max(U, 1)$ $D_n = \frac{U \cdot L}{2}$	<p>E é a taxa de troca difusiva entre dois segmentos (hm^3/ano)</p> <p>$Max(x,y)$ é um operador de maximização da variável y, limitado inferiormente a x;</p> <p>CD é um o coeficiente de calibração do transporte difusivo;</p> <p>W é largura média do segmento em km;</p> <p>D é coeficiente de dispersão em km^2/ano;</p> <p>Z é a profundidade total em metros;</p> <p>U é a velocidade advectiva média em km/ano;</p> <p>D_n é coeficiente de dispersão numérica;</p> <p>L é o comprimento do segmento em km.</p>
Coeficiente de dispersão fixo	$E = \frac{Max(D - D_n, 0) \cdot A_C}{L}$ $D = 1.000 \cdot CD$ $D_n = \frac{U \cdot L}{2}$	$D=1.000 km^2/ano$
Entrada do coeficiente de transporte difusivo diretamente	$E=CD$	Transporte igual ao coeficiente de calibração CD
Eq. De Fischer et al. (1979) sem o ajuste da dispersão numérica	$E = \frac{D \cdot A_C}{L}$ $D = CD \cdot 100 \cdot W^2 \cdot Z^{-0,84} Max(U, 1)$	$D_n = 0$
Coeficiente de dispersão fixo sem o ajuste da dispersão numérica	$E = \frac{1.000 \cdot CD \cdot A_C}{L}$	$D=1.000 km^2/ano$ $D_n=0$

O cálculo da taxa anual de sedimentação de nutrientes em $mg/m^3 \cdot ano$ [$ML^{-3}T^{-1}$] é baseado nos modelos implementados no programa (Veiga, 2001), que são sumarizados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Modelos de deposição do Fósforo, Sed_p , usados no BATHTUB (Walker, 1996)

Modelo	Tipo de Modelo	Equacionamento
2ª Ordem, Fósforo Disponível	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P^2$	$P = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot CP \cdot A_1 \cdot P_i \cdot T}}{2 \cdot CP \cdot A_1 \cdot T}, \text{ sendo}$ $A_1 = \frac{0,17Q_s}{(Q_s + 13,3)}, \text{ onde } Q_s = Z/T$ $A_2 = 2$
2ª Ordem, Função da taxa de decaimento	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P^2$	$P = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot CP \cdot A_1 \cdot P_i \cdot T}}{2 \cdot CP \cdot A_1 \cdot T}, \text{ sendo}$ $A_1 = \frac{0,056Q_s}{[(Q_s + 13,3) \cdot F_{ot}]}, \text{ onde } Q_s = Z/T \text{ e } F_{ot} \text{ é a razão}$ <p style="text-align: center;">entre Ortofosfatos e Fósforo Total que vem pelos afluentes.</p> $A_2 = 2$
2ª Ordem, Taxa de decaimento constante	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P^2$	$P = \frac{-1 + \sqrt{1 + 4 \cdot CP \cdot A_1 \cdot P_i \cdot T}}{2 \cdot CP \cdot A_1 \cdot T}, \text{ sendo } A_1 = \text{taxa}$ <p style="text-align: center;">de decaimento efetiva = 0,10 m³/mg.ano</p> $A_2 = 2$
Canfield e Bachman	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P$	$P = \frac{P_i}{(1 + CP \cdot A_1 \cdot T)}, \text{ onde } A_1 = 0,11 \cdot \left(\frac{W_p}{V}\right)^{0,59}$ <p style="text-align: center;">sendo W_p a carga de Fósforo em kg/ano e V o volume em hm³</p>
Vollenweider	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P$	$P = \frac{P_i}{(1 + CP \cdot A_1 \cdot T)}, \text{ onde } A_1 = T^{-0,5}$
1ª Ordem, simples	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P$	$P = \frac{P_i}{(1 + CP \cdot A_1 \cdot T)}, \text{ onde } A_1 = 1$
1ª Ordem, com deposição	$Sed_p = CP \cdot A_1 \cdot P$	$P = \frac{P_i}{(1 + CP \cdot A_1 \cdot T)}, \text{ onde } A_1 = \frac{1}{Z}$

Nota: CP é o parâmetro de calibração do modelo

Tabela 3 - Modelos de deposição do Nitrogênio, Sed_N , usados no BATHTUB (Walker, 1996)

Modelo	Tipo de Modelo	Equacionamento
2ª Ordem, Nitrogênio disponível	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N^2$	$N = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot CN \cdot B_1 \cdot N_i \cdot T} - 1}{2 \cdot CN \cdot B_1 \cdot T}$ $B_1 = \frac{0,0045 \cdot (Z/T)}{[(Z/T) + 7,2]}$ $N_{ia} = 0,59 \cdot N_i + 0,79 \cdot N_{in}$ $N_{in} = \text{Nitrogênio inorgânico (mg/m}^3\text{)}$
2ª Ordem, Modificado	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N^2$	$N = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot CN \cdot B_1 \cdot N_i \cdot T} - 1}{2 \cdot CN \cdot B_1 \cdot T}$ $B_1 = \frac{0,0035 \cdot (Z/T) \cdot F_{in}^{-0,59}}{[(Z/T) + 17,3]}$ $F_{in} = \frac{\text{Nitrogênio Inorgânico dos tributários}}{\text{Nitrogênio Total}}$
2ª Ordem	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N^2$	$N = \frac{\sqrt{1 + 4 \cdot CN \cdot B_1 \cdot N_i \cdot T} - 1}{2 \cdot CN \cdot B_1 \cdot T}$ $B_1 = 0,00315 \text{ m}^3/\text{mg.ano}$
Bachman, carga volumétrica	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N$	$N = \frac{N_i}{(1 + CN \cdot B_1 \cdot T)}, \text{ onde } B_1 = 0,0159 \left(\frac{W_n}{V} \right)^{0,59}$ <p>sendo W_n a carga de Nitrogênio em kg/ano e V o volume em hm^3</p>
Bachman, taxa de renovação do volume (“Flushing rate”)	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N$	$N = \frac{N_i}{(1 + CN \cdot B_1 \cdot T)}, \text{ onde } B_1 = 0,693 \cdot T^{-0,55}$
1ª Ordem, simples	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N$	$N = \frac{N_i}{(1 + CN \cdot B_1 \cdot T)}, \text{ onde } B_1 = 1$
1ª Ordem, com deposição	$Sed_n = CN \cdot B_1 \cdot N$	$N = \frac{N_i}{(1 + CN \cdot B_1 \cdot T)}, \text{ onde } B_1 = \frac{1}{Z}$

Nota: CN é o parâmetro de calibração do modelo

O manual do usuário (Walker, 1996) apresenta um gráfico que mostra a envoltória que define a região onde as previsões de sedimentação de nutrientes são mais confiáveis (Figura 1), conforme estudos desenvolvidos para os reservatórios do “U.S. Corps of Engineers”.

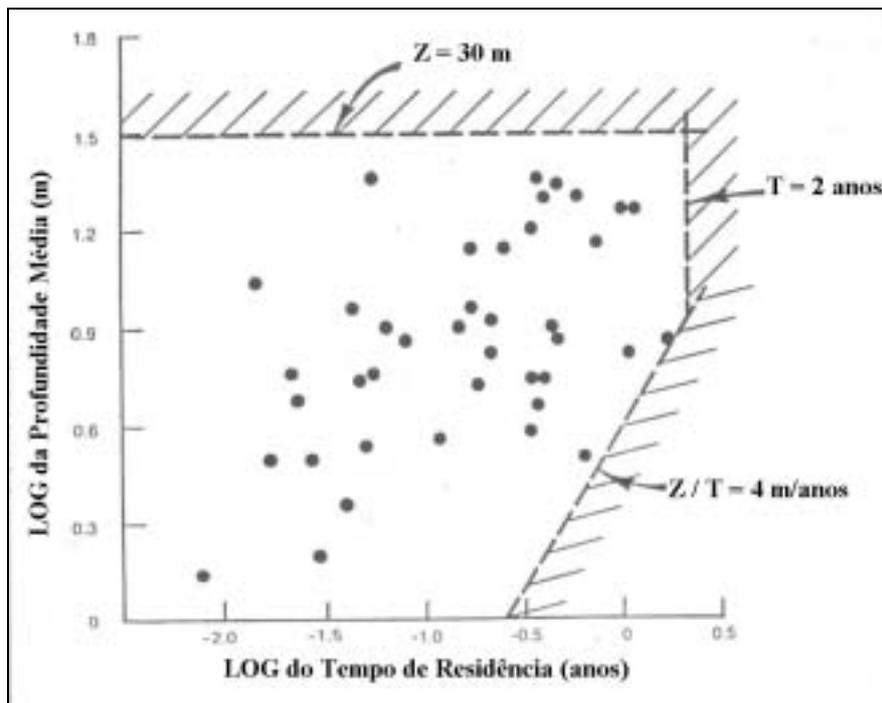


Figura 1 – Profundidade média (Z) versus Tempo de residência (T) em escala logarítmica (Walker, 1996).

Além do tempo de residência, um outro conceito importante é a razão de renovação dos nutrientes, obtida pela divisão do período de análise pelo tempo de residência da massa, que é definida como o número de vezes que a massa do nutriente é renovada no período de análise. O ideal é que esse valor seja superior a 2,0, pois valores inferiores são bastante afetados pelas condições das cargas anteriores ao período de análise, principalmente se houver intermitência de valores de vazões.

Com relação aos modelos de avaliação do potencial de eutrofização, as estimativas são baseadas em relações empíricas que, além das concentrações de Fósforo Total, também se baseiam nas concentrações de Clorofila- a (B) e profundidade do disco de Secchi (S). Walker (1996) apresenta algumas das principais relações empíricas utilizadas no cruzamento de informações e obtenção de elementos que indiquem a presença do processo de eutrofização. A Tabela 4 mostra os principais modelos utilizados na obtenção de parâmetros indicativos do processo de eutrofização.

Tabela 4 - Modelos de avaliação das concentrações de Clorofila-a no BATHTUB (Walker, 1996)

Modelo (Fatores Limitantes)	Equacionamento	Condições de aplicação
N, P, Luz e Taxa de troca do volume "Flushing rate"	$X_{pn} = \left\{ P^{-2} + \left[\frac{(N-150)}{12} \right]^{-2} \right\}^{-0,5}$ $B_x = \frac{X_{pn}^{1,33}}{4,31}$ $G = Z_{mix} (0,19 + 0,0042 \cdot F_s)$ $B = \frac{CB \cdot B_x}{[(1 + 0,025 \cdot B_x \cdot G)(1 + G \cdot a)]}$	Geral
P, Luz e Taxa de troca do volume ("Flushing rate")	$B_p = \frac{P^{1,37}}{4,88}$ $G = Z_{mix} (0,14 + 0,0039 \cdot F_s)$ $B = \frac{CB \cdot B_p}{[(1 + 0,025 \cdot B_p \cdot G)(1 + G \cdot a)]}$	$\frac{N_{inorgânico}}{P_{ortofosfatos}} > 7$ $\frac{(N-150)}{P} > 12$
P, N e baixa turbidez	$X_{pn} = \left\{ P^{-2} + \left[\frac{(N-150)}{12} \right]^{-2} \right\}^{-0,5}$ $B = CB \cdot 0,2 \cdot X_{pn}^{1,25}$	Turbidez não algal $< 0,4 \text{ m}^{-1}$ $F_s < 25 \frac{1}{\text{ano}}$
P, linear	$B = CB \cdot 0,28 \cdot P$	Turbidez não algal $< 0,9 \text{ m}^{-1}$ $\frac{N_{inorgânico}}{P_{ortofosfatos}} > 7$ $\frac{(N-150)}{P} > 12$ $F_s < 25 \frac{1}{\text{ano}}$
Jones e Bachman	$B = CB \cdot 0,081 \cdot P^{1,46}$	Turbidez não algal $< 0,4 \text{ m}^{-1}$ $\frac{N_{inorgânico}}{P_{ortofosfatos}} > 7$ $\frac{(N-150)}{P} > 12$ $F_s < 25 \frac{1}{\text{ano}}$

Nota: *CB* é o parâmetro de calibração do modelo

Nas equações apresentadas, B é a concentração de Clorofila-a em mg/m^3 , obtida a partir das variáveis:

X_{pn} – Concentração composta de nutrientes, em mg/m^3 ;

P – Concentração de Fósforo Total, em mg/m^3 ;

N – Concentração de Nitrogênio Total no reservatório, em mg/m^3 ;

B_x – Concentração potencial de Clorofila-a devida aos nutrientes, em mg/m^3 ;

Z_{mix} – Profundidade média da camada misturada, em metros;

G – Fator cinético usado no modelo de Clorofila-a (adimensional);

a – Turbidez não algal $\left(a = \frac{1}{S} - 0,025 \cdot B \right)$, em m^{-1} ;

S – Profundidade do disco de Secchi, em metros;

F_s – Taxa de renovação do volume no verão (Summer Flushing Rate) = $\frac{\text{Entrada} - \text{Evaporação}}{\text{Volume}}$, em ano^{-1} ;

B_p – Concentração potencial de Clorofila-a devido ao Fósforo, em mg/m^3 ;

$N_{inorgânico}$ – Concentração de Nitrogênio Inorgânico, em mg/m^3 ;

$P_{ortofosfatos}$ – Concentração de Ortofosfatos, em mg/m^3 ;

Algumas estimativas podem ser feitas através de modelos que resultam nos valores de profundidade dos disco de Secchi, conforme mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Modelos de avaliação da profundidade de Secchi – BATHTUB (Walker, 1996)

Modelo (Parâmetros de Correlação)	Equacionamento	Condições de aplicação
Clorofila-a e Turbidez	$S = \frac{CS}{(a + 0,025 \cdot B)}$	Geral
Composição de Nutrientes	$S = CS \cdot 16,2 \cdot X_{pn}^{-0,79}$	Geral
Fósforo Total	$S = CS \cdot 17,8 \cdot P^{-0,76}$	$\frac{N_{inorgânico}}{P_{ortofosfatos}} > 7$

Nota: *CB* é o parâmetro de calibração do modelo

Na ausência de alguns parâmetros como turbidez não algal (*a*), profundidade média da camada misturada (Z_{mix}) e profundidade média do hipolímnio (Z_h), Walker (1996) apresenta algumas equações que fornecem estimativas baseadas em suas correlações obtidas a partir dos estudos dos reservatórios do “U.S. Corps of Engineers”. A equação alternativa apresentada para a estimativa da turbidez não algal é descartada para a utilização fora da área de estudo, uma vez que se baseia em informações da latitude dos reservatórios. As outras duas equações são dadas a partir das informações das profundidade média (Z), em metros e profundidade máxima (Z_x), em metros. A equação que calcula a profundidade média da camada misturada (Z_{mix}) é válida para reservatórios com profundidade média inferior a 40 metros.

$$\log(Z_{mix}) = -0,06 + 1,36 \cdot \log(Z) - 0,47 \cdot [\log(Z)]^2 \quad (1)$$

$(R^2 = 0,93; EP^2 = 0,0026)$

$$\log(Z_h) = -0,58 + 0,57 \cdot \log(Z_x) - 0,50 \cdot \log(Z) \quad (2)$$

$(R^2 = 0,85; EP^2 = 0,0076)$

Na modelagem de reservatórios em que haja estratificação térmica, o BATHTUB permite o cálculo das taxas de depleção do oxigênio hipolimnético e metalimnético, baseadas na profundidade do hipolímnio. Além da profundidade, são necessárias as informações morfométricas do reservatório, introduzidas a partir das suas características globais, ao invés dos dados por segmentos. Se não for informada a profundidade do hipolímnio, o programa considera que não há estratificação térmica e descarta esta etapa de cálculos. Quando calculadas, as taxas são referidas às estações nas proximidades da barragem. As equações a seguir calculam essas taxas de depleção do oxigênio em relação ao volume, demandadas pelo hipolímnio (HODv) e pelo metalímnio (MODv), em mg/m³.dia.

$$HOD_v = \frac{240 \cdot B_m^{0,5}}{Z_h} \quad (\text{para } Z_h > 2 \text{ metros}) \quad (3)$$

$$MOD_v = 0,4 \cdot HOD_v \cdot Z_h^{0,38} \quad (4)$$

Os fatores de calibração utilizados pelo BATHTUB facilitam a operação do modelo, podendo ser aplicados aos segmentos individualmente ou ao reservatório globalmente. Eles afetam cada um dos modelos já apresentados, representando ajustes nas estimativas ou na projeção de alguns cenários a serem previstos em simulações. Algo importante a se observar é que quando a diferença entre o previsto e o observado se dever a erros, a utilização dos parâmetros de calibração deve se dar de maneira conservadora.

Um procedimento que complementa o BATHTUB é a Análise de Erros, tendo como variáveis-chave a Média (melhor estimativa) e o Coeficiente de Variação (Erro padrão da estimativa/Média). Além disso, o BATHTUB sugere valores baseados nos estudos desenvolvidos por Walker para os reservatórios do “U.S. Corps of Engineers”, quando não se dispuser de estimativas dessa variabilidade.

APLICAÇÃO DO MODELO

No reservatório do Passaúna foram delimitados quatro segmentos, conforme ilustrado na Figura 2, segundo a similaridade de comportamento hidráulico e de qualidade da água (Veiga, 2001).

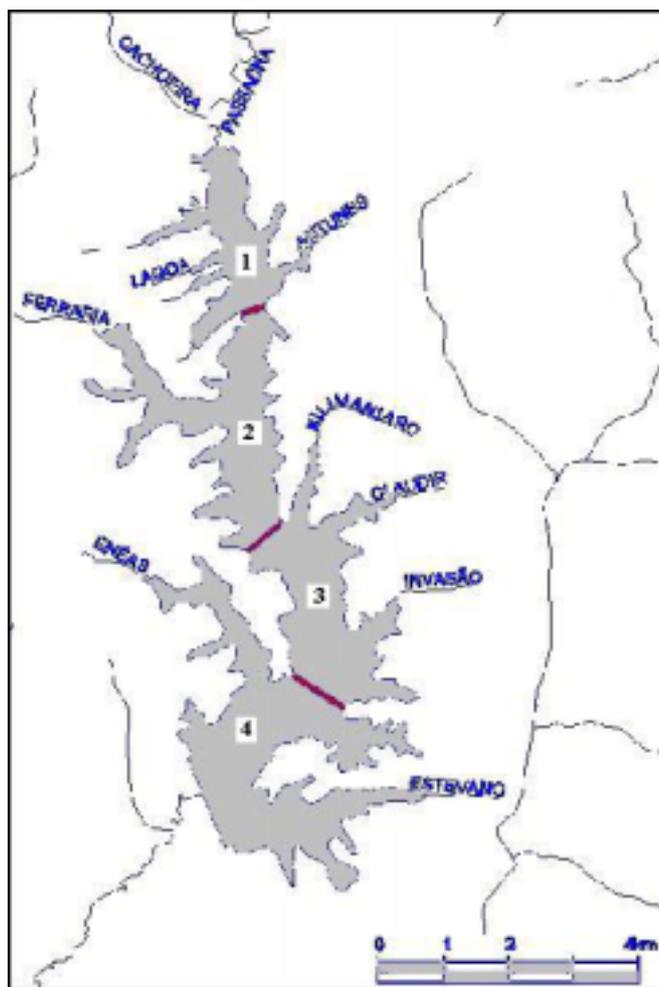


Figura 2 – Segmentação do reservatório do Passaúna

Em cada um desses trechos, foram avaliadas propriedades, como volume, área e profundidade média que foram elementos de entrada no modelo BATHTUB. Essas propriedades são relacionadas na Tabela 6 e são as informações morfométricas introduzidas no modelo, caracterizando cada segmento.

Tabela 6 – Segmentação do Passaúna

Segmento	Área (km ²)	Volume (hm ³)	Profundidade Média (m)
1 – Entrada	1,16	2,43	2,09
2 – Olaria	2,63	19,1	7,28
3 – Captação	3,42	34,6	10,09
4 – Barragem	3,88	39,9	10,27

A estimativa da qualidade da água nos afluentes foi feita com o uso do modelo FLUX (Veiga, 2001), avaliando as cargas anuais de Fósforo Total e Nitrogênio Total. Os dados hidrológicos foram

obtidos por regionalização direta com o posto fluviométrico 65021800 – Ponte BR-277 (65021800). Medições realizadas ao longo do ano identificaram a formação de um processo de estratificação térmica no verão, levada em conta no processo de modelagem pela estimativa da variação da taxa de depleção do oxigênio hipolimnético. O modelo PROFILE, que integra o conjunto de ferramentas de avaliação da eutrofização juntamente com o FLUX e o BATHTUB, foi utilizado para estimar as características médias do reservatório ao longo do ano, mostradas na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados dos parâmetros médios no reservatório do Passaúna

Parâmetro	E1 - Entrada		E2 - Olaria		E3 - Captação		E4 - Barragem		Reservatório Total	
	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV
Temperatura(°C)	17,5	0,216	19,4	0,191	18,6	0,157	18,4	0,145	18,7	0,174
Oxigênio Dissolvido (mg/m³)	4,7	0,572	6,0	0,377	5,3	0,408	3,7	0,851	5,0	0,497
Fósforo Total (mg/m³)	39,8	0,293	20,1	0,508	22,5	0,642	17,3	0,483	25,6	0,353
Nitrogênio Total (mg/m³)	992,0	0,297	566,1	0,615	117,7	0,883	258,3	1,304	648,9	0,383
Nitrogênio Orgânico (mg/m³)	441,7	0,630	421,3	0,679	75,5	1,322	132,1	1,525	352,9	0,565
Profundidade Secchi (m)	0,5	0,690	1,5	0,447	1,6	0,368	1,8	0,302	1,3	0,376
Clorofila-a (mg/m³)	2,7	0,401	6,5	0,388	8,1	0,519	9,8	0,473	5,8	0,343

Não foram consideradas as afluições de cargas não pontuais para o reservatório por duas razões: a primeira é que os principais cursos de água já foram considerados e as principais cargas já está neles incluídos; a segunda é que nas margens do reservatório não se observam usos do solo significativos que possam ser considerados como importantes fontes geradoras de poluição.

A calibração foi realizada buscando equiparar os valores estimados com aqueles calculados pelo PROFILE (Veiga, 2001) como representativos da média nos segmentos. Essa equiparação foi buscada, inicialmente, para os resultados que consideram o reservatório integralmente com suas características médias estimadas pela ponderação com a área de cada segmento. Além da calibração, em que se variaram os diversos coeficientes específicos de cada parâmetro, buscou-se o método de avaliação que forneceu o melhor ajuste.

A Tabela 8 mostra os principais resultados obtidos para o reservatório do Passaúna com o método de cálculo utilizado em cada caso.

Tabela 8 – Principais resultados da simulação do BATHTUB para o Passaúna

Variáveis	Método de Cálculo ¹	Segmentos								Total ²	
		E1 - Entrada		E2 - Olaria		E3 - Captação		E4 - Barragem		Observado	Estimado
		Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado	Observado	Estimado		
Fósforo Total (mg/m ³)	1	39,80	55,57	20,10	31,39	22,50	19,23	17,30	12,46	21,92	23,55
Nitrogênio Total (mg/m ³)	1	992,00	630,26	566,10	479,37	117,70	366,91	258,30	284,15	364,68	392,17
Carbono Nutriente (mg/m ³)		34,62	32,48	17,39	20,66	0,83	13,17	8,00	8,32	10,80	15,27
Clorofila-a (mg/m ³)	1	2,70	18,32	6,50	14,43	8,10	6,38	9,80	4,30	7,75	8,81
Prof. Secchi (m)	1	0,50	0,38	1,50	1,05	1,60	1,56	1,80	2,18	1,53	1,53
Nitrogênio Orgânico (mg/m ³)		441,70	410,53	421,30	298,70	75,50	190,48	132,10	158,74	215,61	228,06
Frequência de Clorofila-a > 10 mg/m ³ (%)		0,77	74,75	15,75	61,10	25,79	15,01	36,59	4,74	23,54	30,35
Frequência de Clorofila-a > 20 mg/m ³ (%)		0,02	32,58	1,69	20,15	3,85	1,56	7,20	0,27	3,30	5,13
Frequência de Clorofila-a > 30 mg/m ³ (%)		0,00	13,45	0,28	6,81	0,77	0,25	1,72	0,03	0,63	1,11
Frequência de Clorofila-a > 40 mg/m ³ (%)		0,00	5,83	0,06	2,53	0,20	0,05	0,50	0,00	0,16	0,30
Frequência de Clorofila-a > 50 mg/m ³ (%)		0,00	2,68	0,02	1,03	0,06	0,01	0,17	0,00	0,05	0,09
Frequência de Clorofila-a > 60 mg/m ³ (%)		0,00	1,31	0,00	0,46	0,02	0,00	0,06	0,00	0,02	0,03
Índice de Estado Trófico de Carlson - P _{total}		57,27	62,09	47,42	53,85	49,05	46,78	45,26	40,53	48,67	49,70
Índice de Estado Trófico de Carlson - Cl-a		40,34	59,13	48,96	56,79	51,12	48,77	52,99	44,92	50,69	51,95
Índice de Estado Trófico de Carlson - Prof. Secchi		69,99	73,92	54,16	59,27	53,23	53,56	51,53	48,79	53,86	53,84

¹ Método de cálculo utilizado e descrito no Capítulo 3

² Média ponderada pela área de cada segmento

CONCLUSÕES

Os resultados apresentados demonstram que o modelo forneceu boas respostas para a maioria das variáveis, sendo a que mostrou pior ajuste foi a Clorofila-a. Seu comportamento anômalo pode estar associado à indefinição entre as datas de realização das medições e a data introduzida no modelo e a menor massa de dados disponíveis para a simulação.

Uma outra discrepância se deu para as variáveis Nitrogênio Total, Nitrogênio Orgânico e Carbono Nutriente no segmento 3 (Captação). O que se observou é que o afluente Invasão acusou uma alta concentração de nutrientes em função da síntese feita pelo FLUX a partir de suas amostras. O modelo não consegue reproduzir esse comportamento, uma vez que ele busca uma estimativa média para todo o segmento e o que parece estar ocorrendo é a contaminação do local de amostragem por uma “mancha” de poluentes muito próxima.

Em relação aos estados tróficos dos segmentos, o que o modelo indica é que o primeiro segmento (Entrada) possui uma tendência à eutrofização, com os índices tróficos, concentrações e profundidade Secchi na faixa eutrófica. Os demais segmentos possuem valores que indicam uma tendência à eutrofização, mas ainda se situam na faixa de transição entre os estados mesotrófico e eutrófico.

A proximidade dos níveis tróficos do estado eutrófico indica a fragilidade de um reservatório próximo a uma região com forte tendência à ocupação das suas margens, revelando a importância de se manter sistemas de monitoramento da sua qualidade que sejam ágeis e com ferramentas que possam antecipar a ocorrência de efeitos indesejáveis ao seu funcionamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 19ª Edição. Washington, 1995.
- CARLSON, R. E. A trophic state index for lakes. **Limnology and Oceanography**, 22, p. 361-369, 1977.
- DIAS, L. N. **Estudo integrado da Bacia Hidrográfica do reservatório do Passaúna (Araucária – Paraná – Brasil), considerando a interrelação da ocupação dos solos com a qualidade das águas**. São Carlos, 1997. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo – USP.
- FISCHER, H.B. et al. **MIXING in Inland and Coastal Waters**. San Diego: Academic Press, Inc, 1979.
- SUDERHSA. **Qualidade das águas interiores do Estado do Paraná - 1987-1995**. Curitiba, 1997.
- VEIGA, B.V. **Modelagem computacional do processo de eutrofização e aplicação de um modelo de balanço de nutrientes a reservatórios da Região Metropolitana de Curitiba**.

Curitiba, 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica), Universidade Federal do Paraná, UFPR.⁴

WALKER, W.W. **Empirical Methods for Predicting Eutrophication in Impoundments – Report 3, Phase II: model Refinements.** Environmental and Water Quality Operational Studies, U.S. Corps of Engineers, March, 1985.

WALKER, W.W. **Simplified Procedures for Eutrophication Assessment and Prediction: User Manual.** U.S. Corps Engineers, Waterways Experiment Station, Instruction Report W-96-2, Setembro, 1996.