

# SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS EM REGIME NÃO-PERMANENTE: RIO DOS SINOS

Renato L. Garcia e Carlos E. M. Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS

Av. Bento Gonçalves, 9500 – PORTO ALEGRE e-mail [tucci@if.ufrgs.br](mailto:tucci@if.ufrgs.br)

---

## Resumo

*A simulação da qualidade da água é usualmente realizada com base no escoamento permanente e fluxo de montante para jusante, que é a condição crítica mais frequente. No entanto, existem situações em que o regime do escoamento é não-permanente como durante enchentes urbanas, efeito de maré ou de seiches. Neste caso, os modelos de qualidade da água em regime permanente usuais não representam de forma adequada as condições potencialmente críticas.*

*O modelo anteriormente apresentado por Tucci (1978), utilizado para a simulação da qualidade da água em rios em regime não-permanente, foi ampliado neste trabalho para simular um número maior de variáveis de qualidade da água como Nitrogênio, Fósforo, entre outros.*

*Este modelo foi aplicado ao rio dos Sinos, que escoar para o Delta do Jacuí no R.G. do Sul. O rio dos Sinos durante a estiagem sofre efeito de refluxo devido ao seiche provocado pelo Guaíba e Lagoa dos Patos. Durante este período as vazões são positivas e negativas devido ao efeito de maré.*

*O modelo tinha sido ajustado a este rio por Tucci e Moretti (1981) para as condições hidráulicas e para DBO e OD. Neste estudo o modelo foi ajustado para DBO, OD, N e P e utilizado para prognósticos quanto à necessidade de redução das cargas poluentes de forma a atender a legislação ambiental.*

## SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O comportamento da poluição em rios e o estudo dos mecanismos de transporte e auto-depuração da matéria orgânica são analisados através de indicadores como os parâmetros de qualidade da água. O termo

*parâmetro não é o mais adequado, porque pode ser confundido com um parâmetro de um modelo. Na realidade, no modelo matemático o parâmetro de qualidade da água é uma variável. Desta forma neste texto utilizaremos o termo variável.*

As principais variáveis são: o OD - oxigênio dissolvido, a DBO - demanda bioquímica de oxigênio e o coliforme. O DBO e o coliforme estão relacionados com a contaminação das águas e são os maiores indicadores da possibilidade da contaminação de veiculação hídrica. O OD é um indicador da manutenção das formas de vida aquática. Em alguns sistemas hídricos o nitrogênio e o fósforo são indicadores das condições de eutrofização.

A simulação da qualidade da água em rios é realizada com base em dois componentes básicos: (i) equações para representar o escoamento; (ii) equação de transporte de massa que retrata a variação da concentração da variável de qualidade da água.

## Condições de escoamento

A simulação usualmente é realizada para um evento ou para um período crítico. A condição crítica mais comum de qualidade da água ocorre durante a estiagem, quando a vazão é pequena e o regime é próximo de uma condição permanente. Desta forma, muitos modelos adotam esta condição para a simulação com fluxo proveniente de montante para jusante (Brown e Barnell, 1985).

O escoamento permanente pode ser uniforme e não-uniforme. No primeiro caso, a velocidade é constante ao longo do rio e na segunda varia de acordo com as condições físicas do mesmo. Nos rios a condição de regime uniforme praticamente não existe, mas pode-se utilizá-la com os erros inerentes. Esta foi a condição utilizada por Streeter e Phelps (1925) no primeiro modelo de qualidade da água para DBO e OD. Mode-

los mais recentes como o QUAL 2E (Brown e Barnwell, 1985) utilizam a condição de regime permanente não-uniforme com fluxo unidirecional. A informação de entrada do escoamento é a relação bi-unívoca entre velocidade e profundidade. Cabe portanto, ao usuário o cálculo das condições de escoamento e análise.

Estas relações são obtidas pelo cálculo de remanso (Tucci, 1993), mas geralmente o usuário do modelo não calcula, apenas utiliza alguma curva-chave existente e extrapola para o restante do rio. Esta prática, considera o escoamento uniforme em cada seção, reduzindo a potencialidade da análise.

As condições críticas em que o escoamento não é permanente podem ser: (i) eventos de cheia com grande quantidade de poluição, que ocorrem em áreas urbanas, pela drenagem do pluvial; (ii) quando existe oscilações a jusante devido a seiche ou maré; (iii) pelo transporte ou inundação de grande quantidade de nutrientes, gerando grande demanda de oxigênio devido as condições de fluxo como na inundação de áreas florestadas, erosão do fundo dos rios, entre outras.

Nas condições citadas, o escoamento é não-permanente e necessita de uma abordagem adequada para que seja possível representar bem o transporte de massa.

Tucci (1978) utilizou um modelo hidrodinâmico que discretiza as equações de Saint Venant por um esquema de diferenças finitas para representar o escoamento não-permanente. Este modelo, associado a equação de transporte, foi utilizado para simular a qualidade de uma rede de rios com resultados adequados. Tucci e Moretti (1984) mostraram a diferença de resultados no rio dos Sinos para abordagem em regime permanente e não-permanente com base em dados observados. Os erros podem ser significativos se as condições de escoamento não forem bem representadas.

### Condições de transporte

A variação da concentração de uma variável num sistema hídrico depende da advecção, difusão e dispersão que ocorre no fluxo, representadas na equação de transporte. Geralmente a equação de transporte unidimensional longitudinal é utilizada num rio. Esta é uma equação diferencial

parcial usualmente resolvida por esquemas numéricos de diferenças finitas.

No modelo de Streeter e Phelps o termo de dispersão é desprezado, o escoamento é uniforme e a solução obtida é analítica, representando grande simplificação. No modelo QUAL2E (Brown e Barnell, 1985), a equação de transporte unidimensional é resolvida com todos os seus termos por um esquema implícito de diferenças finitas regressivo. Esta solução utiliza condições de contorno constante, praticamente desprezando as variações temporais das concentrações. A equação de transporte é utilizada para cada variável simulada, de acordo com os termos internos e externos que interagem na mesma, em função da contribuição lateral, retirada de fluxo e reações químicas internas do fluxo. Neste modelo existe um extenso número de variáveis simuladas.

Neste estudo são reunidas a formulação hidrodinâmica e da equação de transporte apresentada por Tucci (1978) com a formulação das diferentes variáveis no modelo QUAL2E, desta forma permitindo a simulação da qualidade da água de várias variáveis em regime não-permanente.

## DESCRIÇÃO DO MODELO

### Módulo hidráulico

O escoamento em rios e canais é descrito pelas equações Saint Venant de continuidade e quantidade de movimento

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_o - S_f) \quad (2)$$

onde Q é a vazão em m<sup>3</sup>/s; A é a área em m<sup>2</sup>; t é tempo em s; x é a distância em m; q é a contribuição lateral em unidades de comprimento do rio em m<sup>2</sup>/s; y é a profundidade do escoamento em m; g é a aceleração da gravidade em m<sup>2</sup>/s; S<sub>o</sub> é a declividade do fundo do rio em m/m; S<sub>f</sub> é a declividade devido ao efeito de atrito em m/m.

Estas equações são resolvidas por um esquema *full implicit* progressivo apresentado por Chen (1973). Aplicando este

esquema numérico nas equações acima, resultam duas equações lineares seguintes (Tucci, 1978)

$$A_i Q_i^{t+1} + B_i y_i^{t+1} + C_i Q_{i+1}^{t+1} + D_i y_{i+1}^{t+1} = E_i \quad (3)$$

$$A'_i Q_i^{t+1} + B'_i y_i^{t+1} + C'_i Q_{i+1}^{t+1} + D'_i y_{i+1}^{t+1} = E'_i \quad (4)$$

onde  $i$  é uma seção genérica onde  $y$  e  $Q$  são determinados. Os coeficientes  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $C_i$ ,  $D_i$  e  $E_i$  dependem dos termos resultantes da discretização da equação da continuidade e  $A'_i$ ,  $B'_i$ ,  $C'_i$ ,  $D'_i$ ,  $E'_i$  da equação da quantidade de movimento.

Estas equações algébricas são aplicadas a cada trecho de rio, resultando em  $2(N-1)$  equações. Utilizando as 2 condições de contorno, resulta um sistema de equações de  $2N$  equações a  $2N$  incógnitas, onde  $N$  é o número de seções do rio. Este sistema de equações é resolvido em cada intervalo de tempo por um método de resolução de matriz que considera os termos nulos da matriz de coeficientes. Tucci (1978) apresentou também as equações quando existem confluências e barragens.

Neste modelo o parâmetro de ajuste é a rugosidade de cada seção transversal, introduzido na formulação através do termo de atrito.

## Módulo de Qualidade da Água

**Equação básica:** A equação de transporte unidimensional é a seguinte:

$$\frac{\partial(Ac)}{\partial t} + \frac{\partial(Qc)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( AE \frac{\partial c}{\partial x} \right) + S_i \quad (5)$$

onde  $c$  é a concentração da variável em mg/l;  $E$  é o coeficiente de dispersão longitudinal em  $m^2/s$ ;  $S_i$  é o termo de perdas e ganhos que depende de que cada variável simulada.

Esta equação foi resolvida por um esquema de diferenças finitas implícito regressivo, resultando na seguinte equação (Tucci, 1978)

$$L_i c_{i-1}^{t+1} + M_i c_i^{t+1} + N_i c_{i+1}^{t+1} = O_i \quad (6)$$

onde os termos  $L_i$ ,  $M_i$ ,  $N_i$  e  $O_i$  são coeficientes que dependem dos termos discretizados da equação 5.

Esta equação é aplicada em cada trecho do rio, resultando num sistema de  $N-2$  equações. As condições de contorno de montante e jusante são fornecidas pelo usuário, resultando em mais duas equações. Desta forma serão  $N$  equações a  $N$  incógnitas, representando concentrações em cada seção. Este sistema é resolvido por um método que trata de uma matriz banda. Tucci (1978) apresenta a formulação para resolução de uma matriz deste tipo. Esta equação é resolvida para cada variável definida pelo seu termo de perdas e ganhos.

**Termo de perdas e ganhos para cada variável:** O termo de perdas e ganhos das diferentes variáveis simuladas foram apresentados por Brown e Barnwell, (1985) e utilizados neste modelo. Na figura 1 são apresentadas as interações entre as diferentes variáveis e a seguir são apresentadas as equações do termo de perda e ganhos de cada variável.

### DBO

$$S_i = -(k_1 + k_3) C_{dbo} A + q C_{l d b o} \quad (7)$$

onde  $k_1$  é o coeficiente de remoção de DBO carbonáceo, usualmente é fornecido em  $dia^{-1}$ , na equação acima deve entrar em  $dia^{-1}$ ;  $k_3$  é o coeficiente de remoção de DBO pela sedimentação e absorção em  $dia^{-1}$ .  $C_{dbo}$  é a concentração de DBO em mg/l;  $C_{l d b o}$  é a concentração de DBO na contribuição lateral em mg/l.

### Algas

$$S_i = (\mu - \rho - \frac{\sigma}{d}) C_{al} A + q C_{l al} \quad (8)$$

onde  $\mu$  é a taxa total de crescimento específico das algas em  $dia^{-1}$ ;  $\rho$  é a taxa local de respiração das algas em  $dia^{-1}$ ;  $\sigma$  é a taxa local de deposição (sedimentação) das algas em  $dia^{-1}$ ;  $d$  é a profundidade média em m;  $C_{al}$  é a concentração das algas em mg/l;  $C_{l al}$  é a concentração de algas na contribuição lateral em mg/l.

### Nitrogênio orgânico

$$S_i = \alpha_1 \rho \cdot C_{al} \cdot A - (\beta_3 + \sigma_4) \cdot N_4 \cdot A \quad (9)$$

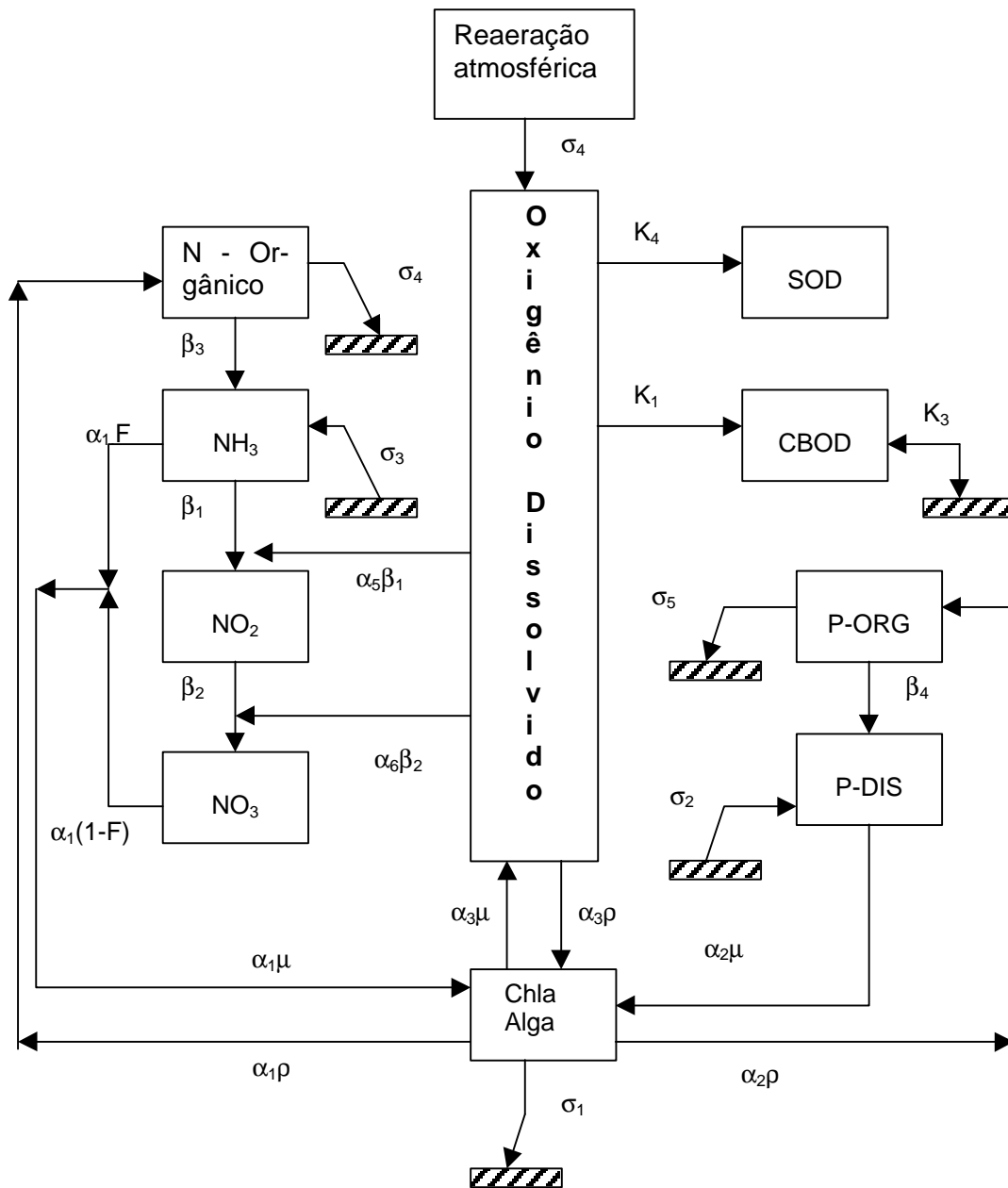


Figura 1 Interação entre as variáveis (Brown e Barnell, 1985)

onde  $N_4$  é a concentração de nitrogênio orgânico em  $\text{mg-N/l}$ ;  $\alpha_1$  é a fração de alga biomassa que é nitrogênio  $\text{mg-N/mg-C}_{al}$ ;  $\beta_3$  é a taxa constante para hidrólise do nitrogênio para nitrogênio amoniacal (depende da temperatura) em  $\text{dia}^{-1}$ ; e,  $\sigma_4$  é a taxa de sedimentação do nitrogênio orgânico (dependente da temperatura) em  $\text{dia}^{-1}$ .

#### Nitrogênio amoniacal

$$S_1 = \beta_3 \cdot N_4 \cdot A - \beta_1 \cdot N_1 \cdot A + \frac{\sigma_3}{d} \cdot A - F_1 \cdot \alpha_1 \cdot \mu \cdot C_{al} \cdot A \quad (10)$$

onde  $N_1$  é a concentração de nitrogênio amoniacal em  $\text{mg-N/l}$ ;  $N_3$  é a concentração de nitrogênio/nitrato em  $\text{mg-N/l}$ ;  $\beta_1$  é a taxa constante de oxidação biológica do nitrogênio amoniacal (dependente da temperatura) em  $\text{dia}^{-1}$ ;  $\sigma_3$  é a taxa de produção bentônica

de nitrogênio amoniacal em  $\text{mg-N/m}^2 \cdot \text{dia}$ ; e,  $F_1$  é a fração de retirada de nitrogênio amoniacal via algas em  $\text{dia}^{-1}$ .

#### Nitrogênio nitrito

$$S_i = \beta_1 \cdot N_1 \cdot A - \beta_2 \cdot N_2 \cdot A \quad (11)$$

$\beta_2$  - taxa de oxidação do nitrogênio/nitrito em  $\text{dia}^{-1}$ ;  $N_2$  é a concentração de nitrogênio nitrito,  $\text{mg-N/l}$ ;

#### Nitrogênio Nitrato

$$S_i = \beta_2 \cdot N_2 \cdot A - (1 - F_1) \cdot \alpha_1 \cdot \mu \cdot C_{al} \cdot A \quad (12)$$

$N_3$  é a concentração de nitrogênio nitrito em  $\text{mg-N/l}$ . Este termo não aparece na equação de  $S_i$ , mas é a variável resolvida na equação de transporte.

#### Fósforo orgânico:

$$S_i = \alpha_2 \cdot \rho \cdot C_{al} \cdot A - (\beta_4 + \sigma_5) \cdot P_1 \cdot A \quad (13)$$

$P_1$  - concentração de fósforo orgânico em  $\text{mg-P/l}$ ;  $\alpha_2$  é a parcela de fósforo nas algas em  $\text{mg-P/mg-C}_{al}$ ;  $\beta_4$  é a taxa de decaimento do fósforo orgânico (dependente da temperatura) em  $\text{dia}^{-1}$ ;  $\sigma_5$  é a taxa de sedimentação do fósforo orgânico em  $\text{dia}^{-1}$ .

#### Fósforo dissolvido

$$S_i = \beta_4 \cdot P_1 \cdot A + \frac{\sigma_2}{d} \cdot A - \alpha_2 \cdot \mu \cdot C_{algas} \cdot A \quad (14)$$

onde a variável é representada por  $P_2$  é a concentração de fósforo inorgânico em  $\text{mg-P/l}$ ;  $\beta_4$  é a taxa de decaimento do fósforo orgânico em  $\text{dia}^{-1}$ ; e,  $\sigma_2$  é a produção bentônica de fósforo dissolvido, em  $\text{mgN/m}^2 \cdot \text{dia}$ .

#### Oxigênio dissolvido

$$S_i = K_2 \left( OD^* - OD \right) A + (\alpha_3 \cdot \mu - \alpha_4 \cdot \rho) \cdot A - K_1 \cdot L \cdot A - \dots - \frac{K_4}{d} \cdot A - \alpha_5 \cdot \beta_1 \cdot N_1 \cdot A - \alpha_6 \cdot \beta_2 \cdot N_2 \cdot A \quad (12)$$

onde  $K_2$  é o coeficiente de reaeração,  $\text{dia}^{-1}$ ;  $OD^*$  é a concentração de saturação de oxigênio dissolvido em  $\text{mg/l}$ ;  $OD$  é a concentração de oxigênio dissolvido em  $\text{mg/l}$ ;  $\alpha_3$  é

a taxa de produção de oxigênio por fotossíntese por unidade de algas em  $\text{mg-O/mg C}_{al}$ ;  $\alpha_4$  é o consumo de oxigênio via respiração por unidade de algas em  $\text{mg-O/mg C}_{al}$ ;  $\alpha_5$  é o consumo de oxigênio na reação de oxidação da amônia em  $\text{mg-O/mg-N}$ ;  $K_4$  é a demanda bentônica de oxigênio em  $\text{g/m}^2 \cdot \text{dia}$ ; e,  $\alpha_6$  é o consumo de oxigênio via oxidação do nitrogênio/nitrito em  $\text{mg-O/mg-C}_{al}$ .

**Parâmetros do modelo:** Os parâmetros do módulo de qualidade da água introduzidos nas equações anteriores são:

$E$  - coeficiente de dispersão longitudinal ( $\text{m}^2/\text{s}$ ): Este coeficiente pode ser fornecido pelo usuário ou estimado com base em diferentes equações apresentadas na literatura (Tucci, 1978);

$K_1$  - coeficiente de remoção da DBO carbonácea ( $\text{dia}^{-1}$ );

$K_2$  - coeficiente de reaeração ( $\text{dia}^{-1}$ ). Este parâmetro também possui várias equações para estimativa com base na profundidade e velocidade. No entanto, em estuários o seu valor deve ser estimado com outras equações para este tipo de comportamento.

$K_3$  - coeficiente de remoção da DBO pela sedimentação e absorção ( $\text{dia}^{-1}$ );

$K_4$  - demanda bentônica de oxigênio ( $\text{mg-O} / \text{ft}^2 \cdot \text{dia}$ );

Os coeficientes seguintes são gerados para a determinação da equação de  $\mu$  correspondente a taxa de crescimento específico das algas, apresentados em Brown e Barwell (1985).

$K_N$  - constante Michaelis-Menten de saturação média para o nitrogênio ( $\text{mg-N/l}$ );

$K_P$  - constante Michaelis-Menten de saturação média para o fósforo ( $\text{mg-P/l}$ );

$P_N$  - fator de preferência por amônia (algas).

Os parâmetros seguintes aparecem nas equações apresentadas.

$\alpha_1$  - fração de nitrogênio na biomassa de algas ( $\text{mg-N/mg-C}_{al}$ );

$\alpha_2$  - fração de fósforo na biomassa de algas ( $\text{mg-P/mg-C}_{al}$ );

$\alpha_3$  - taxa de produção de oxigênio por unidade de crescimento de algas ( $\text{mg-O/mg-C}_{al}$ );

- $\alpha_4$  – taxa de consumo de oxigênio por unidade de respiração de algas (mg-O/mg-C<sub>al</sub>);
- $\alpha_5$  – taxa de consumo de oxigênio por unidade de oxidação de amônia (mg-O/mg-N);
- $\alpha_6$  – taxa de consumo de oxigênio por unidade de oxidação de nitrito (mg-O/mg-N);
- $\beta_1$  – taxa de oxidação biológica do nitrogênio amoniacal (dia<sup>-1</sup>);
- $\beta_2$  – taxa de oxidação biológica do nitrogênio/nitrito (dia<sup>-1</sup>);
- $\beta_3$  – taxa de hidrólise do nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal (dia<sup>-1</sup>);
- $\beta_4$  – taxa de decaimento do fósforo orgânico em fósforo dissolvido (dia<sup>-1</sup>);
- $\sigma_1$  – taxa de local de deposição (sedimentação) de algas (m/dia);
- $\sigma_2$  – taxa de produção bentônica de fósforo dissolvido (mg-P/m<sup>2</sup>.dia);
- $\sigma_3$  – taxa de produção bentônica de nitrogênio amoniacal (mg-N/m<sup>2</sup>.dia);
- $\sigma_4$  – taxa de sedimentação do nitrogênio orgânico (dia<sup>-1</sup>);
- $\sigma_5$  – taxa de sedimentação do fósforo orgânico (dia<sup>-1</sup>);
- $\mu_{max}$  – taxa de máxima de crescimento de algas (dia<sup>-1</sup>);
- $\rho$  – taxa de respiração de algas (dia<sup>-1</sup>);

## RESULTADOS

### Bacia do rio dos Sinos

A bacia do rio dos Sinos situa-se a Nordeste do Rio Grande do Sul no Brasil e escoar para o Delta do Jacuí, um complexo de braços, confluências e ilhas fluviais de pequeno porte próximo da cidade de Porto Alegre. A bacia tem área de 3.700 km<sup>2</sup>, comprimento de rio de 190 km, com desnível de cerca de 900 m entre suas cabeceiras e sua foz.

A bacia no seu trecho inferior é densamente ocupada com área industrial da Região Metropolitana de Porto Alegre e por indústrias poluentes.

A cobertura vegetal natural está hoje reduzida a cerca de 10% da área. As principais atividades são: exploração agrícola de minifúndios e de madeira; agricultura arrojada e agropecuária, notadamente avicultura, suinocultura e pecuária de leite e de

corde; fábricas de papel, siderúrgica, indústrias têxteis, esmagadora de soja, curtumes e calçados, fábrica de refrigerantes, mobiliário, refinaria de petróleo, plásticos, metalúrgicas, mineração de basalto, entre outros.

O trecho em estudo corresponde a parte inferior da bacia onde existe maior concentração urbana e de indústria. Este trecho tem 67,5 km entre Campo Bom e a foz do Sinos no Delta do Jacuí (figura 1).

Na seção de Campo Bom existe um posto fluviométrico pertencente a ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. A série utilizada foi de 1940 a 1992. Este posto tem curva de descarga bem definida e não sofre efeito de jusante. Tucci (1984) cita uma campanha de medição de níveis e vazões no rio dos Sinos realizado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas em 1979. O referido estudo utilizou estes dados para ajustar o módulo hidrodinâmico do modelo aqui apresentado, obtendo um coeficiente de Manning de 0,03 (Tucci e Milano, 1981). O módulo de qualidade da água com os parâmetros de OD e DBO também foram ajustados para as cargas existentes na época.

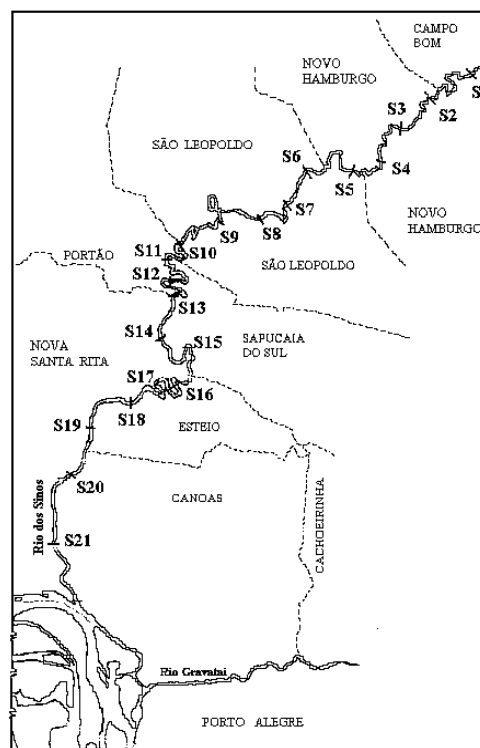


Fig. 1 Localização das seções transversais do modelo ao longo do rio dos Sinos

No período de 1989 a 1994 foram efetuadas medições de vazão, concentração de OD, DBO, N total e P total em seis seções ao longo do rio em diferentes datas. Estes dados foram consolidados com base na vazão em Campo Bom. Foram estabelecidas 7 faixas de vazões (tabela 1) e para cada seção as concentrações foram classificadas de acordo com estes intervalos, obtendo-se o intervalo de variação de concentração e o valor médio. Para as demais seções as vazões de contribuição lateral foram estimadas com base em dados observados.

Tabela 1 Intervalos de vazões na seção 1 (m<sup>3</sup>/s)

Intervalo	Vazão inferior	Vazão superior	Vazão média
1	6,0	20	14,4
2	20,1	30	24,5
3	30,1	40	34,2
4	40,1	60	49,6
5	60,1	100	75,6
6	100,1	150	125,7
7	150,1	367	213,6

### Condições de Escoamento no rio dos Sinos

O escoamento do sistema de rios e lagoas do Delta do Jacuí e Guaíba apresenta um comportamento diferenciado dos rios tradicionais. Nos rios de comportamento fluvial que não sofrem efeito de jusante observa-se o seguinte: (i) há uma relação bi-unívoca entre a vazão e o nível numa seção; (ii) quando o nível aumenta, a vazão aumenta e vice-versa; (iii) durante a estiagem as vazões variam muito pouco ao longo do rio ou em vários dias.

No sistema em estudo este processo não ocorre, devido ao efeito da Lagoa Patos-Guaíba – Delta do Jacuí sobre os níveis dos rios durante o período de estiagem.

A Lagoa dos Patos está ligada ao oceano, próximo da cidade de Rio Grande. A oscilação da maré nesta região da costa é pequena, influenciando as cotas do canal de ligação e na vizinhança do mesmo junto a Lagoa. Como a Lagoa dos Patos tem cerca de 200 km de comprimento e 60 km de largura, ela representa um superfície de água muito extensa onde o vento atua constantemente. O vento tende a provocar elevação

de níveis na direção em que atua, produzindo uma oscilação semelhante á maré, com períodos e amplitudes variáveis em função do efeito da intensidade do vento sobre a superfície líquida. Este tipo de efeito é denominado *seiche*. O aumento de nível na Lagoa dos Patos tem efeito semelhante no Guaíba (50 km de comprimento com 14 km de largura). Estes dois sistemas funcionam interligados quanto ao efeito do seiche. O Delta do Jacuí, formado pelos rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí é o limite superior deste sistema de Lagoas (Patos e Guaíba). O Delta do Jacuí é formado por um grande número de ilhas e tem uma bacia de 82.000 km<sup>2</sup>, onde o rio dos Sinos representa menos de 5%.

A outra variável que influencia os níveis dentro do Delta do Jacuí e no trecho inferior dos afluentes é a vazão proveniente das bacias hidrográficas mencionadas. Quando as vazões são muito baixas a montante, a energia produzida pela oscilação dos níveis das lagoas é capaz de produzir inversão de fluxo (jusante para montante) no Delta do Jacuí e no trecho inferior dos rios que formam o Delta, como o Sinos. Se a declividade se inverte, existe a tendência do fluxo mudar de direção, já que com uma cota maior a jusante o fluxo tende a ser no sentido contrário. Como esta cota não se mantém permanentemente alta, com a redução do seu nível, o fluxo volta a ser positivo.

Portanto, a condição do sistema que mais favorece a ocorrência de refluxos (a vazões negativas) no trecho inferior do rio dos Sinos é a ocorrência simultânea de baixas vazões no rio, com altos níveis de água no Delta do Jacuí, foz do Sinos. Estas condições ocorrem no verão, nos meses de dezembro a fevereiro. A ocorrência dos níveis na foz do rio dos Sinos é representado pela régua do posto Harmonia em Porto Alegre. Na tabela 2 é apresentada a probabilidade de ocorrência de níveis neste local.

Para o posto de Campo Bom no rio dos Sinos, a montante do trecho em estudo, a bacia tem 2875 km<sup>2</sup>. Os riscos de ocorrência das vazões neste local são apresentados na tabela 3.

### Condições de Qualidade da Água

No trecho em estudo existem seis seções ( 1, 4, 8, 10, 17 e 20) onde são monitoradas as variáveis DBO, OD, N total e P

total, entre outras (DMAE, 1975 e 1981). Para cada uma destas seções as concentrações foram selecionadas com base na faixa de vazão existente a montante (seção 1). Para cada vazão foi obtida uma faixa de valores observados e o valor médio do intervalo. Deve-se destacar que as concentrações da tabela não ocorreram num mesmo período, mas são uma média em cada seção, para as concentrações classificadas segundo a vazão. Não existem medidas simultâneas. Na tabela 4 são apresentados os valores para a primeira faixa.

Tabela 2 Probabilidade dos níveis no posto Harmonia de dezembro a fevereiro para série de 1941 a 1967 (Zamanillo, 1988)

Nível, referido ao mar	Probabilidade de que ocorram níveis maiores (%)
0,99	5
0,89	10
0,72	25
0,57	50

Tabela 3 Probabilidade de Vazões mínimas com 7 dias de duração

Vazão mínima de 7 dias de duração M <sup>3</sup> /s	Tempo de retorno Anos
2,47	20
3,00	10
4,11	5
7,73	2

Tabela 4 Concentrações registradas na primeira faixa de vazão (mg/l) Q = 14,43 m<sup>3</sup>/s

	S 01	S04	S08	S 10	S17	S 20
N máx	1,67	2,86	4,41	7,86	9,79	7,68
N mín	0,98	1,04	1,15	1,66	2,05	2,89
N méd	1,31	1,85	2,30	3,29	4,64	4,52
P máx	0,28	0,58	1,73	1,35	1,07	0,95
P mín	0,19	0,26	0,39	0,47	0,41	0,38
P méd	0,23	0,39	0,70	0,73	0,65	0,62
OD máx	7,60	8,80	6,00	3,80	3,80	5,30
OD mín	6,00	5,00	4,00	1,80	0,00	0,80
OD med	6,75	6,19	4,91	3,06	1,87	3,53
DBO máx	4,00	7,80	6,80	11,3	14,0	8,20
DBO mín	0,50	1,20	1,10	1,30	1,70	2,30
DBO med	1,93	2,94	3,81	4,51	5,83	5,19

A carga poluidora neste trecho é apresentada na tabela 5. Estes valores foram convertidos em concentrações com

base na vazão de contribuição lateral. (carga = q. c, onde q é vazão de contribuição lateral e c a sua concentração )

Tabela 5 Carga poluidora média anual nos trechos em ton/ano (Pereira, 1996)

Trecho	DBO	P total	N total
S1 – S4	1.374,3	170,5	512,6
S4 – S8	2.125,8	371,0	1.350,1
S8– S10	1.807,2	214,5	949,1
S10-S17	491,0	57,2	1.993,4
S17-S20	491,0	43,2	179,0
S20-S21	910,9	115,8	621,0

### Ajuste do modelo

Como não existiam dados registrados durante um período definido, mas apenas observações de concentrações em diferentes seções em datas variadas, o ajuste dos parâmetros foi realizado buscando apenas uma tendência média dos parâmetros em algumas das seções.

O ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado de forma isolada para cada uma das faixas de vazão de montante. A vazão média da faixa foi adotada para a primeira seção (S1) como condição de montante. Como condição de jusante foi adotado o nível correspondente a 0,57 m (50% de probabilidade) como valor médio e uma oscilação senoidal e amplitude de 17cm (Zamanillo, 1988).

As condições hidráulicas iniciais foram obtidas executando o modelo por 6 dias com a mesma oscilação, onde se calculou, para o último ciclo de 24 horas, os valores dos níveis e vazões em todas as seções do modelo.

Para o módulo de qualidade da água torna-se mais difícil de estabelecer a condição inicial porque o tempo necessário para que seja atingido um regime de permanência é muito longo devido ao transporte advectivo dos constituintes. Esta condição inicial foi obtida a partir de uma estimativa média dos valores registrados nas seções de medição.

Os parâmetros foram divididos em três grupos: (i) parâmetros mais sensíveis; (ii) parâmetros sensíveis, mas que podem ser obtidos com base em relações com os primeiros; (iii) parâmetros pouco sensíveis. Esta definição foi realizada com base na literatura e na análise de sensibilidade dos



parâmetros através de simulação comparativa.

Os parâmetros sensíveis são:  $k_1$ ,  $k_3$  e concentração de algas. Os parâmetros do segundo grupo são:  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $\sigma_1$ . Os parâmetros menos sensíveis foram fixados com base nos valores estimados da literatura e encontram-se na tabela 6. Na tabela 7 são apresentados os valores ajustados para os parâmetros dos dois primeiros grupos.

Tabela 6 Valores dos parâmetros do terceiro grupo

Parâmetro	Valor
$K_4$ (mg-O/m <sup>2</sup> .dia)	2,15
$K_N$ (mg-N/l)	0,15
$K_P$ (mg-P/l)	0,05
$P_n$	0,5
$\alpha_1$ (mg-N/mg-A)	0,085
$\alpha_2$ (mg-P/mg-A)	0,012
$\alpha_3$ (mg-N/mg-A)	1,5
$\alpha_4$ (mg-P/mg-A)	2,0
$\alpha_5$ (mg-N/mg-A)	3,5
$\alpha_6$ (mg-P/mg-A)	1,2
$\beta_1$ (dia <sup>-1</sup> )	0,15
$\beta_2$ (dia <sup>-1</sup> )	1,0
$\beta_3$ (dia <sup>-1</sup> )	0,25
$\beta_4$ (dia <sup>-1</sup> )	0,2
$\sigma_2$ (mg-P/ft <sup>2</sup> .dia)	0,09
$\sigma_3$ (mg-N/ft <sup>2</sup> .dia)	0,36
$\sigma_4$ (dia <sup>-1</sup> )	0,1
$\sigma_5$ (dia <sup>-1</sup> )	0,1

Tabela 7 Parâmetros ajustados do primeiro e segundo grupo

Parâmetro	Valor
$K_1$ (dia <sup>-1</sup> )	0,18
$K_3$ (dia <sup>-1</sup> )	0,1
$C_{algas}$ (mg/l)	1,0
$\mu$ (dia <sup>-1</sup> )	1,0
$\rho$ (dia <sup>-1</sup> )	0,1
$\sigma_1$ (ft/dia)	2,0

A simulação foi realizada por um período de 24 horas e de acordo com a faixa de vazão envolvida foram comparadas somente as seções que estavam no trecho atingido pelo transporte advectivo. Para que todas as seções fossem analisadas a simulação deveria ser realizada por um período muito mais longo, podendo distorcer os resultados médios, já que as condições de simulação definidas têm as seguintes limitações:

1. As condições de contorno de jusante adotadas não foram as reais e a de montante foi um valor médio do período;
2. As contribuições laterais de vazão e carga foram estimadas por cenários e não foram medidas;
3. As condições iniciais foram estimadas e os dados experimentais utilizados se referem a valores de medições pontuais isoladas.

Nas figuras 2 a 5 são apresentados os valores obtidos pelo modelo e a faixa de valores de concentração de DBO, OD, N e P em cada seção para o intervalo de vazão entre 6,70 e 20 m<sup>3</sup>/s representado por um valor médio de 14,4 m<sup>3</sup>/s.

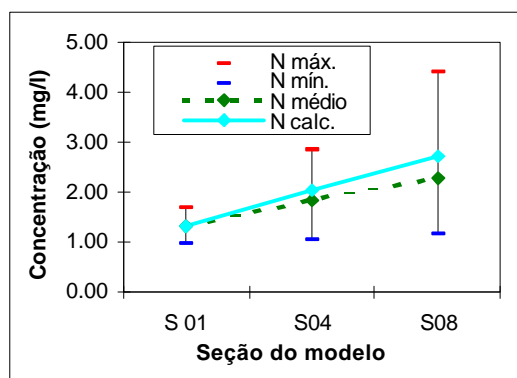


Fig. 2 Concentrações de N total para a primeira faixa de vazão ( $Q = 14,34$  m<sup>3</sup>/s)

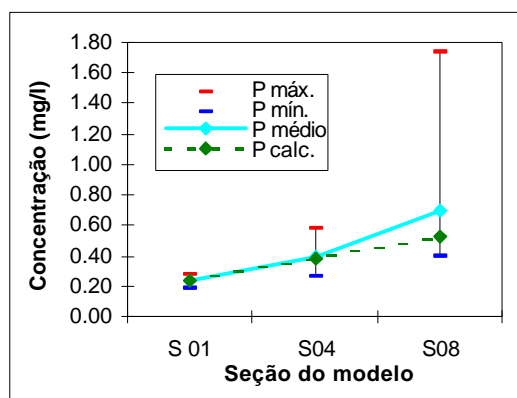


Fig. 3 – Concentrações de P total para a primeira faixa de vazão ( $Q = 14,34$  m<sup>3</sup>/s)

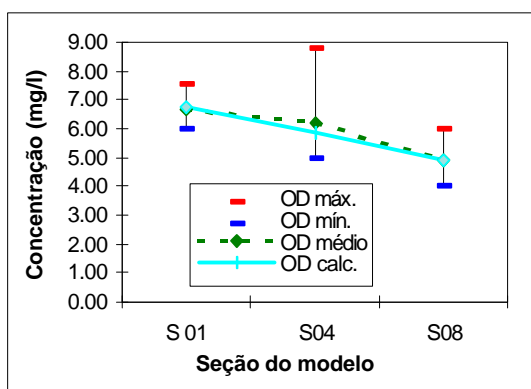


Fig. 4 – Concentrações de OD para a primeira faixa de vazão ( $Q = 14,34 \text{ m}^3/\text{s}$ )

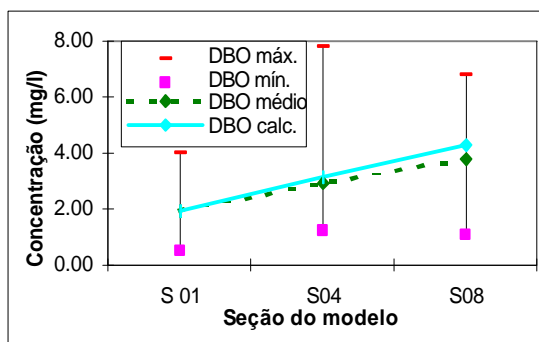


Fig. 5 – Concentrações de DBO para a primeira faixa de vazão ( $Q = 14,34 \text{ m}^3/\text{s}$ )

### Simulação de cenários

Os cenários analisados neste estudo correspondem a redução de carga lançada no rio dos Sinos, visando manter condições ambientes adequadas para o rio. Para tanto foram estudadas reduções de 15, 25, 40, 75 e 90% das cargas totais lançadas.

Para analisar estes cenários foram utilizadas as seguintes condições hidráulicas:

1. Vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno a montante;
2. Cota a jusante correspondente a 50% da permanência;
3. Simulação de 7 dias;
4. Carga atual estimada;
5. Simulação de 7 dias, utilizando-se apenas as últimas 24 horas. Este procedimento visou evitar tendenciosidade das condições iniciais.

Nas figuras 6 a 9 são apresentados os perfis de concentrações para as diferentes variáveis. Pode-se observar que para que o rio apresente condições de vida aquática é necessário uma redução de cerca de 90% das cargas.

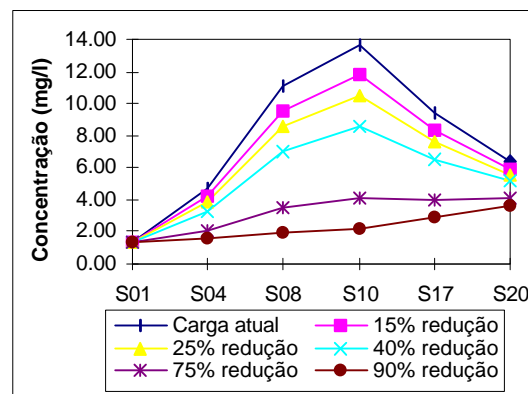


Fig 6 - Concentração média de N total no último ciclo de 24 horas

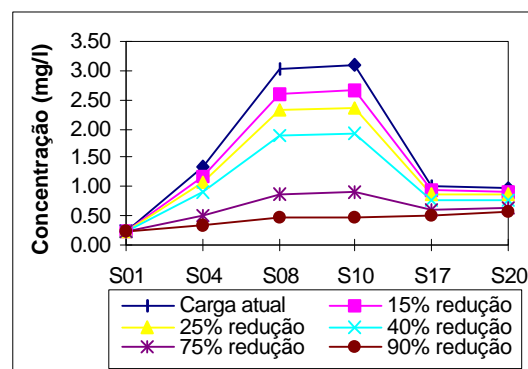


Fig 7 - Concentração média de P total no último ciclo de 24 horas

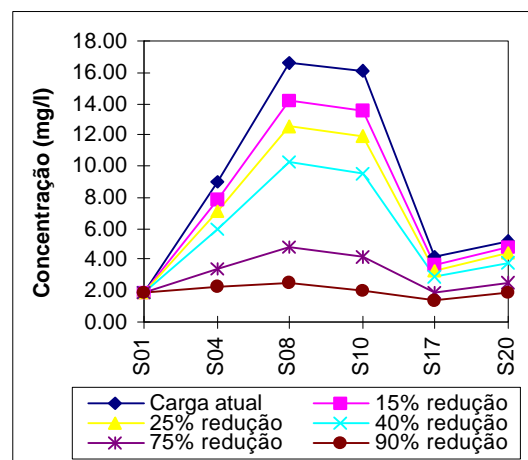


Fig 8 - Concentração média de DBO no último ciclo de 24 horas

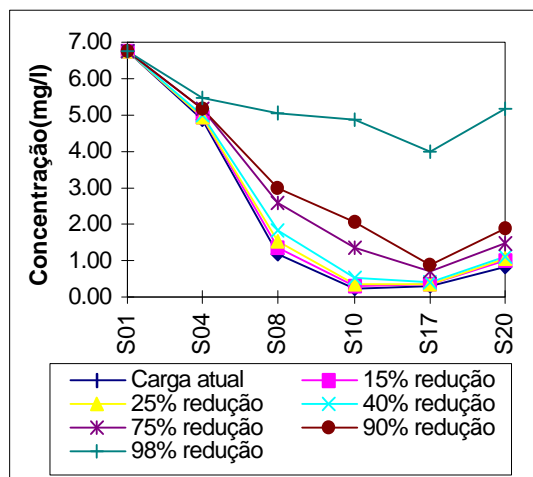


Fig 9 - Concentração média de OD no último ciclo de 24 horas

Apesar do modelo representar o escoamento não-permanente, os resultados apresentados se referem a um perfil das concentrações médias das últimas 24 horas do sistema, o que necessariamente não é o mais desfavorável em todas as seções.

Os resultados mostram que as cargas são elevadas face à capacidade de diluição do rio. Pode-se observar que no trecho mais a jusante do sistema, as condições de qualidade da água não são tão graves como aquelas ao longo do rio. Isto se deve a: (a) diluição ao longo do rio; (b) o volume de jusante do rio Jacuí que permite a diluição do Sinos durante o refluxo.

### CONCLUSÕES

O modelo em regime não-permanente utilizado neste estudo foi modificado de versão anterior visando acrescentar novos constituintes de qualidade da água. O modelo foi utilizado no rio dos Sinos onde já tinha sido ajustado a parte hidráulica e parte da qualidade da água (Tucci e Moretti, 1981). O modelo teve seu ajuste atualizado para os parâmetros adicionais neste estudo. As simulações realizadas visaram avaliar a redução de carga necessária para se obter uma concentração média de 24 horas dentro de padrões para ser enquadrado na

classe 3 da resolução do CONAMA (OD > 4 mg/l).

Foi também avaliada a variabilidade em 24 horas, mostrando que, em algumas seções, mesmo com a redução de 90%, neste intervalo pode ocorrer uma variação de 30% na concentração. Isto mostra que o valor mínimo obtido pode, durante algum período do dia, ficar abaixo dos valores obtidos.

O modelo não foi explorado dentro de toda a sua capacidade, mas mostrou-se potencialmente importante para analisar a qualidade de água em regime não-permanente.

### REFERÊNCIAS

- BROWN, L. C., BARNWELL, T. O., Jr. 1985. Computer program documentation for the enhanced stream quality model QUAL2E. Athens: EPA. 235 p. (EPA 600/3-85/065).
- DMAE. CESB. 1975. *Qualidade sanitária do rio dos Sinos*. Porto Alegre. 108 p. (DMAE. Publicação n. 16).
- DMAE. CESB. 1981. *Qualidade sanitária do rio dos Sinos*. Porto Alegre. V. 2. (DMAE. Publicação n. 33).
- PEREIRA, 1996. *Análise de critérios de outorga e de cobrança pelo uso da água na bacia do rio dos Sinos* Dissertação de mestrado. Curso de pósgraduação em Recursos Hídricos e Saneamento IPH/UFRGS
- TUCCI, C. 1978. *Hydraulic and water quality model for a river network*. Fort Collins: Colorado State University. Tese (Doutorado).
- TUCCI, C.E.M. 1993. *Hidrologia Ciência e Aplicação*. Edusp Editora da UFRGS ABRH. 952p.
- TUCCI, C.E.M.; MORETTI, L., 1981. Comparison of Steady and Unsteady river water quality model. IAHS publication n.
- ZAMANILLO, E. 1988. *Previsão em tempo real em uma hidrovía controlada por barragens*. Dissertação de Mestrado - IPH- UFRGS. 259p.

## Water Quality Simulation in Rivers on unsteady flow conditions: Sinos River

### Abstract:

Usually water quality simulation in rivers is simulated assuming steady flow conditions and upstream to downstream flow direction. It is frequent water quality critical condition. Therefore, there are situations in which the flow is not steady such as: urban floods, downstream tide effects and seiches. In these conditions water quality models based in steady state conditions are not sound tools for simulation.

A former model presented by Tucci (1978), used for simulation of water quality in river for unsteady flow conditions was updated in this study to simulate additional water quality parameters such as Nitrogen, Phosphorus among others.

This models was applied to Sinos River which flows to Jacui Delta in Rio Grande do Sul, Brasil. During low flows seasons Sinos River has downstream flow control due to seiche effect from Guaíba Lake and Patos Lagoon

The model was fitted to this river reach by Tucci and Moretti(1981) for its hydraulics and DBO and OD parameters. In this study the fitting was done to DBO, OD, N and P. After that the model was used to study the level of load reduction in order to accomplish the environment legislation requirements.