

## IV-246 - AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE ASSIMILAÇÃO DE COMPOSTOS DE NITROGÊNIO EM RIOS A PARTIR DA APLICAÇÃO DE MODELO MATEMÁTICO DE QUALIDADE DE ÁGUA

**Tatiana Candeia da Silva**

Técnicóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

**Liziane de Lima Souza**

Técnicóloga em Saneamento Ambiental pelo Instituto Federal do Espírito Santo.

**Marco Aurélio Costa Caiado**

Doutor em Engenharia de Sistemas Biológicos pela Virginia Polytechnic Institute and State University. Professor da Coordenadoria de Saneamento Ambiental do Instituto Federal do Espírito Santo.

**Jose Antonio Tosta dos Reis<sup>(1)</sup>**

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos/USP. Professor do Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória, ES. CEP: 29.075-910. Telefone: (27) 4009-2648. e-mail: tosta@ct.ufes.br.

### RESUMO

O nitrogênio é um componente relevante no contexto da geração e do controle da poluição das águas. Ao mesmo tempo em que é um elemento indispensável para a produção dos ecossistemas aquáticos, pode ser o agente causador de diversos problemas de qualidade de água, como a eutrofização, toxicidade da amônia, redução dos níveis de oxigênio dissolvido, além de estar relacionado com doenças como a metemoglobinemia. Dentro de seu ciclo, o nitrogênio se alterna em vários estados de oxidação, sendo encontrado nas formas de nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato. As transformações do nitrogênio que ocorrem em cursos d'água podem ser simuladas com auxílio de modelos matemáticos de qualidade de água. Este trabalho buscou avaliar, a partir de simulações computacionais, o comportamento dos compostos de nitrogênio na porção final do Rio Piracicaba, curso d'água afluente do Rio Doce e receptor de altas cargas de esgotos domésticos e industriais. Como ferramenta para as simulações computacionais foi utilizado o modelo QUAL-UFMG. Foram realizados oito grupos de simulações computacionais, buscando avaliar os efeitos da combinação de diferentes constantes cinéticas que regulam as reações do ciclo do nitrogênio e a adoção de diferentes condições de vazão do Rio Piracicaba. Adicionalmente, avaliou-se o lançamento de um efluente doméstico bruto típico com diferenças na concentração de nitrogênio e na vazão. Os resultados foram comparados com os padrões estabelecidos pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) para rios classe 2, referentes aos parâmetros nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato. Os resultados demonstraram que os compostos de nitrogênio não se apresentaram como limitantes para o lançamento de efluentes domésticos brutos na porção final do Rio Piracicaba.

**PALAVRAS-CHAVE:** compostos nitrogenados, modelo matemático, qualidade de água, rio Piracicaba.

### INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Os compostos de nitrogênio podem ser introduzidos em corpos hídricos através de fontes naturais ou como consequência de atividades antropogênicas. A fixação biológica, precipitações, escoamento e drenagem rural são alguns exemplos de fontes naturais de nitrogênio. Já as fontes antropogênicas abrangem diversas atividades industriais, escoamento de águas em centros urbanos, usos de fertilizantes no meio rural e despejo de material fecal e urina em corpos d'água sem tratamento adequado (FERRETI, 2005).

Em corpos d'água, as formas mais comumente encontradas de nitrogênio são nitrogênio orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato dependendo do seu estado de oxidação. Em um curso d'água, a determinação da forma predominante de nitrogênio pode fornecer indicações sobre o estágio da poluição eventualmente ocasionada por um lançamento de esgoto a montante. A presença das formas menos oxidadas de nitrogênio indica a presença de poluição recente.

Alguns problemas ambientais associados ao ciclo do nitrogênio merecem particular atenção, como a eutrofização, a toxicidade da amônia (particularmente em sua forma não-ionizada) e o deplecionamento dos níveis de oxigênio do corpo d'água causados pela nitrificação.

Adicionalmente, problemas associados à saúde humana também figuram entre os riscos potencializados pela concentração inadequada dos compostos nitrogenados em corpos hídricos. O nitrato, dentre outras substâncias, tem a capacidade de produzir a metemoglobina, elemento que reduz o transporte de oxigênio para os tecidos e, se presente em concentrações elevadas no organismo humano, é incompatível com a vida.

As transformações do nitrogênio orgânico para amônia, nitritos e nitratos, que ocorrem dentro do ciclo do nitrogênio que se desenvolve num curso d'água, podem ser simuladas com auxílio de modelos matemáticos de qualidade de água. A modelagem matemática pode permitir, por exemplo, a previsão das mudanças na grandeza, qualidade e localização de fontes de nitrogênio. Pode também fornecer suporte para a definição dos níveis mínimos de tratamento de esgotos de tal maneira que os padrões desejados de qualidade nos rios e lagos sejam mantidos.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar, a partir do emprego de um modelo matemático de qualidade de água, a capacidade de assimilação de compostos de nitrogênio na porção final do rio Piracicaba, importante curso d'água da bacia hidrográfica do Rio Doce.

## ÁREA DE ESTUDO

As simulações computacionais realizadas neste trabalho consideram as características hidrodinâmicas e de qualidade de água da porção final do Rio Piracicaba.

Na bacia do Rio Piracicaba predominam as atividades mineradoras e as indústrias de transformação do ramo siderúrgico. Também são encontradas indústrias ligadas ao ramo de minerais não-metálicos, de produtos alimentares, mobiliário, vestuário e madeira. Outra atividade que merece destaque na região é a silvicultura, apresentando grandes áreas de reflorestamento, principalmente nas proximidades das usinas siderúrgicas.

Como consequência da vocação industrial, vários municípios de pequeno e médio porte se estabeleceram ao longo das margens do Rio Piracicaba e de seus afluentes, estabelecendo a poluição por esgotos domésticos e industriais como um dos principais problemas a serem enfrentados na bacia hidrográfica.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Informações fluviométricas

As simulações computacionais foram realizadas considerando-se as condições de recessão e de vazão média do curso d'água. Para o trecho final do Rio Piracicaba foi avaliada a vazão mínima de sete dias consecutivos associada ao período de retorno de dez anos (vazão  $Q_{7,10}$ ) a partir do emprego do ajuste da distribuição de probabilidade Eventos Extremos Tipo III. Para a apropriação foram considerados os registros de vazão da estação fluviométrica de ACESITA. No início do trecho simulado a vazão  $Q_{7,10}$  assumiu o valor de  $20,7 \text{ m}^3/\text{s}$ . Para a vazão média, o valor estimado no início do trecho analisado foi de  $88,72 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### O modelo Computacional QUAL-UFGM

O modelo QUAL-UFGM, desenvolvido e disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, tem como objetivo possibilitar a modelagem matemática de qualidade da água de rios.

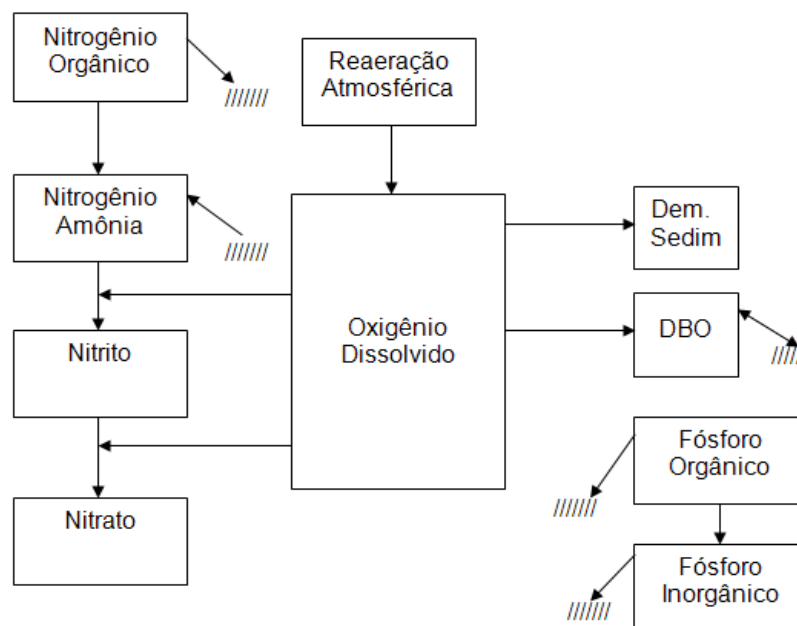
O QUAL-UFGM baseia-se no modelo QUAL-2E, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency*. Segundo Guedes (2009), o QUAL-2E é um modelo mundialmente utilizado para a simulação da qualidade da água em rios, devido sua versatilidade e fácil compreensão.

O modelo QUAL-UFGM foi desenvolvido em ambiente computacional compatível com a planilha Microsoft Excel e apresenta-se como um modelo simples, versátil e de linguagem acessível (GUEDES, 2009). Nele, os

resultados das simulações podem ser facilmente visualizados através dos gráficos contidos em suas planilhas. O QUAL-UFMG permite a modelagem dos seguintes parâmetros de qualidade de água ao longo do rio:

- demanda bioquímica de oxigênio;
- oxigênio dissolvido;
- nitrogênio total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato);
- fósforo total e suas frações (orgânico e inorgânico); e
- coliformes termotolerantes (fecais) ou E.coli.

A Figura 2 ilustra as principais inter-relações entre os constituintes modelados.



**Figura 2 - Representação esquemática dos constituintes simulados no modelo QUAL-UFMG e de suas relações (Von Sperling, 2007)**

De acordo com Von Sperling (2007), apesar de sua estrutura ser bastante similar à do QUAL-2E, o modelo brasileiro contém algumas simplificações. São elas:

- O modelo não inclui as algas e todas as suas inter-relações com os demais constituintes.
- Não considera a dispersão longitudinal. O efeito da dispersão longitudinal pode ser desprezado na maior parte das simulações que envolvem rios.
- Integração pelo método de Euler. No programa a integração é feita pelo método de Euler que é a forma de integração mais simples e de fácil compreensão pelo usuário.

### Formulação matemática para o ciclo do nitrogênio

Considerando as reações que se estabelecem dentro do ciclo do nitrogênio, o modelo QUAL-UFMG permite representar os processos de sedimentação do nitrogênio orgânico particulado, conversão do nitrogênio orgânico para amônia (amonificação), liberação da amônia pelo sedimento de fundo, conversão da amônia para nitrito e conversão da amônia para nitrato (VON SPERLING, 2007). Na sequência serão apresentadas as equações empregadas pelo modelo para descrever a variação da concentração de cada um dos compostos de nitrogênio.

#### Nitrogênio orgânico

A equação (1) é empregada para estimar o déficit de nitrogênio orgânico no curso d'água por meio da transformação em nitrogênio amoniacal, estabelecido a partir do processo de amonificação e da perda de nitrogênio orgânico pela sedimentação.

$$\frac{dN_{org}}{dt} = K_{oa} \cdot N_{org} - K_{so} \cdot N_{org} \quad (1)$$

Sendo:

- $N_{org}$ : Concentração de nitrogênio orgânico (mg-N/L);
- $K_{oa}$ : Coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico em amônia (1/dia);
- $K_{so}$ : Coeficiente de remoção do N orgânico por sedimentação (1/dia).

### Nitrogênio amoniacal

A acumulação de nitrogênio amoniacal se dá pela transformação do nitrogênio orgânico e pela produção a partir do sedimento de fundo, conforme equação (2). A transformação de nitrogênio amoniacal em nitrito, pela nitrificação, faz com que uma parcela dessa acumulação seja perdida, fechando assim o balanço de massa deste constituinte no corpo d'água.

$$\frac{dN_{amon}}{dt} = k_{oa} \cdot N_{org} - k_{an} \cdot N_{amon} + \frac{S_{N_{amon}}}{H} \quad (2)$$

Na expressão (2):

- $N_{amon}$ : Concentração de amônia (mg-N/L);
- $K_{an}$ : Coeficiente de conversão de amônia em nitrito (1/dia);
- $S_{N_{amon}}$ : Coeficiente de liberação da amônia pelo sedimento de fundo (gO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>.dia);
- $H$ : profundidade do curso d'água (m).

### Nitrito

No modelo QUAL-UFGM, a concentração de nitrito no curso d'água é simulada utilizando-se a equação (3). Nesta equação representa-se a formação do nitrito a partir do decaimento do nitrogênio amoniacal e o decaimento de nitrito para a formação de nitrato. A acumulação de nitritos constitui uma fase intermediária entre o nitrogênio amoniacal e o nitrato; por isso, alguns modelos de qualidade de água, como o QUAL2K, consideram uma fração única para representar as concentrações de compostos de nitrogênio que se apresentam sob as formas de nitrito e nitrato.

$$\frac{dN_{nitri}}{dt} = K_{an} \cdot N_{amon} - K_{nn} \cdot N_{nitri} \quad (3)$$

Na equação (3):

- $N_{nitri}$ : Concentração de nitrito (mg-N/L);
- $K_{nn}$ : Coeficiente de conversão de nitrito em nitrato (1/dia).

### Nitrato

Sua acumulação ocorre em função da transformação do nitrito, por meio da nitrificação, conforme equação (4).

$$\frac{dN_{nitra}}{dt} = K_{nn} \cdot N_{nitri} \quad (4)$$

sendo  $N_{nitra}$  a concentração de nitrato (mg-N/L).

### Nitrogênio total

A acumulação de nitrogênio se dá pela simples soma dos diferentes compostos de nitrogenados, conforme indicado pela equação (5).

$$N_{tot} = N_{org} + N_{amon} + N_{nitri} + N_{nitra} \quad (5)$$

Sendo,  $N_{tot}$  concentração de nitrogênio total (mg-N/L).

O processo de desnitrificação assume menor importância na modelagem de qualidade das águas de rios. Isso ocorre pois o processo de desnitrificação só ocorre em condições anóxicas, e como esta condição é bastante específica, se considerada, produziria diversas outras implicações para a modelagem de outros constituintes empregados para descrever a qualidade da água (VON SPERLING, 2007).

### Parâmetros de qualidade de água

Os processos de conversão do nitrogênio são bastante influenciados por condições ambientais como, temperatura, pH e oxigênio dissolvido (OD) (VON SPERLING, 2007).

Os dados sobre qualidade de água foram obtidos através das informações de qualidade da água do Rio Piracicaba, reunidas no trabalho proposto por Reis (1997).

Para todas as simulações computacionais realizadas neste trabalho considerou-se o valor de pH de 7, temperatura de 28°C e OD de 6,8mg/L, valores médios para a porção final do Rio Piracicaba no período de monitoramento considerado por Reis (1997).

### Concentração de Nitrogênio no esgoto doméstico

As águas residuárias são normalmente a maior fonte de poluição dos cursos d'água e merecem considerações especiais em termos da caracterização das formas de nitrogênio (VON SPERLING, 2007). Para a carga pontual de esgoto doméstico adotou-se, neste trabalho, variação das concentrações de nitrogênio nas faixas apresentadas pela Tabela 1.

Tabela 1 - Concentrações de nitrogênio no esgoto doméstico bruto

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.d)		Concentração (mg/L)	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
Nitrogênio total	6,0 – 12,0	8,0	35 - 70	50
Nitrogênio orgânico	2,5 – 5,0	3,5	15 - 30	20
Amônia	3,5 – 7,0	4,5	20 - 40	30
Nitrito	≈ 0	≈ 0	≈ 0	≈ 0
Nitrato	0,0 – 0,5	≈ 0	0 - 2	≈ 0

Fonte: Von Sperling (2005)

As concentrações de nitrito e nitrato no esgoto doméstico foram consideradas nulas em todas as simulações. Já as concentrações de nitrogênio orgânico variaram entre 15 e 30 mg/L e as de nitrogênio amoniacal entre 20 e 40mg/L.

### Parâmetros envolvidos nos processos do ciclo do Nitrogênio

A capacidade de autodepuração em um rio pode ser simulada de maneira simplificada por meio de parâmetros cinéticos de qualidade de água (GUEDES, 2009).

Von Sperling (2007) apresenta uma síntese das faixas usuais de variação dos coeficientes e das constantes cinéticas envolvidas no ciclo do nitrogênio. Faixas de variação mais elásticas são sugeridas por Brown e Barnwell (1987), quando da implementação do modelo computacional Qual-2E. Os valores sugeridos por Von Sperling e por Brown e Barnwell estão reunidos na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes e constantes cinéticas envolvidas no ciclo do nitrogênio

Constante cinética	Valores Típicos (dia <sup>-1</sup> )	
	Von Sperling (2007)	Brown e Barnwell (1987)
K <sub>org</sub>	0,20 a 0,25	0,02 a 0,40
K <sub>sed</sub>	Remansos: 0,10 Rios lentos com águas naturais e moderadamente poluídas: 0,05 Rios lentos com águas naturais e fortemente poluídas: 0,10 Rio rápidos com águas naturais: 0,02 Rio rápidos com águas moderadamente poluídas: 0,05 Rio rápidos com águas fortemente poluídas: 0,10	0,001 a 0,1
K <sub>amon</sub>	0,15 a 0,25	0,10 a 1,00
K <sub>nitr</sub>	Rios profundos: 0,10 a 0,50 Rios rasos: 0,20 a 1,00	0,20 a 2,00

Nas simulações computacionais realizadas neste trabalho, o coeficiente de perda de nitrogênio por sedimentação variou entre 0,001 e 0,10 dia<sup>-1</sup>, a constante cinética para a conversão de nitrogênio orgânico para amônia entre 0,02 a 0,40 dia<sup>-1</sup>, a constante cinética para a conversão de amônia para nitrito entre 0,10 a 1,00 dia<sup>-1</sup> e a constante cinética para a conversão de nitrito para nitrato entre 0,20 a 2,00 dia<sup>-1</sup>.

A relação entre o processo de nitrificação e o consumo de oxigênio dissolvido (OD) implica em cálculos específicos na modelagem da nitrificação. A taxa de nitrificação é reduzida em virtude da limitação do crescimento de bactérias nitrificantes imposta por baixas concentrações de OD no curso d'água (VON SPERLING, 2007). Nestes casos, os coeficientes de conversão do processo de nitrificação,  $K_{an}$  e  $K_{nn}$  devem ser corrigidos. Neste trabalho foi empregada a proposição estabelecida por Chapra (1997), segundo a qual o fator de correção de  $K_{an}$  em função da concentração de OD ( $f_{nitr}$ ) é apropriado pela expressão (6).

$$f_{nitr} = 1 - e^{-K_{nitrOD} \cdot OD} \quad (6)$$

Na expressão anterior  $K_{nitrOD}$  representa o Coeficiente de inibição da nitrificação em função das baixas concentrações de OD. Segundo Von Sperling (2007), o valor usual para este coeficiente é 0,60, valor adotado para as simulações realizadas no presente trabalho.

Adicionalmente, o consumo de OD no processo de conversão de amônia a nitrito é diferente daquele que ocorre na transformação de nitrito a nitrato. Desta forma, neste trabalho, foram adotados os valores sugeridos por Von Sperling (2007) para as taxas de consumo de oxigênio. Os valores assumidos são apresentados no Tabela 3.

Tabela 3 – Relações de consumo de oxigênio no processo de nitrificação

Descrição	Valores usuais dos coeficientes (20°C)
Relação de oxigênio consumido por cada unidade de amônia oxidada a nitrito	3,2 mgO <sub>2</sub> / mgN <sub>amon</sub>
Relação de oxigênio consumido por cada unidade de nitrito oxidado a nitrato	1,1 mgO <sub>2</sub> / mgN <sub>nitr</sub>

Fonte: Von Sperling (2007)

Como a temperatura tem influência nas reações químicas e biológicas, para cada reação específica da modelagem do ciclo do nitrogênio são definidos coeficientes de correção em função da temperatura. No presente estudo foram utilizados, para corrigir os coeficientes  $K_{so}$ ,  $K_{oa}$ ,  $K_{an}$  e  $K_{nn}$  os valores adimensionais  $\theta$  de 1,024; 1,047; 1,080 e 1,047, respectivamente. A correção é realizada efetuando-se a multiplicação do coeficiente pelo seu fator de correção, considerando-se a seguinte expressão (7).

$$K_T = K_{T_{Ref}} \cdot \theta^{T_{Ref}} \quad (7)$$

Pode ocorrer ainda a liberação de amônia pelo sedimento de fundo. Von Sperling (2007) sugere a variação de 0,0 a 0,5 g/m<sup>2</sup>.dia, sendo que menores valores são indicados para a modelagem de rios rápidos e limpos. Neste trabalho desconsiderou-se a liberação de amônia pelo sedimento de fundo.

### Simulações Computacionais

Oito grupos de simulações computacionais foram realizados neste trabalho. Todos os grupos consideram a porção final do Rio Piracicaba inicialmente destituída de compostos nitrogenados e recebendo um único lançamento de esgoto doméstico bruto típico.

Além desta configuração inicial idêntica para todos os grupos de simulações realizadas, foi avaliada a condição de assimilação dos compostos nitrogenados variando-se o valor das constantes cinéticas que regulam o ciclo do nitrogênio no corpo d'água.



Para os quatro primeiros grupos, foram adotadas constantes cinéticas que não favorecem a formação de nitrito e nitrato (constantes conservadoras). Estas simulações adotaram as taxas mais baixas estabelecidas por Brown e Barnwell (1987).

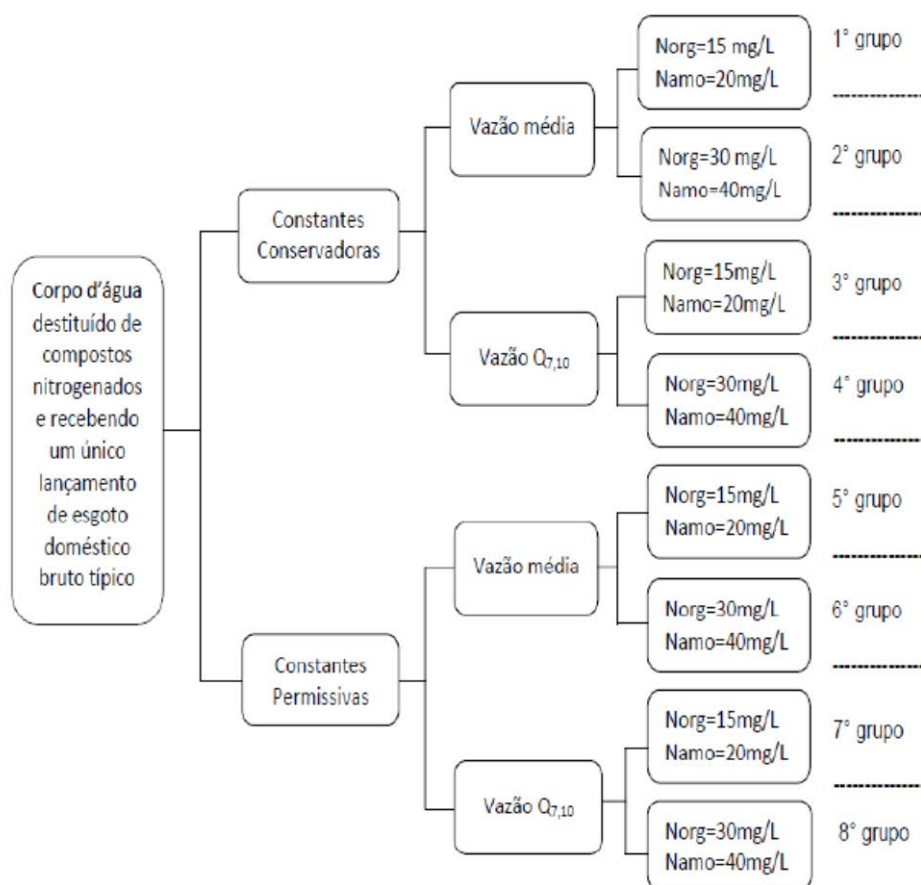
Em contrapartida, do quinto ao último grupo simulado, foram adotadas as constantes cinéticas que favorecem a acumulação das formas mais oxidadas de nitrogênio (constantes permissivas). Para isso foram adotadas as taxas mais altas estabelecidas por Brown e Barnwell (1987).

Buscando-se estabelecer uma comparação da capacidade de assimilação dos compostos de nitrogênio em diferentes condições de escoamento, as simulações realizadas envolveram a adoção das vazões média e mínima do Rio Piracicaba.

Os cenários simulados variaram ainda com relação às concentrações de nitrogênio no despejo. Desta forma, para o efluente, as concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal variaram dentro dos limites inferiores e superiores apresentados por Von Sperling (2007).

Cada grupo simulado considerou o lançamento de quatro diferentes vazões de esgoto. As vazões assumidas nos diferentes grupos de simulações foram de 0,1% (0,0207 m<sup>3</sup>/s); 0,5% (0,1035 m<sup>3</sup>/s); 1% (0,207 m<sup>3</sup>/s); e 5% (1,035 m<sup>3</sup>/s) da vazão mínima de referência do rio. As vazões de 0,1% e 5% representam um equivalente populacional de aproximadamente 12 mil e 560 mil habitantes, respectivamente. Na determinação do equivalente populacional considerou-se uma produção média diária de esgotos de 200 litros/habitante.dia e coeficiente de retorno com o valor de 0,8.

Os grupos de simulações computacionais realizadas no presente trabalho estão organizados conforme o fluxograma ilustrado pela Figura 01.



**Figura 01 – Representação esquemática dos grupos de simulações realizadas**

Nos quatro primeiros grupos de simulações foram adotadas as taxas mais altas sugeridas por Brown e Barnwell (1987); nos demais grupos de simulações, as mais baixas taxas de reação sugeridas pelos referidos autores.

As concentrações estimadas para a amônia, nitrito e nitrato nas diferentes simulações computacionais realizadas foram comparadas com os padrões de qualidade sugeridos pela Resolução Conama nº 357/2005 para cursos d'água classe 2, classe a qual pertence o Rio Piracicaba no trecho simulado. Nas comparações considerou-se a adoção de valor para pH igual a 7,0.

## RESULTADOS OBTIDOS

### Constantes cinéticas que dificultam a formação de nitrito e nitrato no corpo d'água

As figuras de 2 a 5 representam a variação dos compostos de nitrogênio para os quatro primeiros grupos de simulações, considerando-se o lançamento de um efluente bruto com vazão de 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e a adoção de constantes cinéticas que facilitam o acúmulo das formas menos oxidadas de nitrogênio.

Nas figuras 2 e 3 é representada a variação dos diferentes compostos de nitrogênio considerando-se que o rio apresenta vazão média. Os resultados encerrados na figura 2 foram obtidos considerando-se o lançamento de um efluente fraco, nos quais as concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal foram de 15mg/L e 20mg/L, respectivamente. Já os resultados apresentados pela figura 3 foram obtidos considerando-se o lançamento de um efluente forte, para o qual foram assumidas concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal de 30mg/L e 40mg/L, respectivamente.

As figuras 4 e 5, por sua vez, apresentam a variação dos compostos de nitrogênio considerando que o rio apresenta vazão igual à  $Q_{7,10}$ . A Figura 5.3 apresenta o resultado obtido quando se considerou o lançamento de um efluente fraco. De maneira contrária, a Figura 5.4 ilustra o resultado do cenário em que foi adotado o lançamento de um efluente forte.

Gráficos semelhantes foram produzidos para descrever os resultados das simulações de qualidade de água nas quais o efluente apresenta vazões variando entre 0,1%; 0,5% e 1% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba, consideradas as demais condições de contorno estabelecidas para os quatro primeiros grupos de simulações.

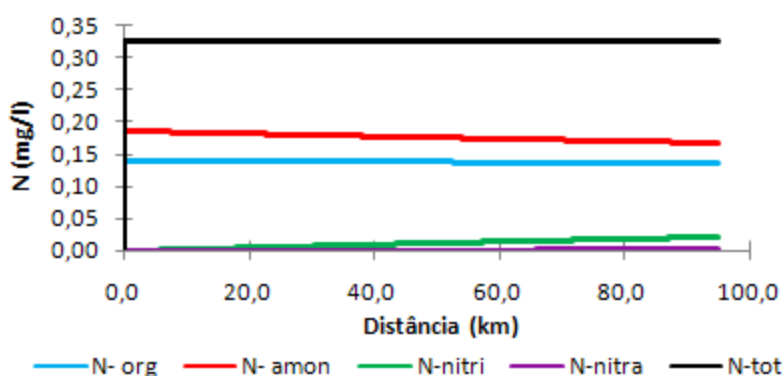


Figura 2 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente fraco com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão média - Primeiro grupo de simulações.



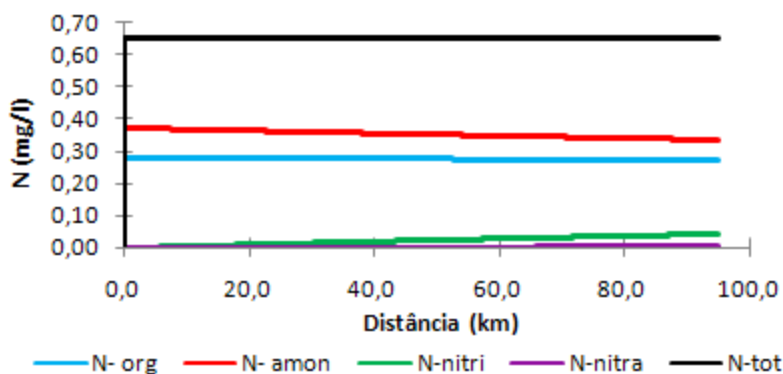


Figura 3 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente fraco com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão média - Segundo grupo de simulações.

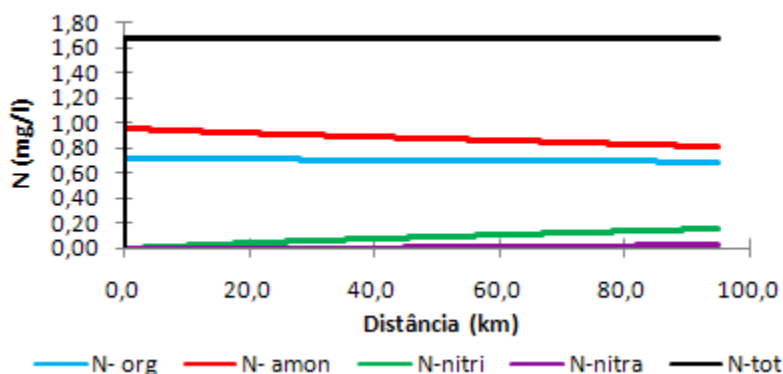


Figura 4 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Terceiro grupo de simulações

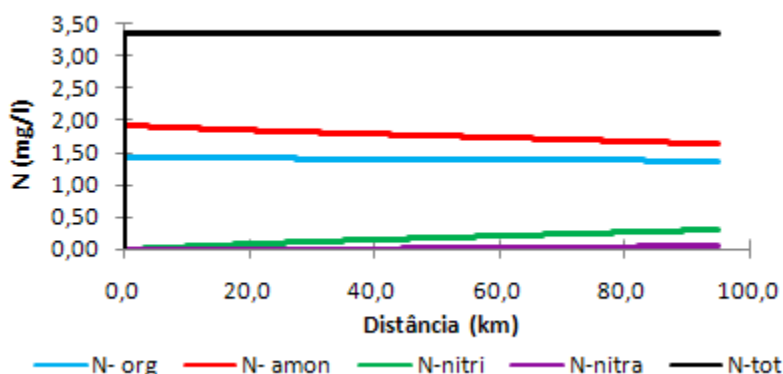
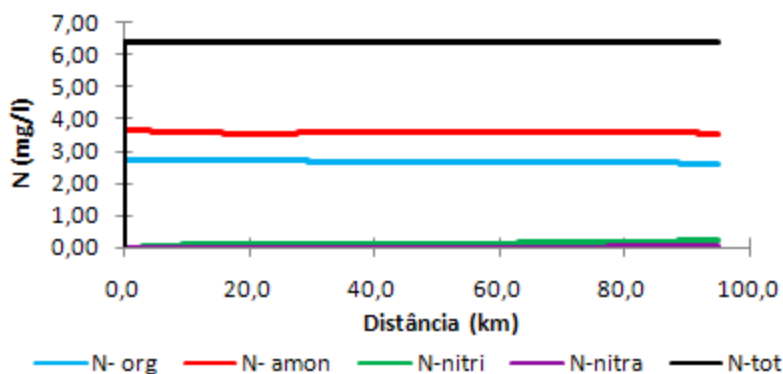


Figura 5 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Quarto grupo de simulações.

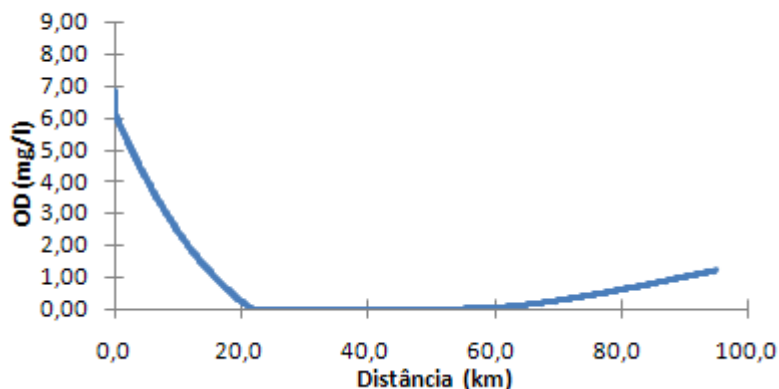
A partir da simples inspeção dos resultados decorrentes dos quatro primeiros grupos de simulações, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Em função dos baixos valores assumidos para as constantes de decaimento, as concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal pouco variaram no trecho simulado. Quando considerado o lançamento de um efluente forte com vazão equivalente a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do rio, em um curso d'água em condições de estiagem (rio escoando vazão  $Q_{7,10}$ ), a concentração de nitrogênio orgânico variou de 1,41 mg/L (início do trecho simulado) para 1,39 mg/L (final do trecho simulado). Já as concentrações de nitrogênio amoniacal variaram de 1,9 mg/L (início do trecho simulado) para 1,6 mg/L (final do trecho simulado). É relevante registrar que a máxima concentração estimada para o nitrogênio amoniacal permaneceu abaixo do padrão proposto pelo CONAMA para rios classe 2 (concentração limite de 3,7 mg/L em rios com  $\text{pH} < 7,5$ ).
- A adoção de constantes cinéticas que privilegiavam o acúmulo das formas menos oxidadas de nitrogênio produziu, por consequência, baixas concentrações de nitrito e nitrato no final do trecho simulado, mesmo naquelas simulações em que o rio funcionava com vazão  $Q_{7,10}$ . As concentrações de nitrito não superaram 0,29 mg/L, para um padrão CONAMA em rios classe 2 de 1 mg/L. As concentrações de nitrato, por sua vez, mantiveram-se abaixo de 0,05 mg/L, para um padrão CONAMA de 10 mg/L em rios classe 2.
- As simulações que envolveram a adoção da vazão média para o curso d'água (simulações do 1º e 2º grupo de simulações) estabeleceram condição de diluição mais favorável, produzindo concentrações ainda menores – e, portanto, mais afastadas dos padrões CONAMA – para nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato.
- Os diferentes cenários estabelecidos para os quatro primeiros grupos de simulações não sugerem que seja necessária a adoção de sistemas de tratamento de esgotos voltados para a remoção dos compostos de nitrogênio. A capacidade de diluição/assimilação dos compostos de nitrogênio produziu concentrações de amônia, nitrito e nitrato inferiores aos padrões impostos pelo CONAMA para cursos d'água classe 2.

As Figuras 6 e 7 apresentam os resultados da simulação que considerou, para o quarto grupo de simulações, o lançamento de um efluente bruto com vazão de 10% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba. A Figura 6 apresenta a variação dos compostos de nitrogênio. A Figura 7, por sua vez, a variação das concentrações de OD.



**Figura 6 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 10% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Quarto grupo de simulações.**



**Figura 7 – Variação das concentrações de OD considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 10% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  – Quarto grupo de simulações.**

A partir da análise dos dois últimos gráficos apresentam-se como relevantes as seguintes observações:

- O aumento da vazão do efluente implicou no estabelecimento da anaerobiose do corpo d'água. Desta maneira, no trecho anaeróbico, o processo de nitrificação foi inibido e, consequentemente, a formação de nitrito e nitrato reduzida. Por conseguinte, um maior acúmulo de nitrogênio amoniacal foi observado; ainda assim o limite estabelecido pela resolução CONAMA para nitrogênio amoniacal foi respeitado (a concentração máxima de amônia no trecho simulado atingiu 3,64 mg/L).
- As concentrações de nitrito e nitrato, mantiveram-se substancialmente abaixo dos limites máximos estabelecidos pela resolução CONAMA. A concentração de nitrito chegou ao valor máximo de 0,19 mg/L (para um padrão CONAMA de 1 mg/L) enquanto a concentração de nitrato atingiu 0,01 mg/L (padrão CONAMA de 10 mg/L).

### **Constantes cinéticas que favorecem a acumulação de nitrito e nitrato no corpo d'água**

Os resultados observados nas Figuras de 8 a 11 apresentam a evolução das concentrações de nitrogênio ao longo do rio nos quatro últimos grupos de simulações, considerando o lançamento de um efluente bruto com vazão de 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba. Para estas simulações foram assumidas constantes cinéticas que favorecem a acumulação de nitrito e nitrato no corpo d'água.

As figuras 8 e 9 apresentam a variação da concentração dos compostos de nitrogênio considerando-se que o rio apresenta vazão média. A figura 8 ilustra o resultado obtido quando se considerou o lançamento de um efluente fraco. Já a figura 9 encerra os resultados obtidos a partir do lançamento de um efluente forte.

As figuras 10 e 11, por sua vez, apresentam a variação dos compostos de nitrogênio considerando-se que o rio apresenta vazão igual à  $Q_{7,10}$ . A figura 10 apresenta o resultado quando se considera o lançamento de um efluente fraco. Já a figura 11 ilustra o resultado das simulações em que se considera um efluente contendo elevadas concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal.

Gráficos semelhantes foram produzidos para descrever os resultados das simulações de qualidade de água nas quais o efluente apresenta vazões de 0,1%, 0,5% e 1% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba, consideradas as demais condições de contorno estabelecidas para os quatro últimos grupos de simulações.

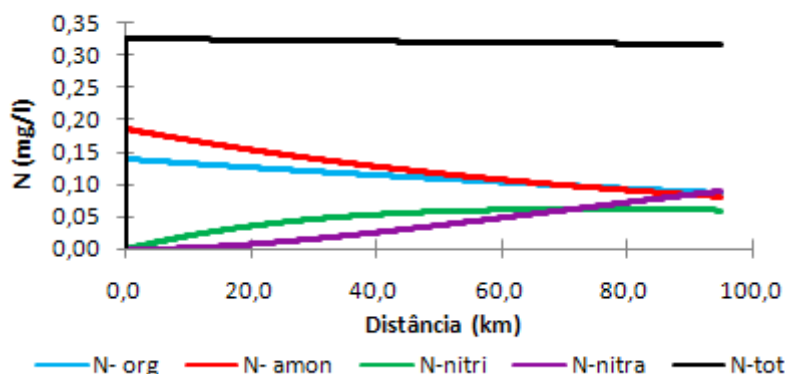


Figura 8 - Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente fraco com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão média - Quinto grupo de simulações.

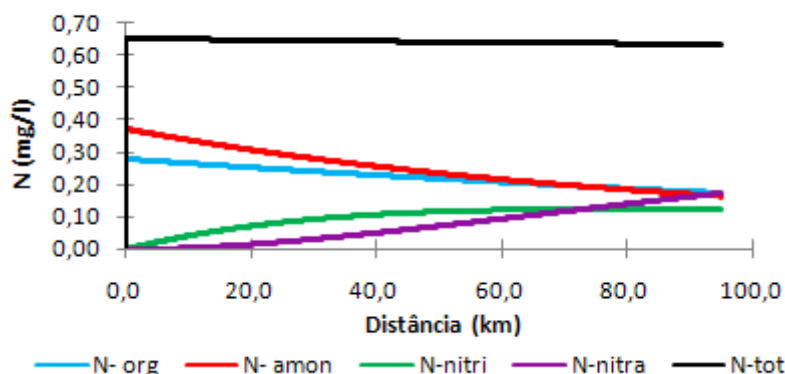


Figura 9 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente fraco com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão média - Sexto grupo de simulações.

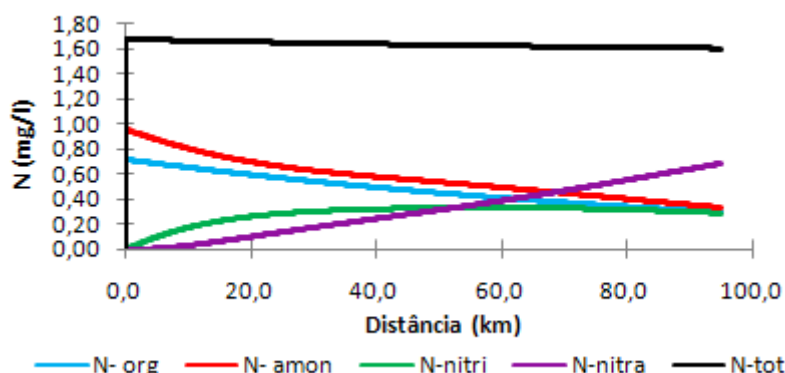
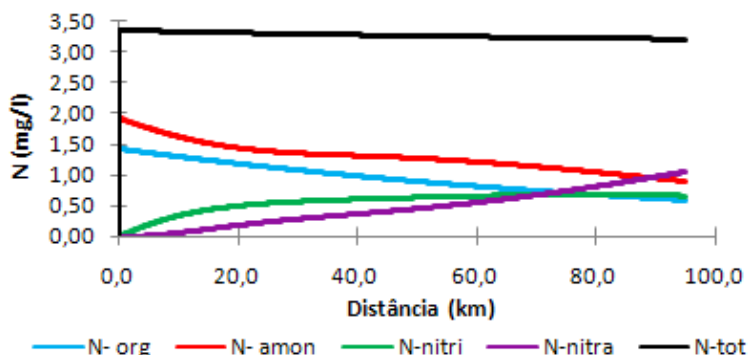


Figura 10 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Sétimo grupo de simulações.

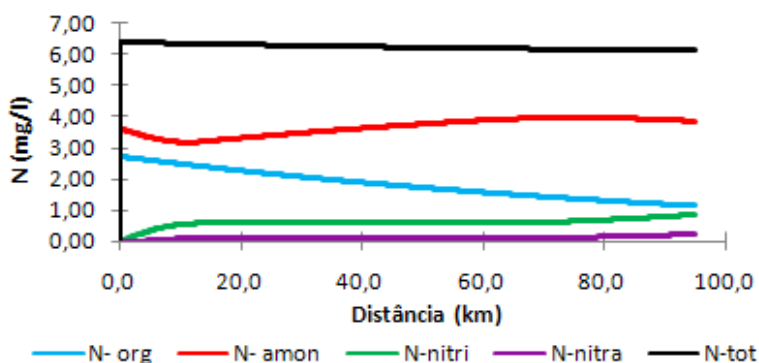


**Figura 11 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Oitavo grupo de simulações**

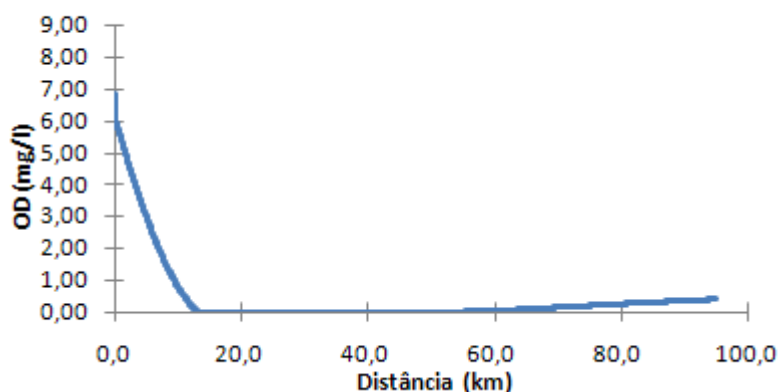
Da análise dos resultados produzidos a partir dos quatro últimos grupos de simulações computacionais, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Apesar da adoção de constantes cinéticas que favorecem a formação das formas mais oxidadas de nitrogênio, as concentrações de nitrito e nitrato não superam os limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA. As concentrações de nitrito não superaram 0,65 mg/L no final do trecho simulado (o padrão CONAMA para nitritos em rios classe 2 é de 1mg/L). As concentrações de nitrato, por sua vez, mantiveram-se abaixo de 1,05 mg/L no final do trecho simulado, valor substancialmente menor que o limite máximo estabelecido pela Resolução CONAMA (10 mg/L);
- A concentração máxima de nitrogênio amoniacal estimada foi igual a 1,90 mg/L (valor estimado para o ponto de lançamento, efluente forte e com vazão de 5% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba). O valor estimado corresponde a pouco mais que a metade do limite estabelecido pelo CONAMA para nitrogênio amoniacal (3,7 mg/L). No final do trecho simulado, a concentração de amônia foi reduzida para 0,9 mg/L;
- No trecho simulado, com a adoção das constantes que favorecem a oxidação dos compostos de nitrogênio, as concentrações de nitrogênio orgânico variaram de 1,41 mg/L (início do trecho simulado) para 0,6 mg/L (final do trecho simulado).
- O valor adotado para o coeficiente de remoção do nitrogênio orgânico por sedimentação (0,10 dia<sup>-1</sup>) para os quatro últimos grupos de simulações, implicou no decréscimo, ao longo do trecho simulado, da concentração de nitrogênio total.

A Figura 12 mostra o comportamento dos compostos de nitrogênio no corpo d'água, para o oitavo grupo de simulações, quando se considera o lançamento de uma vazão de esgoto bruto de 10% da vazão  $Q_{7,10}$ . A Figura 13, por sua vez, ilustra a variação da concentração de OD neste cenário.



**Figura 12 – Variação dos compostos de nitrogênio considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 10% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  - Oitavo grupo de simulações**



**Figura 13 – Variação das concentrações de OD considerando o lançamento do efluente forte com vazão igual a 10% da vazão  $Q_{7,10}$  do Rio Piracicaba e rio escoando vazão  $Q_{7,10}$  – Oitavo grupo de simulações.**

A partir do comportamento apresentado no gráfico das Figuras 12 e 13, são relevantes as seguintes considerações:

- O cenário que teve seu resultado ilustrado na figura 12 é caracterizado pelo favorecimento dos processos de nitrificação e nitratação (formação de nitrito e nitrato, respectivamente). No entanto, essa formação foi reduzida na medida em que os níveis de OD tenderam a zero (ver Figura 13). Desta forma, o balanço destas condições fez com que as concentrações de nitrito atingissem 0,86 mg/L, ficando abaixo de 1,0 mg/L, limite estabelecido pela resolução CONAMA. Já as concentrações de nitrato não ultrapassam 0,21 mg/L;
- As concentrações de amônia superaram, ao longo do trecho simulado, o valor sugerido pelo CONAMA. A concentração máxima chegou a 3,97 mg/L, superando em 0,27 mg/L o padrão estabelecido para este parâmetro. Desta forma, apenas 47,1% do trecho simulado se manteve dentro dos padrões para esta condição de assimilação.

## CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou, a partir do emprego de um modelo matemático de qualidade de água, a capacidade de assimilação de compostos de nitrogênio pela porção final do Rio Piracicaba. Foi avaliada a disposição de diferentes vazões de efluentes domésticos brutos e a combinação de diferentes constantes cinéticas que regulam a transformação dos diferentes compostos dentro do ciclo do nitrogênio. As principais conclusões obtidas podem ser assim sumarizadas:

- As concentrações de nitrito e nitrato não superaram os padrões CONAMA para rios classe 2 em nenhuma das simulações realizadas, independente da vazão adotada.
- As concentrações de nitrogênio amoniacal, por sua vez, não superaram o padrão em nenhuma das simulações que consideraram que o rio funcionava com vazão média. Já nas simulações que adotaram a vazão  $Q_{7,10}$  (condições de estiagem para o rio), o padrão CONAMA para nitrogênio amoniacal só foi superado na simulação que considerou que o rio recebia uma alta vazão de efluente doméstico, equivalente a 10% da referida vazão mínima do rio. Desta forma observou-se que os compostos de nitrogênio não se apresentaram como limitantes para o lançamento de efluentes domésticos brutos na porção final do Rio Piracicaba.
- Em todas as condições de diluição/assimilação dos compostos de nitrogênio testadas não foi entendida como necessária a implementação de sistema de tratamento voltado para a remoção destes compostos. Nas simulações em que ocorreu um substancial decréscimo dos níveis de OD, decorrente da oxidação dos compostos de carbono da matéria orgânica, apresenta-se como premente a implementação de sistemas de tratamento voltados para a redução da concentração de DBO.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BROWN, L. C. & BARNWELL Jr, T. O. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: Documentation and User Manual. Georgia : USEPA, 1987, 189p.
2. CHAPRA, S. C. Surface water-quality modeling. New York: McGraw-Hill. 1997.
3. FERRETI, Estela Claudia; Estudo da influência da relação S0/X0 na determinação da atividade específica de bactérias nitrificantes. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
4. GUEDES, H. A. L. Estudo Matemático-Experimental da Qualidade da Água e da Capacidade de Autodepuração do Rio Pomba. 155 f. Dissertação (Mestrado) do Programa de Pós-graduação em engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2009.
5. GUERRA, Cláudio B. (org.) Expedição Piracicaba 300 anos depois. Belo Horizonte: SEGRAC, 2001.
6. REIS, J. A. T. Estudo dos Padrões para Compostos Amoniacais em Efluentes e Cursos D' água Interiores. 120 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1997.
7. VON SPERLING, M. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1.Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG, 2005.
8. VON SPERLING, M. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Estudos e Modelagem da Qualidade da Água de Rios. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007.