

Uso de Otimização e Modelagem de Qualidade de Água no Planejamento de Implantação de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários em Bacias Hidrográficas

Juliana Pereira Louzada¹, José Antônio Tosta dos Reis², Antonio Sérgio Ferreira Mendonça²

julianaplouzada@gmail.com, tosta@ct.ufes.br, anserfm@terra.com.br

Recebido: 02/09/11 – revisado: 24/01/12 – aceito: 28/08/12

RESUMO

Este trabalho discute a aplicação conjunta de técnicas de otimização e modelagem de qualidade de água para apoio à seleção de estações de tratamento de esgotos (ETE's). Neste sentido, é apresentado um estudo teórico demonstrativo da metodologia. Para tornar os cenários mais reais, foram utilizados alguns dados do trecho superior da bacia do Rio Santa Maria da Vitória, ES. Os resultados indicam que a metodologia apresentada pode subsidiar tomadas de decisão referentes à seleção de ETE's em uma bacia hidrográfica. Demonstram ainda que a adoção dos níveis mínimos de remoção de DBO definidos pela Resolução CONAMA n° 430/2011, quando desconsidera as capacidades de diluição e autodepuração dos corpos receptores, pode aumentar gastos com ETE's, sem contrapartida em ganhos quanto à manutenção de padrões definidos pela Resolução CONAMA n° 357/2005 para OD e DBO.

Palavras-chave: Programação Não Linear. Modelagem de qualidade de água. Planejamento de sistemas de tratamento de esgotos.

INTRODUÇÃO

A seleção de um processo de tratamento de esgotos deve considerar aspectos como eficiência do processo, confiabilidade, alternativa para disposição do lodo produzido, requisitos de área, impactos ambientais, custos de operação, custos de implantação, sustentabilidade e simplicidade de operação. Diferentes abordagens para a seleção de sistemas de tratamento de esgoto são discutidas por Souza e Foster (1996), Souza (1997), Tsagarakis *et al.* (2003) e Mugaa e Mihelcic (2008). Para países em desenvolvimento, os custos de construção, custos de operação, sustentabilidade e simplicidade são considerados críticos (von SPERLING, 2005).

No Brasil, a implantação de uma estação de tratamento de esgotos ocorre de forma escalonada, com o progressivo crescimento do número de unidades que darão forma final à estação. Em um grande número de situações, usualmente deve ser possível implantar, numa primeira etapa, um processo menos eficiente ou que remova uma menor

quantidade de poluentes, reservando-se para uma segunda etapa a conformação de um sistema mais eficiente (von SPERLING, 1998).

Este problema torna-se mais complexo quando observado do ponto de vista de uma bacia hidrográfica, com múltiplos lançamentos de diferentes cargas em corpos d'água com capacidades de assimilação distintas. Neste contexto, a avaliação individual (do ponto de vista da outorga ou do licenciamento ambiental) torna-se invariavelmente precária.

A adequada avaliação da capacidade de autodepuração permite a indicação de limites de cargas de efluentes que um curso d'água poderá receber, condicionando os níveis mínimos de remoção dos diferentes constituintes presentes no esgoto bruto e, por conseqüência, o projeto, a operação e a manutenção das plantas de tratamento de esgotos. Neste contexto, o emprego combinado de técnicas de otimização e de modelagem matemática da qualidade da água pode apresentar-se como alternativa interessante, constituindo ferramenta de auxílio ao planejamento, seleção e escalonamento da implantação de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas. São exemplos desta abordagem os trabalhos de Han *et al.* (2011), Yang *et*

¹ Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - UFES

² Departamento de Engenharia Ambiental - UFES

al. (2011), Albertini (2008), Saadatpour e Afshar (2007) e Burn (1989).

O presente trabalho teve como principal finalidade demonstrar e avaliar, através de um estudo de caso, o uso combinado de técnicas de otimização e modelagem de qualidade de água em rios para subsidiar a tomada de decisão a respeito de planejamento e projeto de sistemas de tratamento de esgotos sanitários que considerem relações benefício-custo envolvendo aspectos ambientais de corpos receptores. Especificamente, como estudo de caso, foram empregadas técnicas de Programação Não Linear (PNL) e modelagem computacional de qualidade de água no processo de seleção de níveis de tratamento de esgotos para a bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, importante manancial para o abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória, ES.

MATERIAIS E MÉTODOS

Caracterização da área de Estudo

Este estudo considerou informações a respeito da qualidade e disponibilidade de água da porção superior da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória, uma das principais fontes de abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), região que engloba os municípios de Vitória (a capital do estado do Espírito Santo), Fundão, Serra, Cariacica, Viana, Vila Velha e Guarapari. Segundo o último censo demográfico conduzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2011), os municípios que constituem a RMGV abrangem uma população de 1.687.704 habitantes.

A bacia do rio Santa Maria da Vitória possui área de aproximadamente 1560 km² de área (3,4% da área do Estado), com altitudes variando entre 0 e 1.300 m. Seu perímetro é de 291 km. Limita-se a leste com a baía de Vitória, ao norte e a oeste com as bacias dos rios Reis Magos e Doce e ao sul com as bacias dos rios Jucu, Bubu e Formate-Marinho. A precipitação média anual na bacia varia de 1.100 a 1.200 mm na parte superior e litorânea, indo até 1.800 mm na região das cabeceiras do córrego Cachoeira, um dos formadores do rio Mangaraí, afluente da margem direita.

A Figura 1 apresenta, em destaque, o trecho do Rio Santa Maria da Vitória objeto deste estudo.

Na porção superior do Rio Santa Maria da Vitória a agricultura é a principal atividade econômica, com destaque para a produção de café. A

olericultura desenvolve-se por todos os vales e encostas da região, sendo a principal atividade empregadora de mão de obra e geradora de renda em curto prazo (ZAMPROGNO, 1999).

Segundo Roques (2006), os rios Alto Posmoser e São Luiz são os principais formadores do rio Santa Maria da Vitória. O rio São Luiz constitui maior fonte de carga orgânica, pois despeja efluentes domésticos, provenientes da sede do município de Santa Maria de Jetibá, sem tratamento adequado, no rio Santa Maria da Vitória.

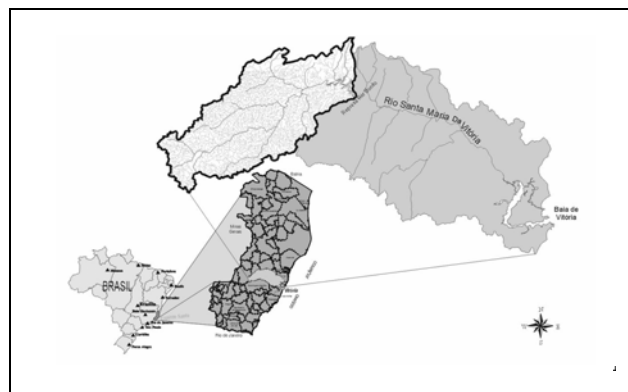


Figura 1 – Localização da bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória. Fonte: Zamprogno (1999).

Modelo de Qualidade de Água

Para simulação computacional da qualidade d'água do sistema hídrico estudado foi empregado o modelo QUAL-UFGM, modelo desenvolvido no ambiente computacional da planilha eletrônica Microsoft Excel® (von SPERLING, 2007).

O QUAL-UFGM é baseado no modelo QUAL2-E (Brown e Barnwell, 1987), mundialmente utilizado para modelagem matemática em rios. O modelo QUAL2-E foi desenvolvido pela *United State Environmental Protection Agency (USEPA)* e que tem como versão mais atual o modelo QUAL2-K (von SPERLING, 2007).

No modelo QUAL-UFGM, o rio é conceitualmente segmentado em trechos que, por sua vez, podem ser divididos em sub-trechos ou elementos computacionais. Estes elementos computacionais possuem comprimentos constantes e são considerados como completamente misturados. Os trechos, portanto, podem ser entendidos como grupos de reatores de mistura completa, onde são comuns as características hidrogeométricas e taxas biológicas. Para cada elemento, o balanço de massa pode ser escrito em função da somatória dos fluxos afluentes

e efluentes. São considerados o fluxo aflente ao elemento por sua face superior, fluxos referentes às fontes externas ou captações e o fluxo efluente através da face inferior do elemento (von SPERLING, 2007).

O QUAL-UFMG possibilita a modelagem da demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes ou E.coli. Contraindo-se ao QUAL2-K, o QUAL-UFMG possui a simplificação de não incluir as algas e suas inter-relações com os outros constituintes (von SPERLING, 2007).

As equações (01) e (02) descrevem a variação de DBO e OD assumidas pelo modelo QUAL-UFMG (von SPERLING, 2007):

$$\frac{dL}{dt} = k_d \cdot L - k_s \cdot L + L_{rd} \quad (01)$$

$$\frac{dC}{dt} = k_2 \cdot (C_s - C) - k_d \cdot L - S_d - R_{O_2} \cdot (f_n \cdot k_{an}) \cdot N_{am} \quad (02)$$

sendo: C = concentração de oxigênio dissolvido (mg/L);

C_s = concentração de saturação do OD (mg/L);

L = concentração de DBO última (mg/L);

N_{am} = concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L).

L_{rd} = taxa de entrada de DBO última difusa na massa líquida (g/m³.dia);

k_d = coeficiente de oxidação da DBO no rio (dia⁻¹);

k₂ = coeficiente de reaeração (dia⁻¹);

k_s = coeficiente de remoção da DBO por sedimentação (dia⁻¹);

k_{an} = coeficiente de conversão da amônia a nitrito (dia⁻¹);

S_d = demanda de oxigênio pelo sedimento (mgO₂/L.dia);

R_{O₂} = relação entre oxigênio consumido por cada unidade de amônia oxidada a nitrito;

f_n = fator de correção do coeficiente de nitrificação em função de OD.

Neste estudo, foram considerados os fenômenos de desoxigenação em decorrência da oxidação da matéria orgânica e a reaeração atmosférica. Segundo von SPERLING (2007), os referidos fenômenos são os mais relevantes para o balanço das concentrações de oxigênio dissolvido em rios. Adicionalmente é relevante registrar que o modelo

QUAL-UFMG foi aplicado considerando o regime permanente de vazões.

Constantes Cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água

As constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água consideradas neste estudo reproduziram aquelas empregadas por Salim (2004) e Mendonça e Almeida (2005), quando da análise do problema de disposição de efluentes domésticos no mesmo sistema hídrico. Os referidos autores conformaram suas simulações de qualidade de água a partir de dados das campanhas realizadas em março, julho, setembro e outubro de 1997, associadas ao estudo “*Diagnóstico e Plano Diretor das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu*” (HABTEC, 1997).

Uma representação esquemática do sistema hídrico estudado, incluindo informações sobre qualidade e disponibilidade de água do rio Santa Maria da Vitória e de seus principais afluentes, está apresentada pela Figura 2. Para as simulações, o curso d’água foi dividido em 11 subtrechos, 10 deles com extensão de 4 km cada e um trecho final com extensão de 2 km. Cada trecho foi subdividido em elementos computacionais com extensão de 100 m cada. Os rios Alto Posmoser e São Luiz afluem ao rio Santa Maria da Vitória nos quilômetros 24 e 36, respectivamente.

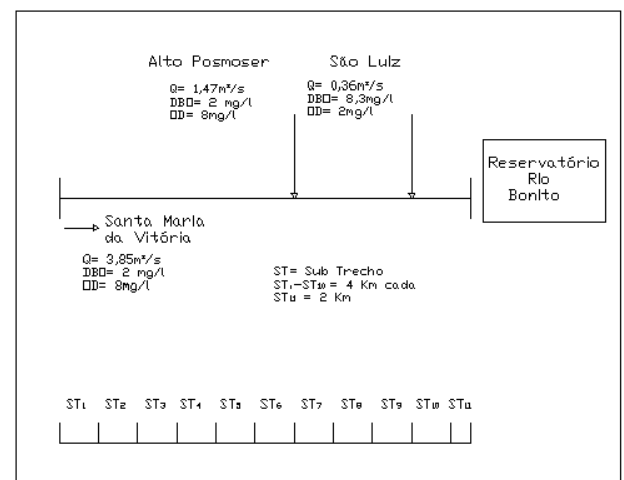


Figura 2 – Representação esquemática do sistema hídrico a ser estudado. Fonte: SALIM (2004)

As constantes cinéticas que regularam os processos de desoxigenação (K_d) e reaeração atmosférica (K₂) assumiram os valores 0,24 dia⁻¹ e 0,98 dia⁻¹. A concentração de saturação de oxigênio dis-

solvido, por sua vez, assumiu o valor de 8,00 mg/L, estimada a partir da expressão proposta por Popel (1979) considerando-se a altitude média (900 m) e temperatura média da água (21°C) para a região de estudo.

As vazões consideradas para o rio Santa Maria da Vitória foram obtidas a partir de regionalização hidrológica de vazões mínimas de sete dias consecutivos e período de retorno de dez anos ($Q_{7,10}$), conforme trabalho proposto por Coser (2003). Os valores dos parâmetros de qualidade de água considerados no início do trecho estudado do mesmo rio assumiram concentrações observadas em cursos d'água pouco poluídos e com teores de oxigênio dissolvido próximos da saturação.

Cenários estudados

Três diferentes cenários foram criados para este estudo demonstrativo. A conformação dos cenários foi estabelecida a partir da combinação de diferentes possíveis pontos de disposição de esgotos domésticos e de diferentes vazões para os referidos despejos. Os pontos de lançamento de efluentes foram localizados nos quilômetros 8, 16, 24, 32 e 40 do trecho estudado. Desta forma, entre eles, de montante para o próximo de jusante, foi assumida mesma distância, 8 quilômetros. Foi considerada nesta distribuição de pontos de lançamentos a localização de potenciais pontos de concentração de geração de esgotos sanitários ao longo do trecho estudado.

Para todos os cenários, considerou-se que o esgoto bruto apresentava DBO de 350 mg/L e concentração nula de OD. A adoção destes valores, no entanto, ignora o fato de que determinadas plantas de tratamento de esgoto permitem a disposição de efluentes com concentrações de OD que podem chegar a 2,00 mg/L, como pode ocorrer em processos de lodos ativados ou filtros biológicos percoladores. Desta forma, foram considerados cenários de simulação mais rigorosos do que aqueles que podem se estabelecer na prática, em decorrência da seleção de determinados processos de tratamento de esgotos.

Os cenários considerados podem ser sumarizados da seguinte maneira:

- **Cenário 1:** lançamento de cinco efluentes de mesma carga e sem nenhum tipo de tratamento ($P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5 = 40$ L/s), dispostos no Rio Santa Maria da Vitória nos quilômetros 8, 16, 24, 32 e 40.

- **Cenário 2:** lançamento de cinco efluentes com diferentes cargas de poluição. As características de qualidade dos efluentes são iguais às consideradas no cenário 1 com vazões diferenciadas ($P_1 = 60$ L/s, $P_2 = 50$ L/s, $P_3 = 40$ L/s, $P_4 = 30$ L/s e $P_5 = 20$ L/s).
- **Cenário 3:** situação hipotética na qual a vazão do rio Alto Posmoser foi substancialmente aumentada, igualando-se à vazão do rio Santa Maria da Vitória e influenciando de forma significativa a capacidade de autodepuração ao longo do curso d'água principal. Considerou-se a disposição de esgotos brutos em quatro pontos à montante do Rio Alto Posmoser (quilômetros 5, 9, 13 e 17), todas no valor de 20 L/s; adicionalmente considerou-se um ponto de disposição de esgotos no quilômetro 26, com vazão de 50 L/s.

Construção do problema de otimização

Neste estudo demonstrativo, a função objetivo e as restrições foram estabelecidas da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \sum_{i=1}^n E_i \quad (03)$$

sujeito à

$$E_i \leq 90; \quad (04)$$

$$DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \leq DBO_{\text{Esgoto Bruto}}; \quad (05)$$

$$DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \geq 0; \quad (06)$$

$$DBO_{\text{curso d'água}} \leq 5,0; \quad (07)$$

$$OD_{\text{curso d'água}} \geq 5,0; \quad (08)$$

Nas expressões anteriores E_i representa a eficiência do i -ésimo sistema de tratamento de esgotos considerado para a bacia em estudo, $OD_{\text{curso d'água}}$ a concentração de Oxigênio Dissolvido no curso d'água e $DBO_{\text{Esgoto Tratado}}$, $DBO_{\text{Esgoto Bruto}}$ e $DBO_{\text{curso d'água}}$ os valores de Demanda Bioquímica de Oxigênio para o esgoto tratado, esgoto bruto e curso d'água, respectivamente. A eficiência, por sua vez, é apropriada por meio da Equação (09):

$$E(\%) = \frac{DBO_{\text{Esgoto Bruto}} - DBO_{\text{Esgoto Tratado}}}{DBO_{\text{Esgoto Bruto}}} \cdot 100 \quad (09)$$

Como os cursos d'água que compõem a bacia hidrográfica do Rio Santa Maria da Vitória não passaram por processo de enquadramento, foram classificados, conforme estabelece Artigo 42 da Resolução Conama n° 357/2005, como rios Classe 2. Desta forma, os padrões de qualidade estabelecidos para DBO e OD em rios classe 2 deram forma às restrições estabelecidas pelas expressões (07) e (08), restrições que devem ser atendidas nos diferentes trechos em que foi segmentado o rio Santa Maria da Vitória. A Resolução CONAMA n° 430/2011, por intermédio do Artigo 21, estabelece que a concentração máxima de DBO no efluente tratado não deve superar 120 mg/L. No entanto, a Resolução indica que a referida concentração poderá ser ultrapassada naquelas situações em que o sistema de tratamento apresentar eficiência mínima de 60% para remoção DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor. Neste contexto, uma restrição adicional associada à remoção de DBO foi considerada, estabelecendo-se três diferentes grupos de otimização para cada um dos cenários de simulação anteriormente descritos. A restrição adicional assumiu as seguintes formas:

- $E_i \geq 60\%$, observando-se o valor mínimo de eficiência para remoção de DBO estabelecido pela Resolução CONAMA n° 430/2011; Nesta opção admite-se o lançamento de concentrações de DBO no esgoto tratado superiores a 120 mg/L;
- $DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \leq 120$ mg/L, observando-se o valor máximo de DBO no esgoto tratado, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA n° 430/2011;
- $E_i \geq 0$, ignorando-se o valor mínimo para eficiência de remoção de DBO (60%) e o valor máximo para a DBO no esgoto tratado (120 mg/L) sugeridos pela Resolução CONAMA n° 430/2011 e assumindo-se a possibilidade de disposição final de efluentes brutos. Nesta opção, toda a carga de DBO lançada poderia ser assimilada em decorrência da capacidade de autodepuração do curso d'água.

Para a solução dos problemas de PNL propostos neste trabalho foi utilizado o programa

SOLVER, disponibilizado pela planilha eletrônica Microsoft Excel®. É relevante registrar que, embora as equações que dão forma as restrições e função objetivo não configurem explicitamente um problema de PNL, as equações que permitem a estimativa das concentrações de OD e DBO ao longo do curso d'água e, portanto, a avaliação do atendimento das restrições, são não-lineares.

Ainda que o custo total de implantação de sistemas de tratamento de esgoto dependa de diferentes aspectos (por exemplo, tipo de tecnologia, demanda por área ou capacidade do sistema), a perspectiva considerada neste estudo é a de que os sistemas que usualmente apresentam menores eficiências de tratamento envolvem menores custos quando da sua implantação.

RESULTADOS

Lançamento de esgotos brutos

A Tabela 1 apresenta as concentrações máximas e mínimas para os parâmetros OD e DBO, por trecho e cenário simulado. Os trechos do rio Santa Maria da Vitória são definidos a partir dos diferentes pontos de disposição final de efluentes em cada cenário simulado. As células em destaque indicam aquelas situações nas quais os padrões de qualidade ambiental não foram respeitados.

A partir da simples inspeção da Tabela 1, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Nos cenários 1 e 2, quando considerado o lançamento de esgotos brutos, nos valores de DBO estimados para o rio Santa Maria da Vitória ocorreriam violações do padrão de qualidade ambiental estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357/2005 em todos os trechos simulados. A mesma condição se verificaria, para o cenário 3, nos trechos 2, 3, 4 e 5;
- Nos cenários 1 e 2, o padrão de qualidade ambiental estabelecido para o OD não seria violado nos trechos 1 e 2. No terceiro cenário, em função das baixas cargas de esgoto consideradas para a porção superior da bacia e da diluição provocada pelo aumento da vazão do rio Alto Posmoser, o padrão de qualidade associado ao OD seria respeitado ao longo de toda a extensão do rio Santa Maria da Vitória considerada neste estudo.

Tabela 1 – Concentrações máximas e mínimas para OD e DBO, por cenário e trecho simulado, considerando a disposição de esgotos brutos.

Cenários	Concentração (mg/L)	Trecho 1		Trecho 2		Trecho 3		Trecho 4		Trecho 5	
		OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO
1	Mínima	6,74	1,81	5,74	7,35	5,63	5,81	4,70	9,15	4,41	11,12
	Máxima	8,00	5,36	6,60	8,23	6,30	8,27	5,52	10,07	4,46	11,39
2	Mínima	6,45	1,81	5,18	9,48	5,13	7,35	4,28	9,81	4,07	10,60
	Máxima	8,00	7,13	6,27	10,60	5,86	9,76	5,03	10,81	4,21	10,90
3	Mínima	7,46	1,94	6,96	5,00	6,44	6,37	5,53	7,16	5,44	4,55
	Máxima	8,00	3,70	7,32	5,25	6,83	6,69	6,30	8,02	6,72	6,71

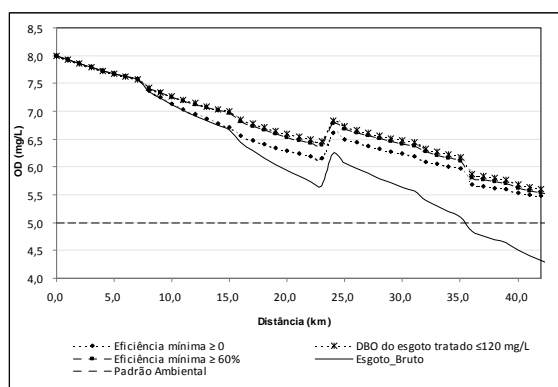


Figura 3 – Variação espacial das concentrações de OD para a porção superior do rio Santa Maria da Vitória - Resultados associados ao primeiro cenário.

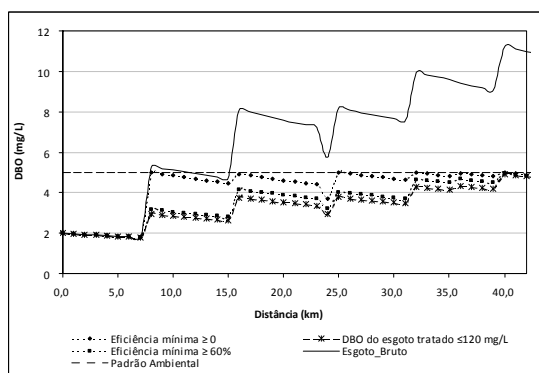


Figura 4 – Variação espacial das concentrações de DBO para a porção superior do rio Santa Maria da Vitória - Resultados associados ao primeiro cenário.

Quadro 1 – Níveis de tratamento sugeridos com auxílio da PNL

Cenários	Pontos de disposição de efluentes tratados				
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
1	Primário	Secundário	Primário	Secundário	Secundário
2	Secundário	Secundário	Secundário	Primário	-
3	-	Primário	Secundário	Secundário	Primário

As figuras 3 e 4 ilustram, para o primeiro cenário de disposição de efluentes considerados neste estudo, a variação espacial das concentrações de OD (Figura 3) e DBO (Figura 4) ao longo da porção superior do rio Santa Maria da Vitória. Nestas figuras, os limites mínimos e máximos para concentrações de OD e DBO preconizados pela Resolução Conama n° 357/2005 para cursos de água Classe 2 são representados pelas linhas tracejadas.

Seleção de níveis e eficiências de tratamento

As mínimas eficiências requeridas para os múltiplos lançamentos de esgotos pontuais considerados neste trabalho, estabelecidas com auxílio da PNL, estão indicadas nas Tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Eficiências de tratamento de esgotos (em %) estimadas com auxílio da PNL considerando-se eficiência mínima de remoção de DBO igual a 60%

Cenários	Pontos de disposição de efluentes tratados					Σ Eficiências
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	
1	60	60	66	60	78	324
2	75	60	60	60	60	315
3	60	60	60	60	60	300

Tabela 3 – Eficiências de tratamento de esgotos (em %) estimadas com auxílio da PNL considerando-se efluente tratado com valor máximo de DBO igual a 120 mg/L.

Cenários	Pontos de disposição de efluentes tratados					Σ Eficiências
	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	
1	66	66	66	66	66	330
2	66	66	66	66	66	330
3	66	66	66	66	66	330

O Quadro 1, por sua vez, relaciona os níveis mínimos de tratamento sugeridos para cada ponto de disposição final de efluentes tratados, quando considerada a possibilidade de disposição de efluentes brutos no curso d’água.

A adoção das eficiências de tratamento estimadas com auxílio da PNL permitiriam que, ao longo de toda a extensão do sistema hídrico simulado, os padrões de qualidade estabelecidos para OD e DBO em rios classe 2 fossem respeitados. É

relevante registrar que naquelas simulações em que se impôs um valor de DBO de 120 mg/L para o efluente tratado, partindo-se de um valor constante de concentração de DBO no efluente bruto, as eficiências estimadas sistemas de tratamento foram sempre iguais (66%), independentemente do cenário de disposição avaliado (Tabela 4).

Tabela 4 – Eficiências mínimas de tratamento (em %) considerando-se a possibilidade de lançamento de efluente bruto

Cenários	Pontos de disposição de efluentes tratados					Σ Eficiências
	P1	P2	P3	P4	P5	
1	10	80	50	80	90	310
2	90	90	90	5	0	275
3	0	15	80	80	20	195

ANÁLISE E DISCUSSÃO

Os diferentes cenários considerados neste estudo permitiram a simulação, ainda que para um mesmo sistema hídrico, de diferentes condições de disposição de efluentes e de disponibilidade hídrica nos corpos receptores. No primeiro cenário, as cargas de esgotos eram idênticas e igualmente distribuídas ao longo do curso d’água principal. No segundo cenário, as cargas foram progressivamente reduzidas no sentido da foz do sistema hídrico. O terceiro cenário, por sua vez, apresentou menores cargas de lançamento na porção superior do trecho simulado e apenas um ponto de disposição de efluente com carga semelhante àquelas consideradas nos dois primeiros cenários.

Como as cargas hipoteticamente lançadas no Rio Santa Maria da Vitória progressivamente diminuíram dos cenários de 1 a 3, o esforço de tratamento, avaliado a partir da soma das eficiências necessárias aos conjuntos de sistemas de tratamento, também foi reduzido.

A imposição de tratamento de esgotos com eficiência de DBO de, no mínimo, 60% produziu pequenas variações entre os níveis de tratamento associados aos diferentes pontos de disposição final de efluentes, quando considerados os cenários 1 e 2. No cenário 3, em função das menores cargas orgânicas referentes aos lançamentos localizados na porção superior do trecho simulado e do aumento da capacidade de diluição associada aos rios Alto Posmoser e São Luiz, eficiências de remoção de

60% em todos os pontos de disposição final de efluentes seriam suficientes para garantir a manutenção dos padrões de qualidade associados ao curso d'água, conforme resultados apresentados pela Tabela 2.

Em função das características hidrodinâmicas de qualidade de água consideradas para o rio Santa Maria da Vitória, a imposição de valores máximos de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L garantiria a manutenção dos padrões de qualidade associados ao OD e a DBO nos cursos d'água, independentemente do cenário de simulação considerado. Neste caso, não seria observada qualquer diferença entre os níveis de tratamento associados aos diferentes pontos de disposição de efluentes, conforme resultados reunidos na Tabela 3. Adicionalmente, é relevante observar que a restrição associada aos valores de DBO no esgoto tratado conduziria ao maior esforço de tratamento de esgotos na bacia hidrográfica. Para o cenário 01, por exemplo, a imposição de tratamentos com eficiência de remoção de DBO de 60%, permitiria o lançamento de esgotos tratados com DBO de até 140 mg/L.

Naquelas simulações em que se avaliou a possibilidade de implementação de sistemas de tratamento, com eventual lançamento de efluentes brutos, o esforço de tratamento no contexto da bacia hidrográfica seria substancialmente reduzido, conforme resultados reunidos na Tabela 4. A distribuição, por ponto de disposição de efluente, dos diferentes níveis de tratamento (ou, eventualmente, da ausência de tratamento) seria conseqüência da localização e da carga orgânica disposta no curso d'água e da capacidade de assimilação de cargas orgânicas pelo curso d'água.

Em todos os cenários pôde-se observar que, em função da diluição provocada pelo Rio Posmoser no quilômetro 24, as concentrações de OD foram aumentadas e as de DBO diminuídas. Este efeito foi particularmente mais importante naquelas simulações em que se considerou a disposição final de efluentes brutos.

No terceiro cenário, em conseqüência das menores cargas orgânicas dispostas na porção superior da bacia estudada e do aumento da vazão do Rio Posmoser, as concentrações de OD mantiveram-se acima do padrão de qualidade ambiental, independentemente do cenário de simulação considerado, ainda que as concentrações de DBO estivessem acima do padrão de qualidade para os rios classe 2.

A partir da simples inspeção do Quadro 01 é possível observar que, para todos os cenários considerados neste estudo, a combinação de uma técnica

de otimização com um modelo de qualidade de água permitiria o fornecimento de subsídios para o escalonamento dos sistemas de tratamento de esgotos. A conformação dos sistemas hídricos estudados, estabelecida a partir da variação das cargas afluentes e dos pontos de disposição final dos efluentes, permitiria a indicação de pontos de disposição nos quais deveriam ser implantados sistemas com níveis mais baixos e menores eficiências de tratamento ou nos quais, a princípio, seria mantida, para uma fase inicial, a disposição final de efluentes brutos (células em destaque no Quadro 01), sem que os padrões de qualidade dos corpos d'água fossem desrespeitados.

CONCLUSÕES

Os principais resultados deste trabalho demonstrativo da combinação do uso de simulação de qualidade de água e de otimização podem ser assim sumarizados:

- Os resultados do estudo de caso analisado demonstraram que o uso combinado de modelo computacional de qualidade de água e técnica de otimização constitui alternativa eficiente para a seleção dos níveis de tratamento, podendo subsidiar e fundamentar tecnicamente tomadas de decisão relativas à seleção ou ao escalonamento dos sistemas de tratamento de esgotos numa bacia hidrográfica, considerando aspectos relacionados com a proteção e a recuperação dos recursos hídricos;
- A metodologia empregada permitiu estimativas de eficiências mínimas de tratamento de esgotos, considerando diferentes possíveis cenários de disposição final, que permitiriam a manutenção dos padrões de qualidade associados à demanda bioquímica de oxigênio e ao oxigênio dissolvido ao longo de toda a extensão da porção superior do rio Santa Maria da Vitória considerada;
- O estudo de caso demonstra que a adoção dos níveis mínimos de remoção de DBO estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, desconsiderando-se as capacidades de autodepuração dos corpos receptores, pode conduzir a grande aumento de gastos de recursos em implantação, operação e manutenção de sistemas de tratamen-

to de efluentes, no Brasil, sem que ocorram ganhos no que concerne a manutenção de valores de OD e DBO dentro dos limites preconizados pela Resolução CONAMA n° 357/2005, para as diferentes classes de uso de água. Estes gastos adicionais, apesar de representar em ganhos ambientais, no caso de cada sistema individual, poderá acarretar perdas ambientais em outros trechos de cursos de água localizados na mesma em outras bacias brasileiras, pelo fato de que os gastos adicionais podem acarretar redução de recursos disponíveis para construção e operação de outros sistemas de tratamento.

- Ainda que a avaliação sistêmica seja de difícil condução, em decorrência da fragilidade das redes hidrométricas ou da delicada tarefa de se escolher ou calibrar um modelo de qualidade de água, esta abordagem pode estabelecer alternativas consistentes para o gerenciamento da qualidade de água numa bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

- BROWN, L. C.; BARNWELL. T. O. *The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS: documentation and user manual*. Athens, GA.: Environmental Research Laboratory, USEPA, EPA/600/3-87/007, 1987, 189 p.
- BURN, D. H. Water-quality management through combined simulation-optimization approach. *Journal of Environmental Engineering*, v.115, n.5, p.1011-1024, 1988.
- CIRILO, J. A. Programação Não Linear Aplicada à Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: UFRGS.2002.
- COSER, M. C. *Regionalização de vazões $Q_{7,10}$ no estado do Espírito Santo*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2003.
- HABTEC Engenharia Sanitária e Ambiental. *Diagnóstico e Plano Diretor das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu: Ecossistemas Aquáticos Interiores e Recursos Hídricos. Relatório Diagnóstico - Volume I*. Vitória, Consórcio Intermunicipal de Recuperação das Bacias dos Rios Santa Maria da Vitória e Jucu, 1997.
- HAN, Y; HUANG, Y. F.; WANG, G. Q.; MAQSOOD, I. A Multi-objective Linear Programming Model with Interval Parameters for Water Resources Allocation in Dalian City. *Water Resources Management*, v.25, n.2, p.449-463, DOI: 10.1007/s11269-010-9708-7, 2011.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2011.
- MENDONÇA, A.S.F.; ALMEIDA, M.M. Definição de alternativas de eficiências de tratamento de efluentes para manutenção de padrões ambientais. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, João Pessoa; ABRH; 2005. p.501-510.
- MUGAA, H. E.; MIHELICIC, J. R. Sustainability of wastewater treatment technologies. *Journal of Environmental Management*, v.88, n.3, p.437-447,2008.
- PÖPEL, H. J. Aeration and gas transfer. *Delft, Delft University of Technology*, 1979.
- ROQUES, T. V. P. *Aplicação de Modelos Computacionais na Análise de Outorga para diluição de efluentes em corpos d'água: Fontes Pontuais e Difusas*. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2006.
- SALIM, F.P.C. *Desenvolvimento de sistema de suporte a decisão para o gerenciamento da qualidade das águas em rios considerando múltiplas fontes de poluição pontual*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2004.
- SAADATPOUR, M.; AFSHAR, A. Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation-optimization approach. *Water Resources Management*, v.21, n.7, p.1207-1224, 2007. DOI:10.1007/s11269-006-9077-4
- SOUZA, M. A. A. *Metodología de Analisis de Decisiones para Seleccionar Alternativas de Tratamiento y Uso de Aguas Residuales*. Lima, Peru: CEPIS – Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1997.
- SOUZA, M. A. A.; FORSTER, C. F. *Metodologias para Seleção de Processos de Tratamento de Águas*

Residuárias. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.1, n.2, p.19-31, 1996.

TSAGARAKIS, K. P.; MARA, D. D.; ANGELAKIS, A. N. Application of Cost Criteria for Selection of Municipal Wastewater Treatment Systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, v.142, n.1-4, p.187-210, 2003.

VON SPERLING, M. Análise dos padrões brasileiros de qualidade de corpos d'água e de lançamento de efluentes líquidos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.1, p.111-132, 1998.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e modelagem da qualidade da água em rios*. Belo Horizonte, DESA/UFMG, 2007.

VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento dos esgotos*. Belo Horizonte, DESA/UFMG, 2005.

YANG, C. C.; CHEN, C. S.; LEE, C. S.. Comprehensive River Water Quality Management by Simulation and Optimization Models. *Environmental Modeling and Assessment*, p.1-12, 2011. DOI: 10.1007/s10666-010-9247-x.

ZAMPROGNO, D.P. *Subsídio para a definição de locais apropriados para a metodológico implantação de reservatórios de regularização de vazões: refinamento e aplicação de procedimento*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1999.

Use of Optimization and Water Quality Modeling to Support the Selection of Wastewater Treatment Plants in Watersheds

ABSTRACT

This paper discusses the joint application of optimization and water quality modeling techniques to support the selection of wastewater treatment plants (WWTPs). In this sense, a theoretical demonstration of the methodology is presented. To make the case study more realistic, data from the upper reaches of the Rio Santa Maria da Vitória, Espírito Santo state, Brazil, were used. The results indicate that the methodology can technically support decision making regarding the selection of WWTPs in a river basin.

They also demonstrate that when the adoption of minimum levels of BOD removal, set by CONAMA Resolution n° 430/2011, does not take into account the dilution and self-depuration capacity in the receiving water bodies, it can increase costs of WWTPs, without gains related to maintenance of DO and BOD parameters within the limits established by CONAMA Resolution n° 357/2005.

Key-words: *Nonlinear Programming, water quality modeling, wastewater treatment systems planning.*