

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

GLAUCIA DE LAIA NASCIMENTO SÁ

**ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIAS MÍNIMAS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM  
SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS – UMA ABORDAGEM PARA O  
ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

VITÓRIA - ES

2018

GLAUCIA DE LAIA NASCIMENTO SÁ

**ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIAS MÍNIMAS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM  
SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS – UMA ABORDAGEM PARA O  
ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração em Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis

VITÓRIA – ES

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Tecnológica,  
Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

S111e Sá, Glaucia de Laia Nascimento, 1985-  
Estimativa de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio  
em sistemas de tratamento de esgotos : uma abordagem para o  
âmbito de bacias hidrográficas / Glaucia de Laia Nascimento Sá.  
– 2018.  
188 f. : il.

Orientador: José Antônio Tosta dos Reis.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –  
Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Nitrogênio. 2. Água – Qualidade – Modelos. 3. Otimização  
matemática. 4. Algoritmos genéticos. 5. Esgotos – Tratamento.  
6. Modelagem matemática. I. Reis, José Antônio Tosta dos. II.  
Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III.  
Título.

CDU: 628



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

# **ESTIMATIVA DE EFICIÊNCIAS MÍNIMAS DE REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS – UMA ABORDAGEM PARA O ÂMBITO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

**Glaucia de Laia Nascimento Sá**

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. José Antônio Tosta dos Reis  
Orientador - PPGEA/CT/UFES

Prof. Dr. Antônio Sérgio Ferreira Mendonça  
Examinador Interno – PPGEA/UFES

Prof. Dr. Fernando das Graças Braga da Silva  
Examinador Externo – DEC/UNIFEI

Diogo Costa Buarque  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória-ES, 01 de outubro de 2018.

## DEDICATÓRIA

À Lara, alegria dos meus dias.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pelo milagre da vida, pela condução nesta caminhada cheia de desafios e conquistas e pela realização deste sonho.

A Fabian Sá, por acreditar em mim em todos os momentos, e pelo incentivo e apoio constantes.

Aos meus pais Sônia e Hudson, pela força e suporte, e principalmente pelo cuidado com a Lara, sem eles, nada seria possível.

Ao Professor José Antônio Tosta Reis, por ter desempenhado com maestria o papel de orientador, por ter acreditado e confiado em mim, pela compreensão e apoio, e por ser uma pessoa exemplar.

Aos amigos que ganhei ao longo desta jornada, em especial, Alinie, por estar sempre presente, compartilhando os momentos de alegrias e de dificuldades, e Murilo e Andréia, mesmo que tenhamos nos conhecido na reta final, tornaram mais leves dias exaustivos de trabalho.

À minha família, em especial meu irmão Vitor, e aos meus amigos, por compreenderem minha ausência em muitos momentos e torcerem pela realização desta conquista.

Aos colegas do LAMORH, pelas experiências e auxílios trocados e pela amizade.

Aos professores do PPGEA, pelo conhecimento e experiências transmitidas.

À banca examinadora, pela aceitação do convite e pelas contribuições para esta pesquisa.

A CAPES, pela bolsa de estudos concedida.

## EPÍGRAFE

“Lá na cidade já tem rio pedindo água,  
pulando cedo do seu leito pra fugir,  
na esperança de não entrar pelo cano,  
chegar no mar antes de se poluir.”

Daniel Lucena -Expresso Rural

## RESUMO

A adequada avaliação dos sistemas de tratamento de efluentes envolve múltiplos objetivos, sendo, o principal, a remoção dos poluentes que possam prejudicar o corpo receptor. O nível de tratamento necessário depende das características do efluente, da classe de usos do curso d'água receptor e de sua capacidade de autodepuração. No processo de seleção do sistema de tratamento de esgotos a atenção é, geralmente, voltada para o controle do aporte de matéria orgânica, por ser a principal responsável pelo consumo do oxigênio dissolvido. No entanto, deve-se ressaltar que outros constituintes também devem ser avaliados no processo de seleção. O nitrogênio constitui parâmetro de grande importância quanto ao controle da poluição hídrica pois, dentre os processos de conversão da matéria nitrogenada, a nitrificação implica no consumo de oxigênio do meio líquido, além do comportamento tóxico de algumas formas do nitrogênio. O presente trabalho empregou, para a bacia hidrográfica do rio Pardo (Espírito Santo, Brasil), modelagem matemática de qualidade da água combinada a técnica de otimização para determinar as eficiências mínimas de remoção de matéria orgânica e nitrogênio e pré-selecionar sistemas de tratamento de esgotos. Os padrões de qualidade associados aos parâmetros DBO, OD e nitrogênio para as classes de usos de corpos d'água doce constituíram as restrições ao problema. O programa computacional desenvolvido no ambiente do *software* MatLab, baseado nas formulações matemáticas do modelo QUAL-UFMG, associado ao Algoritmo Genético, permitiu a apropriação de eficiências de DBO e amônia para os sistemas de tratamento de efluentes da bacia hidrográfica, para os cenários considerados. Foram pré-selecionados sistemas de tratamento de esgotos em função das eficiências obtidas para as localidades de Ibatiba, Irupi, Lúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. Considerando-se os padrões de qualidade ambiental estabelecidos para rios classe 2, observou-se que a quantidade de alternativas de tratamento pré-selecionadas para águas com pH entre 7,5 e 8,0 foi inferior à aquela associada aos rios com pH inferior ou igual a 7,5, uma vez que, com o aumento de pH nos cursos d'água, os sistemas precisam ser mais eficientes quanto à remoção de amônia, em função do potencial aumento da sua toxicidade.

Palavras chaves: Nitrogênio, Modelo de qualidade de água, Otimização, Algoritmo genético, Tratamento de esgotos.

## ABSTRACT

The proper assessment of effluent treatment systems implies multiple objectives, being has the most relevant the removal of pollutants which might harm the receiving water body. The level of treatment required depends on effluent characteristics, receiving water course class uses from the and self-purification capacity. In the sewage treatment system selection process attention is mostly directed towards the control of the organic matter input, since it is the main responsible for dissolved oxygen consumption. Nevertheless, it must be emphasized that other components must also be evaluated in the selection process. Nitrogen is a parameter of great importance for the control of water pollution, since, among the nitrogenous matter conversion processes, nitrification implies in water oxygen consumption, in addition to the toxic behavior of some forms of nitrogen. The present study employed, for the watershed area of River Pardo (Espírito Santo, Brazil), mathematical water quality modeling combined with the optimization technique to estimate the minimum organic matter and nitrogen removal efficiency and to pre-select sewage treatment systems. Quality standards associated with the BOD, DO and nitrogen parameters for fresh water bodies' uses classes constituted the constraints to the problem. The computing program developed in the MatLab software environment and based on the mathematical formulations of the QUAL-UFMG model, associated with the Genetic Algorithm, allowed the appropriation of BOD and ammonia efficiencies for the river basin effluent treatment systems for the scenarios considered. Sewage treatment systems were pre-selected, according to the estimated efficiencies observed for districts Ibatiba, Irupi, Iúna, Santíssima Trindade and Nossa Senhora das Graças districts. Considering the quality standards established for class 2 rivers, it was observed that the amount of pre-selected treatment alternatives for waters presenting pH between 7.5 and 8.0 were lower than those that associated with waters presenting pH lower or equal to 7.5 since, with the increase in the pH for water courses, the systems need to be more efficient in the ammonia removal, due to the potential increase of its toxicity.

Keywords: Nitrogen, Water quality model, Optimization, Genetic algorithm, Sewage treatment.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Ciclo total do nitrogênio no ambiente. ....                                                                                                                                         | 37 |
| Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pardo.....                                                                                                                                 | 62 |
| Figura 3 – Diagrama unifilar da bacia hidrográfica do rio Pardo.....                                                                                                                           | 63 |
| Figura 4 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardo para o Cenário 1.....                                                                                                               | 79 |
| Figura 5 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardo para o Cenário 1.....                                                                                                  | 80 |
| Figura 6 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardinho para o Cenário 1.                                                                                                                | 82 |
| Figura 7 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardinho para o Cenário 1.....                                                                                               | 82 |
| Figura 8 – Perfis de concentração de OD e DBO do ribeirão da Perdição para o Cenário 1.....                                                                                                    | 83 |
| Figura 9 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do ribeirão da Perdição para o Cenário 1.....                                                                                       | 84 |
| Figura 10 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardo para o Cenário 2....                                                                                                               | 86 |
| Figura 11 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardo para o Cenário 2.....                                                                                                 | 86 |
| Figura 12 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardinho para o Cenário 2. ....                                                                                                          | 88 |
| Figura 13 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardinho para o Cenário 2.....                                                                                              | 89 |
| Figura 14 – Perfis de concentração de OD e DBO do ribeirão da Perdição para o Cenário 2.....                                                                                                   | 90 |
| Figura 15 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do ribeirão da Perdição para o Cenário 2.....                                                                                      | 90 |
| Figura 16 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2. .... | 94 |
| Figura 17 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2. ....  | 94 |

|                                                                                                                                                                                                   |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 18 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2. .... | 94  |
| Figura 19 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2. ....  | 94  |
| Figura 20 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3. ....    | 95  |
| Figura 21 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3. ....     | 95  |
| Figura 22 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3. .... | 95  |
| Figura 23 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3. ....  | 95  |
| Figura 24 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                 | 101 |
| Figura 25 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....              | 101 |
| Figura 26 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. ....         | 101 |
| Figura 27 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. ....      | 101 |
| Figura 28 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                 | 102 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 29 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                | 102 |
| Figura 30 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                   | 102 |
| Figura 31 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                | 102 |
| Figura 32 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                   | 103 |
| Figura 33 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                | 103 |
| Figura 34 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                              | 106 |
| Figura 35 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                           | 106 |
| Figura 36 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                               | 107 |
| Figura 37 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                            | 107 |
| Figura 38 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. .... | 107 |
| Figura 39 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a                                                                                                                      |     |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. ....                                                                                                                                                       | 107 |
| Figura 40 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                               | 108 |
| Figura 41 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                            | 108 |
| Figura 42 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                | 108 |
| Figura 43 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                             | 108 |
| Figura 44 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.....    | 109 |
| Figura 45 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0..... | 109 |
| Figura 46 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                        | 109 |
| Figura 47 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                     | 109 |
| Figura 48 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                         | 110 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 49 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.....                                                                                               | 110 |
| Figura 50 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. ....    | 110 |
| Figura 51 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5. .... | 110 |
| Figura 52 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                        | 111 |
| Figura 53 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                     | 111 |
| Figura 54 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                         | 111 |
| Figura 55 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0. ....                                                                                                      | 111 |
| Figura 56 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.....             | 112 |
| Figura 57 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.....          | 112 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 58 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                               | 112 |
| Figura 59 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                            | 112 |
| Figura 60 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                | 113 |
| Figura 61 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                             | 113 |
| Figura 62 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.....    | 113 |
| Figura 63 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5..... | 113 |
| Figura 64 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                               | 114 |
| Figura 65 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                            | 114 |
| Figura 66 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                                | 114 |
| Figura 67 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5. ....                                                                                             | 114 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 68 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5..... | 115 |
| Figura 69 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5..... | 115 |
| Figura 70 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. ....                                                                                                             | 117 |
| Figura 71 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. .                                                                                                             | 117 |
| Figura 72 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. ....                                                                                                  | 118 |
| Figura 73 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. ....                                                                                                             | 118 |
| Figura 74 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. .                                                                                                             | 118 |
| Figura 75 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L. ....                                                                                                  | 118 |
| Figura 76 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.....                                                                  | 119 |
| Figura 77 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.....                                                               | 119 |
| Figura 78 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior a 7,5 e Modelo de Otimização 3.....                                                                   | 119 |

|                                                                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 79 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior a 7,5 e Modelo de Otimização 3.....  | 119 |
| Figura 80 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.....    | 120 |
| Figura 81 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.....    | 120 |
| Figura 82 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.....    | 120 |
| Figura 83 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3..... | 120 |
| Figura 84 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.....    | 121 |
| Figura 85 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3..... | 121 |
| Figura 86 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. ....                                               | 124 |
| Figura 87 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. ....                                            | 124 |
| Figura 88 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. ....                                    | 124 |
| Figura 89 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. ....                                               | 124 |
| Figura 90 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. ....                                            | 125 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                  |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 91 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%. .....                                                                                       | 125 |
| Figura 92 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.....             | 126 |
| Figura 93 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. ....         | 126 |
| Figura 94 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH inferior ou igual a 7,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. ....    | 126 |
| Figura 95 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH inferior ou igual a 7,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. .... | 126 |
| Figura 96 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.....             | 127 |
| Figura 97 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. ....         | 127 |
| Figura 98 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.....             | 127 |
| Figura 99 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. ....         | 127 |

|                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 100 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.....     | 128 |
| Figura 101 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3. .... | 128 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 – Padrões de qualidade da DBO, OD e das formas de nitrogênio em corpos d'água doce.....                                                                                                    | 39  |
| Tabela 2 – Panorama dos sistemas de tratamento de esgotos em operação no Brasil. ....                                                                                                               | 41  |
| Tabela 3 – Valores típicos do coeficiente de sedimentação Ks em d <sup>-1</sup> (base e, 20°C). ....                                                                                                | 66  |
| Tabela 4 – Valores adotados para os coeficientes da modelagem do nitrogênio.....                                                                                                                    | 67  |
| Tabela 5 – Vazão dos efluentes domésticos de origem urbana da bacia hidrográfica do rio Pardo.....                                                                                                  | 68  |
| Tabela 6 – Conjunto de alternativas consideradas na etapa de pré-seleção de sistemas de tratamento de esgotos.....                                                                                  | 76  |
| Tabela 7 – Concentrações críticas para o Cenário 1. ....                                                                                                                                            | 78  |
| Tabela 8 – Concentrações críticas para o Cenário 2. ....                                                                                                                                            | 85  |
| Tabela 9 – Eficiências (em %) mínimas de remoção de DBO obtidos pelo Modelo de Otimização 1. ....                                                                                                   | 93  |
| Tabela 10 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 considerando rios classe 2 de enquadramento. ....                                                  | 97  |
| Tabela 11 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 considerando rios classe 3 de enquadramento. ....                                                  | 97  |
| Tabela 12 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando rios classe 2 de enquadramento. ....                                                  | 104 |
| Tabela 13 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando rios classe 3 de enquadramento. ....                                                  | 104 |
| Tabela 14 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para a DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 2. ....       | 116 |
| Tabela 15 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para a DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....       | 116 |
| Tabela 16 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 2. .... | 122 |

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 17 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. .... | 122 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 1 – Eficiências de remoção de DBO estimadas pelo Modelo de Otimização 1. .... | 154 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 2 – Eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para águas classe de enquadramento 2. .... | 154 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 3 – Eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para águas classe de enquadramento 3. .... | 155 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 4 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando a capacidade de autodepuração e os rios classe 2. ... | 156 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 5 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando a capacidade de autodepuração e os rios classe 3. ... | 157 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 6 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 2. .... | 158 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                            |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 7 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 3. .... | 159 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 8 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e rios classe 2. .... | 161 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela A 9 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e rios classe 3. .... | 162 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## LISTA DE QUADROS

|                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.....                                                                                                                           | 44  |
| Quadro 2 – Pares de eficiência de remoção de DBO e amônia e suas respectivas localidades. ....                                                                                                            | 73  |
| Quadro 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba. ....                                                                                                             | 130 |
| Quadro 4 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi. ....                                                                                                               | 132 |
| Quadro 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna. ....                                                                                                                | 134 |
| Quadro 6 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as comunidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças.....                                                                         | 136 |
|                                                                                                                                                                                                           |     |
| Quadro B 1 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....         | 164 |
| Quadro B 2 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....  | 166 |
| Quadro B 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. .... | 168 |
| Quadro B 4 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....           | 170 |
| Quadro B 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....    | 172 |
| Quadro B 6 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....    | 174 |

|                                                                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Quadro B 7 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3.....                                                 | 176 |
| Quadro B 8 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....                                         | 178 |
| Quadro B 9 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. ....                                        | 180 |
| Quadro B 10 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3.....        | 182 |
| Quadro B 11 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3..... | 184 |
| Quadro B 12 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3.    | 186 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|            |                                                          |
|------------|----------------------------------------------------------|
| <b>A01</b> | Tratamento primário (tanques sépticos)                   |
| <b>A02</b> | Tratamento primário convencional                         |
| <b>A03</b> | Tratamento primário avançado                             |
| <b>A04</b> | Lagoa facultativa                                        |
| <b>A05</b> | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                      |
| <b>A06</b> | Lagoa aerada facultativa                                 |
| <b>A07</b> | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação       |
| <b>A08</b> | Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa +lagoa de maturação  |
| <b>A09</b> | Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa |
| <b>A10</b> | Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas   |
| <b>A11</b> | Infiltração lenta                                        |
| <b>A12</b> | Infiltração rápida                                       |
| <b>A13</b> | Escoamento superficial                                   |
| <b>A14</b> | Sistemas alagados construídos ( <i>wetlands</i> )        |
| <b>A15</b> | Tanque séptico + filtro anaeróbio                        |
| <b>A16</b> | Tanque séptico + infiltração                             |
| <b>A17</b> | Reator UASB                                              |
| <b>A18</b> | UASB + lodos ativados                                    |
| <b>A19</b> | UASB + biofiltro aerado submerso                         |
| <b>A20</b> | UASB + filtro anaeróbio                                  |
| <b>A21</b> | UASB + filtro biológico percolador de alta carga         |
| <b>A22</b> | UASB + flotação por ar dissolvido                        |
| <b>A23</b> | UASB + lagoas de polimento                               |
| <b>A24</b> | UASB + lagoa aerada facultativa                          |
| <b>A25</b> | UASB + lagoa aerada mistura completa + lagoa decantação  |
| <b>A26</b> | UASB + escoamento superficial                            |

|               |                                                                            |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>A27</b>    | Lodos ativados convencional                                                |
| <b>A28</b>    | Lodos ativados - aeração prolongada                                        |
| <b>A29</b>    | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                             |
| <b>A30</b>    | Lodos ativados convencional com remoção biológica de nitrogênio            |
| <b>A31</b>    | Lodos ativados convencional com remoção biológica de nitrogênio e fósforo  |
| <b>A32</b>    | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                        |
| <b>A33</b>    | Filtro biológico percolador de baixa carga                                 |
| <b>A34</b>    | Filtro biológico percolador de alta carga                                  |
| <b>A35</b>    | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                 |
| <b>A36</b>    | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de nitrogênio              |
| <b>A37</b>    | Biodisco                                                                   |
| <b>AG</b>     | Algoritmo Genético                                                         |
| <b>BASINS</b> | <i>Better Assessment Science Integrating point &amp; Non-point Sources</i> |
| <b>BMPs</b>   | <i>Best Management Practices</i>                                           |
| <b>C1</b>     | 1º Condição de Lançamento                                                  |
| <b>C2</b>     | 2º Condição de Lançamento                                                  |
| <b>C3</b>     | 3º Condição de Lançamento                                                  |
| <b>CEH</b>    | Center for Ecology & Hydrology                                             |
| <b>CEPIS</b>  | Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente        |
| <b>CONAMA</b> | Conselho Nacional do Meio Ambiente                                         |
| <b>COPPE</b>  | Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia                    |
| <b>CREAMS</b> | <i>Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems</i> |
| <b>DBO</b>    | Demanda Bioquímica de Oxigênio                                             |
| <b>DHI</b>    | <i>Danish Hydraulic Institute</i>                                          |
| <b>EAWAG</b>  | <i>Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology</i>    |
| <b>EPA</b>    | <i>Environmental Protection Agency</i>                                     |

|                       |                                                                            |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| <b>ETE</b>            | Estação de Tratamento de Esgotos                                           |
| <b>ETE 01</b>         | Estação de Tratamento de Esgotos de Ibatiba                                |
| <b>ETE 02</b>         | Estação de Tratamento de Esgotos de Irupi                                  |
| <b>ETE 03</b>         | Estação de Tratamento de Esgotos de Iúna                                   |
| <b>ETE 04</b>         | Estação de Tratamento de Esgotos de Santíssima Trindade                    |
| <b>ETE 05</b>         | Estação de Tratamento de Esgotos de Nossa Senhora das Graças               |
| <b>HEC-HAS</b>        | <i>Hydrological Engineering Center-River Analysis System</i>               |
| <b>HR-Wallingford</b> | <i>Hydraulics Research Wallingford</i>                                     |
| <b>HSPF</b>           | <i>Hydrologic Simulation Program - Fortran</i>                             |
| <b>IHE</b>            | <i>International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering</i> |
| <b>IWRM</b>           | <i>International Water Resources Management</i>                            |
| <b>MATLAB</b>         | <i>Matrix Laboratory</i>                                                   |
| <b>MQA</b>            | Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização                                |
| <b>Namon</b>          | Nitrogênio amoniacal                                                       |
| <b>Norg</b>           | Nitrogênio orgânico                                                        |
| <b>OD</b>             | Oxigênio Dissolvido                                                        |
| <b>RIZA</b>           | <i>Inland Water Management and Waste Water Treatment</i>                   |
| <b>SEMOG</b>          | <i>Southeast Michigan Council of Governments</i>                           |
| <b>SIMCAT</b>         | <i>Simulated Catchments</i>                                                |
| <b>SIMOX</b>          | <i>Dissolved Oxygen Simulation Model</i>                                   |
| <b>SisBaHiA</b>       | Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental                                    |
| <b>SNIS</b>           | Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento                           |
| <b>SWAT</b>           | <i>Soil Water and Analysis Tools</i>                                       |
| <b>SWRRB</b>          | <i>Simulator for Water Resources in Rural Basins</i>                       |
| <b>TMDL</b>           | <i>Total Maximum Daily Load</i>                                            |
| <b>TOMCAT</b>         | <i>Temporal Overall Model for CATchments</i>                               |
| <b>TWDB</b>           | <i>Texas Water Development Board</i>                                       |

|              |                                                      |
|--------------|------------------------------------------------------|
| <b>USACE</b> | <i>United States Army Corps of Engineers</i>         |
| <b>USDA</b>  | <i>United States Department of Agriculture</i>       |
| <b>USEPA</b> | <i>United States Environmental Protection Agency</i> |
| <b>WASP</b>  | <i>Water Analysis Simulation Program</i>             |
| <b>WES</b>   | <i>Waterways Experiment Station</i>                  |
| <b>WQRRS</b> | <i>Water Quality for River-Reservoir Systems</i>     |
| <b>WRE</b>   | <i>Water Resources Engineers, Inc.</i>               |

## SUMÁRIO

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução.....                                         | 29 |
| 2. Objetivos.....                                          | 32 |
| 2.1. Objetivo Geral .....                                  | 32 |
| 2.2. Objetivos Específicos .....                           | 32 |
| 3. Revisão Bibliográfica .....                             | 33 |
| 3.1. Gerenciamento de Recursos Hídricos.....               | 33 |
| 3.2. Considerações Gerais Sobre Qualidade das Águas .....  | 34 |
| 3.2.1. Parâmetros de Qualidade de Água.....                | 34 |
| 3.2.1.1. Oxigênio Dissolvido .....                         | 35 |
| 3.2.1.2. Demanda Bioquímica de Oxigênio .....              | 35 |
| 3.2.1.3. Compostos Nitrogenados .....                      | 36 |
| 3.2.2. Padrões Ambientais de Qualidade .....               | 38 |
| 3.3. Sistemas de Tratamento de Esgotos .....               | 39 |
| 3.4. Modelos de Simulação da Qualidade da Água .....       | 43 |
| 3.4.1. Formulação Matemática do Modelo.....                | 51 |
| 3.5. Otimização .....                                      | 54 |
| 3.5.1. Técnicas de Otimização .....                        | 54 |
| 3.5.2. Algoritmos Genéticos.....                           | 56 |
| 4. Área de Estudo .....                                    | 62 |
| 5. Metodologia .....                                       | 64 |
| 5.1. Modelagem Matemática da Qualidade de Água .....       | 64 |
| 5.2. Modelos de Otimização .....                           | 69 |
| 5.3. Técnica de Otimização.....                            | 74 |
| 5.4. Pré-Seleção de Sistemas de Tratamento de Esgotos..... | 75 |
| 6. Resultados e Discussão .....                            | 77 |

|        |                                                                                             |     |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1.   | Simulação do Lançamento de esgotos brutos .....                                             | 77  |
| 6.1.1. | Perfis de Concentrações para o Cenário 1 .....                                              | 78  |
| 6.1.2. | Perfis de Concentrações para o Cenário 2 .....                                              | 85  |
| 6.2.   | Eficiências Mínimas de Remoção de DBO e Nitrogênio .....                                    | 91  |
| 6.2.1. | Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 1 .....               | 93  |
| 6.2.2. | Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 2 .....               | 96  |
| 6.2.3. | Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 3 .....               | 103 |
| 6.2.4. | Pré-seleção dos Sistemas de Tratamento de Esgotos .....                                     | 129 |
| 7.     | Conclusões e Recomendações .....                                                            | 142 |
| 8.     | Referências Bibliográficas .....                                                            | 145 |
|        | APÊNDICE A – Resultados das simulações dos modelos de otimização .....                      | 154 |
|        | APÊNDICE B – Resultados da pré-seleção dos sistemas de tratamento para águas classe 3 ..... | 164 |

## 1. INTRODUÇÃO

A gestão de bacias hidrográficas tem se tornado cada vez mais complexa ao longo dos anos. O aumento das exigências da sociedade em relação a qualidade da água, múltiplas demandas de uso e proteção dos cursos hídricos, somados à poluição das águas, desencadearam a necessidade de novas estratégias para gestão eficiente de recursos hídricos (ARAS; TOGAN; BERKUN, 2007).

A gestão de recursos hídricos envolve importantes variáveis, tais como a previsão da disponibilidade hídrica, os usos da água, avaliação e previsão de contaminação, conflitos decorrentes da disputa por este recurso, e conservação do ecossistema (WANG; LI; TAN, 2015).

O tratamento dos efluentes antes do lançamento, podendo ser individual ou coletivo, constitui a principal estratégia de controle de poluição dos corpos d'água. O nível de tratamento necessário depende das características do efluente, da classe de enquadramento do curso d'água receptor e de sua capacidade de autodepuração (JORDÃO; PESSOA, 2014).

No processo de seleção do sistema de tratamento de esgotos a atenção é, geralmente, voltada para o controle do aporte de matéria orgânica, por ser a principal responsável pelo consumo do oxigênio dissolvido. No entanto, ressalta-se que outros constituintes também devem ser estudados quando da escolha do sistema de tratamento, tais como os nutrientes nitrogênio e fósforo e os indicadores de poluição fecal.

Na gestão dos recursos hídricos, o custo do tratamento pode ser tão importante quanto as metas de qualidade de água a serem alcançadas. Nos países em desenvolvimento, altos investimentos no controle da poluição podem ser inviáveis (CHO; SUNG; HA, 2004). Uma planta ideal de tratamento deve estar associada à disposição mínima de contaminantes, a custos mínimos de tratamento e a máximos benefícios socioculturais (ZENG et al., 2007). Neste contexto, o estudo da capacidade de autodepuração dos cursos d'água torna-se um relevante aliado do processo decisório associado à seleção do sistema de tratamento de efluentes, uma vez que pode proporcionar significativa redução de custos de tratamento.

A modelagem matemática da qualidade de água é uma ferramenta muito útil à gestão dos recursos hídricos, pois permite simular a capacidade de autodepuração dos cursos d'água, representando a variabilidade espacial e temporal das condições de qualidade da água na região de interesse, considerando fontes difusas e pontuais de poluição (LARENTIS, 2004). Os modelos matemáticos permitem simulação do comportamento das concentrações de constituintes presentes na massa líquida, avaliando sua capacidade de autodepuração por meio da resolução do equacionamento matemático dos processos químicos, físicos e biológicos que ocorrem nos cursos d'água após o lançamento de efluentes.

A adequada avaliação da capacidade de autodepuração possibilita a obtenção de limites de cargas dos constituintes dos efluentes no corpo hídrico receptor, estabelecendo os níveis mínimos de remoção dos diferentes constituintes presentes no esgoto bruto e, conseqüentemente, condicionando a eficiência mínima de remoção do sistema de tratamento de esgotos (LOUZADA; REIS; MENDONÇA, 2013).

Os modelos matemáticos da qualidade da água, ainda que permitam avaliar, a partir da resolução do problema de determinação de eficiências mínimas de tratamento nos pontos de disposição de efluentes, um grande número de soluções viáveis, não fornecem necessariamente uma solução ótima. Neste contexto, a aplicação combinada de técnicas de otimização e modelagem matemática da qualidade da água torna-se uma interessante alternativa metodológica, podendo auxiliar o processo de tomada de decisão e, por conseguinte, o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos.

Embora existam inúmeros modelos matemáticos de qualidade de água que possibilitem a simulação de diversos constituintes associados ao lançamento de efluentes, grande parte dos estudos de qualidade da água aborda fundamentalmente os parâmetros oxigênio dissolvido (OD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO). No entanto, outros constituintes também devem ser analisados nos estudos de qualidade da água. Chernicharo et al. (2001) ressaltam que a descarga de nutrientes na massa d'água é responsável pela diminuição da concentração de oxigênio e pelo aumento da biomassa algal, constituindo relevante aspecto para manutenção da qualidade dos corpos d'água.

O nitrogênio constitui um parâmetro de grande importância quanto ao controle da poluição hídrica, devido aos seguintes aspectos: ser indispensável para o crescimento das algas, podendo, de certa forma, contribuir para o fenômeno de eutrofização de lagos e represas; consumir oxigênio dissolvido no corpo d'água durante o processo de conversão da amônia em nitrito, e do nitrito em nitrato (nitrificação); na forma de amônia livre é tóxica aos peixes; e na forma de nitrato está relacionado a doenças como a metemoglobinemia (VON SPERLING, 2014b).

Ainda que na literatura técnica corrente existam trabalhos relacionados à alocação de cargas de efluentes que consideraram somente o nível de remoção de DBO e as concentrações de OD como garantia de atendimento aos padrões de qualidade da água estabelecidos pelo enquadramento do corpo hídrico receptor, tais como os de Saatidatpour e Afshar (2007), Albertin (2008), Andrade, Mauri e Mendonça (2013), Feizi Ashtiani, Niksokhan e Ardestani (2015), Valory, Reis e Mendonça (2016), Santoro, Reis e Mendonça (2016), Fantin, Reis e Mendonça (2017) e Bringer, Reis e Mendonça (2018), estudos de alocação de cargas de efluentes envolvendo outros parâmetros de qualidade além da DBO e OD, tais como nutrientes e indicadores de contaminação fecal, ainda que necessários, não são usuais.

Dentro deste enfoque, o presente trabalho possui como perspectiva estimar, no âmbito de uma bacia hidrográfica e a partir do emprego combinado de modelagem matemática de qualidade da água e de técnica de otimização, eficiências mínimas de remoção de nitrogênio em sistemas de tratamento de esgoto visando o atendimento aos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela legislação vigente. O modelo de qualidade de água e a técnica de otimização foram aplicados à bacia hidrográfica do rio Pardo, importante tributário do rio Itapemirim, localizado na porção sul do estado do Espírito Santo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

Estimar, no âmbito de uma bacia hidrográfica e a partir de associação de modelo de qualidade de água e técnica de otimização, eficiências mínimas de remoção de DBO e nitrogênio em sistemas de tratamento de esgoto.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para a consecução do objetivo geral da presente pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Simular o comportamento dos parâmetros DBO, OD e nitrogênio ao longo dos cursos d'água da bacia em estudo considerando a disposição final de esgotos brutos.
- Estabelecer, a partir de modelos disponíveis na literatura técnica corrente, modelos de otimização aplicáveis à determinação de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio;
- Estimar, no âmbito de uma bacia hidrográfica, eficiências mínimas de remoção de DBO e nitrogênio e pré-selecionar sistemas de tratamento de esgotos que apresentem níveis de remoção compatíveis com aqueles estimados.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. GERENCIAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS

O gerenciamento dos sistemas de recursos hídricos está relacionado a investimentos de grande porte, de longo prazo, e de cuidadosas práticas de operação e manutenção, aspectos que caracterizam a necessidade de planejamentos estratégicos que atrelem não somente eficiência econômica, mas também, sustentabilidade, flexibilidade e equidade (PORTO; AZEVEDO, 2002).

O planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos envolvem obrigatoriamente aspectos hidrológicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais, aspectos estes que não são constantes temporalmente e são associados às incertezas não facilmente quantificadas. Com o aumento da demanda hídrica e das disputas por este recurso, os sistemas hídricos tornam-se mais complexos.

O agravamento da crise hídrica no âmbito global e o aumento de conflitos em torno da questão hídrica tem feito com que muitos países, em poucos anos, tenham promulgado políticas e leis da água. Os fundamentos para o gerenciamento dos recursos hídricos estão na legislação que contém os parâmetros que irão responder às políticas específicas. Na União Europeia foi implementada, em dezembro de 2000, a *Water Framework Directive 2000/60/EC*, uma importante reforma regulamentar no gerenciamento dos recursos hídricos para os países membros (ARAÚJO et al., 2015).

No Brasil, em 1997, foi promulgada a Lei Federal nº 9433, que estabelece a Política Nacional dos Recursos Hídricos, caracterizando um novo marco organizacional envolvendo gestão compartilhada e descentralizada de recursos hídricos. Os instrumentos de gestão introduzidos pela referida lei foram: os Planos de Bacia Hidrográfica, o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, a outorga, a cobrança pelo uso da água e o Sistema de Informação de Recursos Hídricos.

Veiga e Magrini (2013) ressaltam que, desde a promulgação da Lei nº 9433/1997, progressos incontestáveis foram realizados no gerenciamento de recursos hídricos do país, com base num processo descentralizado e participativo no qual a bacia hidrográfica possui papel central, e na formulação e implantação de políticas públicas. No entanto, no Brasil, país caracterizado por apresentar recursos hídricos

abundantes, mas desigualmente distribuídos, o gerenciamento eficaz dos recursos hídricos ainda é um desafio, havendo necessidade de maiores esforços governamentais para o sucesso do mesmo.

A aplicação adequada dos instrumentos de gestão introduzidos pela Lei das Águas depende de um conjunto de ferramentas técnicas que auxiliem na tomada de decisões. Na elaboração dos Planos de Bacia Hidrográfica, por exemplo, é imprescindível a utilização de modelos de simulação (quantidade e qualidade), assim como a identificação de critérios que hierarquizem as ações a serem realizadas no âmbito do Plano. A utilização de modelos de otimização e de sistemas de apoio à tomada de decisões devem auxiliar a implementação de tais ações ao longo do tempo (MACHADO; PORTO; KAVISKI, 2012).

O número de estações de tratamento de efluentes tem aumentado, principalmente nos países em desenvolvimento. Desta forma, o processo de seleção de estações de tratamento de efluentes ganha relevância, particularmente se considerada a evolução dos padrões de qualidade – padrões cada vez mais restritivos – associados ao gerenciamento dos recursos hídricos. Esta seleção deve levar em consideração múltiplos fatores, como ambientais, técnicos e sociais, e não somente a questão econômica (dos custos de instalação, operação e manutenção) (ZENG et al., 2007).

### 3.2. CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE QUALIDADE DAS ÁGUAS

#### 3.2.1. Parâmetros de Qualidade de Água

A qualidade das águas dos rios pode ser retratada por parâmetros físicos, químicos e biológicos que exprimem suas principais características. Dentre os parâmetros mais utilizados quanto à descrição da qualidade dos corpos d'água são: o oxigênio dissolvido, a matéria orgânica (quantificada usualmente como Demanda Bioquímica de Oxigênio – DBO), o nitrogênio, o fósforo, a temperatura, o pH, micropoluentes inorgânicos e orgânicos e coliformes.

Em função do escopo deste trabalho, neste item serão abordados os parâmetros oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e nitrogênio e suas formas (nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato). Apresentação de conjunto mais abrangente de parâmetros de qualidade de água, incluindo-se origem (natural e

antropogênica), relevância (ambiental e sanitária) e utilização mais usual dos parâmetros, pode ser encontrada nos trabalhos de Jordão e Pessoa (2014), Von Sperling (2014a) e Metcalf & Eddy (2016).

#### 3.2.1.1. Oxigênio Dissolvido

Na avaliação da qualidade de um corpo d'água o parâmetro oxigênio dissolvido (OD) está diretamente relacionado à vida aquática e à sua capacidade em assegurar a assimilação da poluição orgânica por meio de processos naturais, físicos e bioquímicos. Os micro-organismos, especificamente as bactérias que necessitam de OD para seu metabolismo, utilizam a matéria orgânica como alimento, transformando os compostos orgânicos em produtos finais da decomposição. Este processo de decomposição biológica natural nos cursos d'água é denominado autodepuração (JORDÃO; PESSOA, 2014).

No processo de autodepuração dos cursos d'água existe um balanço entre o consumo e a produção de oxigênio, e os principais processos que regem este balanço são a oxidação da matéria orgânica, nitrificação, demanda de oxigênio pelo sedimento (ou demanda bentônica), reaeração atmosférica e fotossíntese (VON SPERLING, 2014b).

#### 3.2.1.2. Demanda Bioquímica de Oxigênio

Os compostos orgânicos são normalmente constituídos pela combinação entre carbono, hidrogênio e oxigênio, agregados ao nitrogênio em alguns casos. A matéria orgânica presente nos esgotos domésticos consiste principalmente de proteínas (40 a 60%), carboidratos (25 a 50%), óleos e gorduras (8 a 12%) e ureia (METCALF & EDDY, 2016).

Em termos ecológicos, a diminuição dos níveis de OD é o impacto mais negativo da poluição por matéria orgânica em um corpo d'água. A parcela de oxigênio requerida para estabilizar a matéria orgânica, por meio de processos bioquímicos, é denominada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que constitui um parâmetro de quantificação indireta de matéria orgânica. Como os esgotos domésticos são potencialmente ricos em DBO, e devido ao fato de o oxigênio dissolvido ser um dos principais indicadores de saúde de um ambiente aquático, a DBO é largamente empregada para quantificar a poluição hídrica (BOWIE et al., 1985).

### 3.2.1.3. Compostos Nitrogenados

O nitrogênio está naturalmente presente nos corpos d'água como produto da degradação de produtos orgânicos e inorgânicos do solo e da água, podendo ser obtido pela excreção da biota, redução do nitrogênio gasoso da água por micro-organismos, ou por trocas gasosas com a atmosfera. O nitrogênio é também constituinte comum dos esgotos domésticos, resultado da hidrólise da ureia e da degradação biológica de aminoácidos e outros compostos nitrogenados (REIS; MENDONÇA, 2009).

As formas predominantes do nitrogênio nos esgotos brutos são o nitrogênio orgânico e o nitrogênio amoniacal ou amônia (termos empregados indistintamente neste trabalho). Estas duas formas do nitrogênio são determinadas em laboratório conjuntamente pelo método Kjeldahl, constituindo assim o Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK). As demais formas de nitrogênio, nitrito e nitrato, estão presentes no esgoto bruto em menores quantidades, com pouca relevância. Nos cursos d'água ou nas estações de tratamento de esgotos a amônia pode passar pelo processo de nitrificação e ser oxidada a nitrito e este, por sua vez, ser oxidado a nitrato. O nitrato, em condições anóxicas, pode passar pelo processo de desnitrificação e ser reduzido a nitrogênio gasoso (VON SPERLING, 2014b).

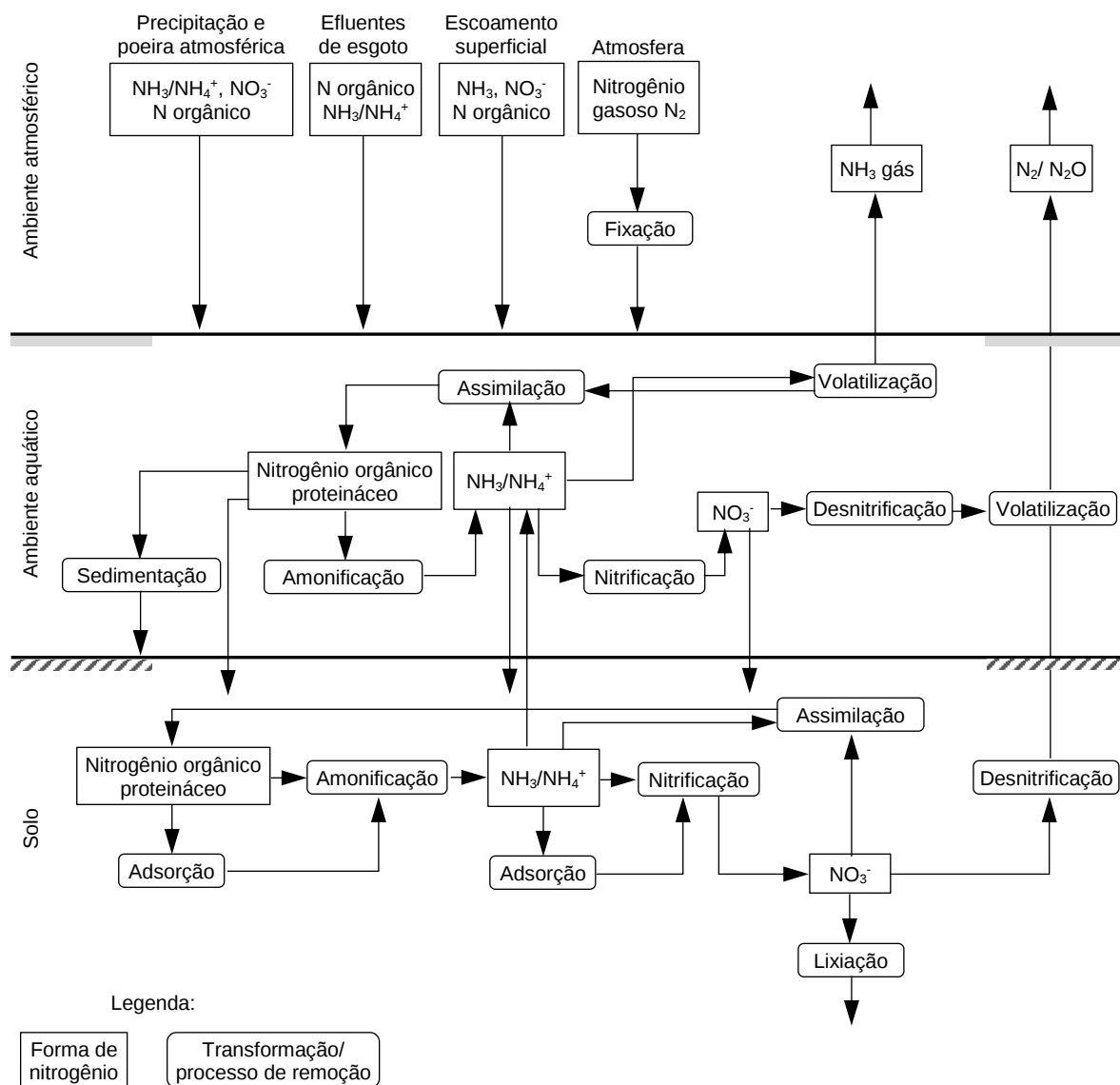
A amônia nas soluções aquosas encontra-se tanto na forma de íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), como na forma não ionizada ( $\text{NH}_3$ ), estas duas formas se alternam de acordo com o pH, salinidade e temperatura da solução, e somadas as concentrações destas duas espécies constituem o nitrogênio amoniacal total ou amônia total. Embora a amônia ionizada possa ter alguma toxicidade, a forma não ionizada é a forma mais tóxica da amônia (ERICKSON, 1985), podendo levar peixes a mortandade mesmo em baixas concentrações.

O nitrogênio na forma de nitrito consiste em um composto relativamente instável e facilmente oxidado a nitrato. Utilizado como indicador de poluição remota, a concentração de 1 mg/L nos esgotos e 0,1 mg/L em águas superficiais ou subterrâneas. O nitrito, mesmo presente em concentrações baixas nos corpos d'água, constitui um importante parâmetro a ser analisado em estudos de poluição hídrica, por

se tratar de um composto tóxico a peixes e espécies aquáticas (METCALF & EDDY, 2016).

O nitrato constitui a forma mais oxidada do nitrogênio nos cursos d'água. Sua concentração deve ser limitada no caso de recarga de aquíferos ou fontes de abastecimento, uma vez que pode ser prejudicial à saúde de crianças por estar associado a doenças como a metemoglobinemia (JORDÃO; PESSOA, 2014; VON SPERLING, 2014b). As diversas formas de nitrogênio na natureza e suas transformações estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Ciclo total do nitrogênio no ambiente.



Fonte: Metcalf & Eddy (2016)

O nitrogênio presente no esgoto bruto constituído por matéria proteinácea e ureia sofre decomposição pelas bactérias e, rapidamente, a forma orgânica passa para a forma de amônia. A quantidade relativa de amônia presente no esgoto bruto pode indicar se a poluição é recente. Na presença de oxigênio, as bactérias podem oxidar a amônia a nitritos e nitratos. Nitratos podem ser utilizados por plantas e animais para formar proteínas, e a morte e decomposição de proteínas animais e vegetal por bactéria gera amônia novamente. Deste modo, como o nitrato pode ser reutilizado para produzir proteínas e ocasionar o crescimento algas e plantas, pode haver a necessidade de remoção ou redução do nitrogênio nos corpos d'água para evitar estes crescimentos (METCALF & EDDY, 2016).

### **3.2.2. Padrões Ambientais de Qualidade**

No Brasil, a Resolução nº 357/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), foi responsável pela classificação dos corpos d'água e definições das diretrizes ambientais para o enquadramento dos mesmos quanto a seus usos preponderantes, fixando padrões de qualidade para os corpos d'água em função das classes de qualidade. Além disso, estabeleceu as condições e padrões de lançamento dos efluentes, com os limites de concentrações permitidos para cada parâmetro de qualidade. No entanto, esta Resolução foi alterada e complementada pela Resolução CONAMA nº 430/2011, que alterou e complementou a CONAMA nº 357/2005 quanto aos padrões de lançamentos de efluentes em corpos d'água. A CONAMA nº 430/2011 definiu condições e padrões de lançamentos de efluentes provenientes de sistemas de esgotos sanitários. Esta Resolução fixou o limite máximo de 120 mg/L para a  $DBO_{5,20}$  para o lançamento de esgotos sanitários, sendo que este valor pode ser maior se o efluente for submetido a um sistema de tratamento com eficiência mínima de 60% na remoção de  $DBO_{5,20}$ , ou mediante a estudo de autodepuração. Quanto às formas de nitrogênio, a Resolução CONAMA nº 430/2011 não estabeleceu qualquer limite para lançamento de efluentes de esgotos sanitários.

Os padrões de qualidade ambiental da DBO, OD e das diversas formas do nitrogênio em corpos d'água doces de acordo com as classes de usos da água foi estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Padrões de qualidade da DBO, OD e das formas de nitrogênio em corpos d'água doce.

| Parâmetro                      | Unidade              | Classes de águas doces |      |      |   |
|--------------------------------|----------------------|------------------------|------|------|---|
|                                |                      | 1                      | 2    | 3    | 4 |
| DBO <sub>5,20</sub>            | mg O <sub>2</sub> /L | 3                      | 5    | 10   | - |
| OD                             | mg O <sub>2</sub> /L | 6                      | 5    | 4    | 2 |
| N amoniacal total (pH≤7,5)     | mg N/L               | 3,7                    | 3,7  | 13,3 | - |
| N amoniacal total (7,5<pH≤8,0) | mg N/L               | 2,0                    | 2,0  | 5,6  | - |
| N amoniacal total (8,0<pH≤8,5) | mg N/L               | 1,0                    | 1,0  | 2,2  | - |
| N amoniacal total (pH>8,5)     | mg N/L               | 0,5                    | 0,5  | 1,0  | - |
| Nitrato                        | mg N/L               | 10,0                   | 10,0 | 10,0 | - |
| Nitrito                        | mg N/L               | 1,0                    | 1,0  | 1,0  | - |

Fonte: BRASIL (2005)

### 3.3. SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

A avaliação adequada dos sistemas de tratamento de efluentes envolve múltiplos objetivos, sendo, o principal, a remoção dos poluentes que possam prejudicar o corpo receptor. A alternativa selecionada deve ser sustentável, ou seja, atender os aspectos ambientais, econômicos e sociais (POPOVIC; KRASLAWSKI; AVRAMENKO, 2013).

É importante ressaltar que a escolha do sistema de tratamento de esgotos deve levar em consideração as características do efluente bruto. Além do aporte de matéria orgânica, principal responsável pelo consumo do oxigênio dissolvido, usualmente retratada pelos parâmetros DBO (demanda bioquímica de oxigênio) e DQO (demanda química de oxigênio), outros constituintes também devem ser considerados quando da escolha do sistema de tratamento de esgotos, tais como, o nitrogênio e suas frações, o fósforo e suas frações, e os indicadores de poluição fecal.

De acordo com os autores Lewis Jr., Wurtsbaugh e Paerl (2011), a partir de estudos em vários corpos d'água, o nitrogênio e o fósforo, quando adicionados simultaneamente em cursos d'água, são responsáveis pelo crescimento algal significativamente superior ao que ocorre quando da adição de cada um destes nutrientes separadamente. Por esta razão, os referidos autores ressaltam a necessidade do controle simultâneo dos aportes destes nutrientes.

Von Sperling (2014a) apresenta uma comparação entre os principais aspectos relevantes na seleção dos sistemas de tratamento de esgotos em regiões desenvolvidas e em desenvolvimento. Os critérios utilizados nesta seleção variam de acordo com as especificidades de cada região. Nas regiões desenvolvidas, os aspectos críticos são eficiência, confiabilidade, disposição do lodo, requisitos de área,

e sustentabilidade ambiental. Enquanto nas regiões em desenvolvimento, os aspectos críticos são os custos de construção e operação, sustentabilidade da estação, e simplicidade operacional.

Dentre os impactos ambientais que devem ser analisados durante a escolha do sistema de tratamento de esgotos, Fernandes et al. (2001) destacam: odores, atração de insetos, ruídos, transporte de lodo, riscos sanitários, contaminação do ar e aquecimento global, contaminação do solo e subsolo, contaminação de águas superficiais ou subterrâneas, valorização ou desvalorização de áreas próximas, e incômodos à população afetada.

Nos países em desenvolvimento, a captação e tratamento de águas para o abastecimento da população são as questões mais importantes e responsáveis por consumir a maior parte dos investimentos destinados ao gerenciamento dos recursos hídricos. Cerca de menos de 20% do total de efluentes gerados são destinados ao tratamento antes de serem lançados nos corpos d'água (PERRIN et al., 2014).

De acordo com o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2016, no Brasil, o índice de atendimento de rede de abastecimento de água foi de 83,3%, enquanto o de coleta de esgotos foi de 51,9%, e desta parcela de esgotos coletados, apenas 74,9% passaram por tratamento, evidenciando que a maior parte dos esgotos gerados são dispostos no ambiente sem qualquer tipo de tratamento.

No levantamento realizado por BRASIL (2017) foram identificadas 2.768 estações de tratamento de esgotos (ETEs) em operação em 1.592 cidades do Brasil. Estima-se que a população atendida por estas ETEs seja igual a 71,7 milhões de habitantes. Neste estudo, obtiveram-se informações quanto à eficiência de remoção de DBO de 96% das ETEs, nem todas compatíveis com os valores recomendados pela literatura para os referidos sistemas de tratamento, a Tabela 2 elenca estes sistemas de tratamento agrupados por faixas de remoção de DBO.

Tabela 2 – Panorama dos sistemas de tratamento de esgotos em operação no Brasil. (Continua)

| Faixa de remoção de DBO | Principais Processos de Tratamento                                             | População equivalente (em mil hab.) | Eficiência média de remoção de DBO (%) | Número de unidades |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| Até 60%                 | Primário                                                                       | 7.947,6                             | 35                                     | 21                 |
|                         | Fossa Filtro/Fossa Séptica + Filtro Aeróbio/Tanque Imhoff + Filtro Biológico   | 340,1                               | 49                                     | 215                |
|                         | Fossa Séptica + Tanque Imhoff                                                  | 49,2                                | 51                                     | 23                 |
|                         | <b>Total</b>                                                                   |                                     |                                        | <b>259</b>         |
| 60% a 80%               | Fossa Filtro/(Fossa Séptica + Filtro Biológico) + Disposição no Solo/Sumidouro | 6,4                                 | 66                                     | 10                 |
|                         | Reator Anaeróbio + Lodos Ativados                                              | 26,3                                | 80                                     | 2                  |
|                         | Lagoa Anaeróbia                                                                | 812,8                               | 68                                     | 68                 |
|                         | Primário com físico químico (Filtro aeróbio/Decantação/CEPT/Flotação)          | 1.902,5                             | 68                                     | 13                 |
|                         | Reator anaeróbio                                                               | 3.876,5                             | 69                                     | 328                |
|                         | Reator anaeróbio + Decantador                                                  | 226,7                               | 72                                     | 16                 |
|                         | Lodos ativados meio fixo (Filtro biológico)                                    | 323,1                               | 73                                     | 22                 |
|                         | Reator anaeróbio + Filtro biológico                                            | 1.300,0                             | 75                                     | 177                |
|                         | Lagoa facultativa                                                              | 1.421,0                             | 76                                     | 203                |
|                         | Lagoa anaeróbio + Lagoa facultativa                                            | 5.533,8                             | 77                                     | 364                |
|                         | Reator anaeróbio + Disposição no solo                                          | 183,3                               | 77                                     | 16                 |
|                         | Reator anaeróbio + filtro aeróbio                                              | 635,8                               | 77                                     | 64                 |
|                         | Reator aeróbio + Lagoa anaeróbia/facultativa/de maturação                      | 3.023,5                             | 78                                     | 145                |
|                         | <b>Total</b>                                                                   |                                     |                                        | <b>1.428</b>       |
| > 80%                   | Lagoa aerada                                                                   | 743,6                               | 80                                     | 42                 |
|                         | Reator anaeróbio + Filtro aeróbio + Decantador                                 | 4.436,9                             | 80                                     | 121                |
|                         | Reator anaeróbio + Filtro biológico + Disposição no solo                       | 70,6                                | 80                                     | 15                 |
|                         | Reator anaeróbio + Filtro biológico + Filtro aeróbio + Decantador              | 76,5                                | 80                                     | 10                 |
|                         | Lodos ativados de aeração prolongada                                           | 4.479,0                             | 88                                     | 91                 |
|                         | Lagoa anaeróbia + Lagoa Facultativa + Lagoa de Maturação                       | 1.930,4                             | 81                                     | 134                |
|                         | Lagoa facultativa + Lagoa de maturação                                         | 1.212,5                             | 81                                     | 119                |
|                         | Lagoa aerada + Lagoa de decantação/facultativa/maturação                       | 2.349,0                             | 82                                     | 64                 |
|                         | Reator anaeróbio + Lagoa aerada                                                | 611,2                               | 83                                     | 12                 |
|                         | Lodos ativados (convencional/ <i>deep shaft</i> )                              | 16.538,9                            | 84                                     | 110                |
|                         | Reator anaeróbio + Lagoa aerada + Lagoa facultativa/maturação                  | 322,9                               | 85                                     | 7                  |
|                         | Reator anaeróbio + Lodos ativados                                              | 3.964,8                             | 86                                     | 90                 |
|                         | Lagoa aerada + Lagoa facultativa + Lagoa de Maturação                          | 658,2                               | 87                                     | 14                 |
|                         | Reator anaeróbio + Lodos ativados de aeração prolongada                        | 53,4                                | 88                                     | 4                  |
|                         | Reator anaeróbio + Lagoa facultativa + Disposição no solo                      | 226,7                               | 89                                     | 6                  |
|                         | <b>Total</b>                                                                   |                                     |                                        | <b>839</b>         |

Tabela 2 – Panorama dos sistemas de tratamento de esgotos em operação no Brasil. (Conclusão)

| Faixa de remoção de DBO              | Principais Processos de Tratamento                                         | População equivalente (em mil hab.) | Eficiência média de remoção de DBO (%) | Número de unidades |
|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| > 80%<br>(com remoção de nutrientes) | Reator anaeróbio + Filtro biológico + Filtro aeróbio + Decantador          | 0,6                                 | 87                                     | 1                  |
|                                      | Lodos ativados em batelada (Convencional/Unitank) – Remoção de N           | 1.431,8                             | 88                                     | 80                 |
|                                      | Lodos ativados – Remoção de N (MBBR/IFAS)                                  | 365,4                               | 88                                     | 7                  |
|                                      | Reator anaeróbio + Físico Químico (Decantação/Flotação) – Remoção de P     | 2.401,4                             | 88                                     | 33                 |
|                                      | Lodos ativados com remoção físico química de nutrientes – Remoção de N e P | 95,3                                | 91                                     | 5                  |
|                                      | Lodos ativados com remoção biológica de nutrientes – Remoção de N          | 135,5                               | 93                                     | 3                  |
|                                      | Lodos ativados com remoção biológica de nutrientes – Remoção de N e P      | 46,6                                | 95                                     | 2                  |
| <b>Total</b>                         |                                                                            |                                     |                                        | <b>131</b>         |

Fonte: BRASIL (2017)

No Brasil, a concepção dos sistemas de tratamento de esgotos deveria ser realizada em função das exigências da Resolução CONAMA nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e as diretrizes ambientais para seu enquadramento, e da Resolução CONAMA nº 430/2011, que dispõe sobre as condições e padrões de lançamentos de efluentes.

Considerando que no âmbito de uma bacia hidrográfica, com múltiplos lançamentos, cargas de poluentes distintas e corpos d'água com diferentes características de autodepuração, o processo de seleção de um sistema de tratamento de esgotos é complexo, a modelagem matemática da qualidade da água combinada com uma técnica de otimização pode auxiliar significativamente o processo decisório, resultando em alternativas viáveis economicamente. Os trabalhos de Burn e Yulianti (2001), Cho, Sung e Ha (2004), Albertin (2008), Andrade, Mauri e Mendonça (2013), Louzada, Reis e Mendonça (2013), Reis, Valory e Mendonça (2016), Santoro, Reis e Mendonça (2016), Fantin, Reis e Mendonça (2017) e Bringer, Reis e Mendonça (2018) abordaram metodologias para o processo de tomada de decisão do sistema de tratamento de esgotos considerando a associação entre a modelagem matemática da capacidade de autodepuração dos corpos d'água e o emprego de técnicas de otimização. Estes aspectos serão sumariamente discutidos nas seções subsequentes.

### 3.4. MODELOS DE SIMULAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

O estudo da autodepuração em termos quantitativos pode ser um grande aliado na gestão de recursos hídricos, visto que pode subsidiar a tomada de decisão quanto a utilização da capacidade de assimilação de um rio, e/ou impedir o lançamento de efluentes acima do que o corpo d'água possa suportar (VON SPERLING, 2014b). Os modelos matemáticos de qualidade de água podem contribuir neste processo, pois permitem a simulação dos processos de autodepuração no corpo d'água e, conseqüentemente, possibilitam a previsão de impactos devido ao lançamento de efluentes e a avaliação de cenários de intervenções e medidas de controle ambiental.

A modelagem de qualidade da água é um importante instrumento de análise dos efeitos das ações naturais e humanas em variadas seções dos corpos d'água de uma determinada bacia, considerando cenários distintos (LARENTIS; COLLISCHONN; TUCCI, 2008). A modelagem matemática de qualidade da água pode ser utilizada para projetos de estação de tratamento de esgotos, para determinação da influência de obras hidráulicas na qualidade do meio aquático, para a avaliação das consequências de derrames acidentais de resíduos tóxicos, para análise dos efeitos da variação de temperatura causada pelo processo de geração de energia termoeletrônica, para o prognóstico de possíveis alterações aquáticas geradas pelo uso do solo em bacias hidrográficas, entre outras situações passíveis de simulação (EIGER, 2003).

O primeiro modelo de simulação da qualidade da água foi desenvolvido por Streeter e Phelps (1925), a partir de estudos realizados no rio Ohio, nos Estados Unidos, visando auxiliar o controle da poluição das águas de abastecimento da população. Este modelo, constituído por equações diferenciais ordinárias de primeira ordem que descrevem o processo de consumo de oxigênio pela oxidação da matéria orgânica a partir do lançamento de cargas orgânicas nos corpos d'água e a produção de oxigênio pela reaeração atmosférica, representa o balanço de oxigênio dissolvido e demanda bioquímica de oxigênio. O Quadro 1 apresenta a evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água estabelecidos a partir do modelo de Streeter-Phelps desde 1925 a 2007, conforme síntese apresentada por Bringer (2017). A referida autora indica que, na década de 70, foram implementados os primeiros modelos que simularam o comportamento dos nutrientes.

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Continua)

| Ano          | Modelo            | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|--------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1925         | Streeter & Phelps | Modelo que representa o balanço entre OD e DBO definidos na forma de equações diferenciais ordinárias de primeira ordem.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1963         | Camp              | Modelo de simulação de OD/DBO que modifica as equações originais adicionando os termos referentes à sedimentação e/ou ressuspensão, DBO do escoamento superficial e fotossíntese.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1964         | Dobbins           | Modelo de simulação no qual OD/DBO apresenta-se na forma de equações diferenciais de segunda ordem, considerando-se os efeitos da demanda bentônica, fotossíntese e respiração no acréscimo da taxa de OD.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1967         | O'Connor          | Modelo de simulação OD/DBO que utiliza equação onde os termos referentes a DBO carbonácea e a DBO nitrificante estão separados.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1970         | Dosag I           | Modelo proposto pelo <i>Texas Water Development Board</i> (TWDB), que mostra, de forma integrada, que a equação de Streeter Phelps é aplicável à sistemas unidimensionais sem considerar os efeitos da dispersão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 1970         | Dosag III         | Modelo criado pela <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA) que registra maior habilidade nos procedimentos de simulação e maior número de parâmetros simulados no Dosag I.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1970         | QUAL-I            | O modelo QUAL I, desenvolvido pelo <i>F. D. Masch and Associates</i> e TWDB, usa equações unidimensionais de dispersão-advecção pela solução das diferenças finitas. Utiliza um elemento computacional padrão de um comprimento estabelecido através do sistema. Elementos computacionais com propriedades hidrológicas e físicas similares são agrupados no mesmo trecho.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1970         | WASP              | O modelo WASP ( <i>Water Analysis Simulation Program</i> ), desenvolvido pela EPA, permite simular os processos hidrodinâmicos e de qualidade de água em 1, 2 ou 3 dimensões para uma variedade de poluentes. Os processos de advecção, dispersão, fluxos de massa pontual e difusa, além de fluxos na fronteira de fundo são representados no modelo. O WASP também pode ser implementado com modelos de transporte hidrodinâmico e de sedimentos, os quais fornecem perfis de velocidade, temperatura, salinidade e fluxos de sedimentos. O WASP7, última versão lançada em 2013, é um aprimoramento do WASP original e contém a inclusão do modelo de diagênese sedimentar associado a modelo secundário avançado de eutrofização, que predita demanda de oxigênio pelo sedimento e fluxos de nutrientes a partir do sedimento de fundo. |
| Década de 70 | MIKE 11           | O modelo Mike 11 foi desenvolvido pelo DHI ( <i>Danish Hydraulic Institute</i> ) para simulação de escoamentos, qualidade da água e transporte de sedimentos em estuários, rios, sistemas de irrigação, canais e outros corpos d'água. O módulo hidrodinâmico (HD) é o núcleo do sistema de modelagem e constitui a base para a maioria dos módulos, incluindo a previsão de cheias, advecção-dispersão, qualidade da água e módulos de transporte de sedimentos não-coesivos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Década de 70 | ISIS              | ISIS é um simulador hidrodinâmico completo, desenvolvido no Reino Unido por <i>Hydraulics Research Wallingford</i> (HR-Wallingford) e <i>Sir William Halcrow and Partners</i> , para modelagem de fluxos e níveis água em canais abertos e estuários. O módulo de qualidade da água do programa ISIS ( <i>ISIS Quality Water</i> ) é capaz de modelar uma gama de variáveis e processos de qualidade da água simultaneamente, que incluem: poluentes conservativos e não conservativos; coliformes, sal, temperatura da água, sedimento; balanço de oxigênio (OD e DBO); interações de oxigênio (água/sedimento); fitoplâncton; macrófitas; algas bentônicas, pH. A última versão lançada, ISIS v. 3.7, fornece uma série de novas funcionalidades e melhorias.                                                                             |

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Continuação)

| Ano         | Modelo       | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1972        | QUAL-II      | O modelo Qual II é uma modificação do QUAL I desenvolvida pelo <i>Water Resources Engineers, Inc.</i> (WRE) sob contrato com a EPA. O modelo é aplicável para rios dendríticos e bem misturados. Pode simular variações temporais e espaciais de até treze parâmetros de qualidade de água em qualquer combinação desejada pelo usuário. O modelo assume que os principais mecanismos de transporte, advecção e dispersão, são significativos somente ao longo da direção principal do fluxo (eixo longitudinal do rio ou canal). Pode ser operado em regime permanente ou dinâmico.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1974        | SIMOX        | O modelo Simox ( <i>Dissolved Oxygen Simulation Model</i> ), desenvolvido pelo CEPIS ( <i>Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente</i> ) para simulação de oxigênio dissolvido, inclui OD/DBO, bactéria (Lei de Chick) e uma substância conservativa. A versão mais recente também simula o decaimento de primeira ordem de nitrogênio e fósforo para representar sedimentação, absorção e transformação.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| 1974 - 1978 | WQRRS        | O modelo WQRRS ( <i>Water Quality for River-Reservoir Systems</i> ), desenvolvido pela CEIWR-HEC, é baseado nos modelos Qual-II e CE-QUAL-W2. Fornece abrangente simulação da qualidade da água para rios e reservatórios. O modelo consiste em três módulos distintos, mas integrável: módulo reservatório, módulo hidráulico e módulo de qualidade. Os três programas podem ser integrados para uma completa análise de qualidade da água da bacia hidrográfica. No módulo de qualidade, as taxas de transporte de parâmetros de qualidade podem ser representadas para escoamentos aeróbios, e podem ser simuladas picos de cargas poluentes para escoamento estável ou instável. Simula OD, DBO, nutrientes, biomassa algal, temperatura, bactérias indicadoras, constituintes conservativos e não conservativos, produtividade de algas e nutrientes no reservatório, bem como interações de fluxo e temperatura no reservatório. |
| 1975        | CE-QUAL-W2   | O CE-QUAL-W2, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa de Qualidade da Água do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual de Portland, Estados Unidos, é um modelo bidimensional (longitudinal e vertical), hidrodinâmico e de qualidade da água para rios, estuários, lagos, reservatórios e sistemas de bacias hidrográficas. Inclui temperatura, salinidade, ciclo de OD/carbono, ciclos de nitrogênio, fósforo, fitoplanktons e bactérias. Vários níveis de complexidade são possíveis devido à organização modular das simulações de qualidade d'água. A versão atual do modelo é a versão 3.72 (lançada em 2015) com uma versão 4.0 alfa lançada.                                                                                                                                                                                                                                                          |
| 1976        | QUALII/SEMOG | O modelo QUAL-II / SEMOG é uma versão do QUAL-II desenvolvida pela WRE para o Conselho de Governos do Sudeste de Michigan ( <i>Southeast Michigan Council of Governments - SEMOG</i> ). Inclui modificações e aperfeiçoamentos feitos no modelo QUAL II desde o seu desenvolvimento original em 1972.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Continuação)

| Ano              | Modelo       | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Final década 70  | HSPF         | O modelo HSPF ( <i>Hydrologic Simulation Program – Fortran</i> ) é um programa desenvolvido pela EPA para simulação hidrológica de bacia hidrográfica e de qualidade da água para poluentes orgânicos convencionais e tóxicos. O modelo combina as cargas de escoamento da bacia e cargas, transporte e transformação, nos rios, de OD/DBO, nutrientes, algas e pesticidas/tóxicos; e fornece histórico de tempo da taxa de vazão de escoamento, carga de sedimentos, concentrações de nutrientes e pesticidas, juntamente com histórico de tempo da quantidade e qualidade da água em qualquer ponto em uma bacia hidrográfica. O HSPF requer uma extensa gama de dados de entrada e coeficientes para parametrizar cada processo de qualidade e quantidade de água. As simulações detalhadas de ciclo de nutriente incluem nitrificação e desnitrificação, absorção de amônia e de ortofósforo, <i>uptake</i> (coletor ascendente de gás), vaporização e imobilização. As transformações de tóxicos no rio abrangem solubilidade, volatilização, fotólises, oxidação e biodegradação. Somente a variação em uma dimensão é considerada no corpo de água. O HSPF inclui três compartimentos de algas e considera a respiração, crescimento, assentamento e morte usando a cinética Michaelis-Menten. |
| Início década 80 | TOMCAT       | O modelo TOMCAT ( <i>Temporal Overall Model for CATchments</i> ) foi desenvolvido pela companhia concessionária de água do Reino Unido, <i>Thames Water</i> . A conceituação do TOMCAT é essencialmente idêntica à do modelo SIMCAT, isto é, modelo estocástico unidimensional estacionário, com abordagem da técnica de Monte Carlo, permitindo, contudo, correlações temporais mais complexas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Década de 80     | SIMCAT       | SIMCAT ( <i>Simulated Catchments</i> ), desenvolvido pela Agência de Meio Ambiente do Reino Unido, é um modelo estocástico determinístico, unidimensional, em regime permanente, que faz uso de técnicas de análise de Monte Carlo para simular dados de descargas pontuais e difusas ao longo de uma rede de cursos de água. O oxigênio dissolvido é representado por uma relação envolvendo temperatura, reaeração e decaimento da DBO.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 1982             | CE-QUAL-RIV1 | O modelo CE-QUAL-RIV1 foi originalmente desenvolvido pela Universidade Estadual de Ohio em 1982 para a EPA. A versão de 1990 reflete as modificações feitas após 1982 pela Universidade Estadual de Ohio e pelo Laboratório Ambiental da Estação Experimental de Corpos D'água ( <i>Waterways Experiment Station - WES</i> ) do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos ( <i>United States Army Corps of Engineers - USACE</i> ). O modelo é hidrodinâmico e de qualidade da água unidimensional (longitudinal) e permite a simulação de sistemas fluviais ramificados com várias estruturas de controle hidráulico, tais como, eclusa de navegação, represa, regulação de barragem. Constituintes de qualidade da água incluem temperatura, OD, DBO carbonácea, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrato, fósforo ortofosfato, bactérias coliformes, ferro e manganês dissolvidos. Os efeitos de algas e macrófitas também estão incluídos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| 1985             | Qual2E       | O QUAL2E, distribuído pela EPA, é um modelo unidimensional de estado permanente, usado frequentemente para simular os efeitos de descargas de poluição de fontes pontuais e não-pontuais na qualidade da água de rios. Ciclos detalhados de OD/DBO e de nutriente são simulados, considerando os efeitos de respiração de algas, reaeração e demanda de oxigênio de sedimentos. Os metais podem ser simulados arbitrariamente como constituintes conservativos ou não. Sua hidrodinâmica baseia-se na equação unidimensional de advecção-dispersão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Continuação)

| Ano              | Modelo     | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1985             | MIKE BASIN | O modelo MIKE BASIN, desenvolvido pelo DHI, associa técnicas de simulação e modelagem em rede de fluxo e é estruturado em uma rede de arcos e nós digitalizada no ambiente do ArcView do Sistema de Informações Geográficas. A simulação das variáveis de qualidade da água é feita através de transporte no estado estacionário nos arcos do sistema. Dentre outras características do modelo, destacam-se seu rápido tempo de processamento e sua flexibilidade e facilidade na representação de sistemas hídricos. Para a solução da qualidade de água é considerado somente o transporte advectivo e o decaimento das concentrações pode ser modelado.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| 1987             | SisBaHiA   | O SisBaHiA (Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental) foi desenvolvido pela Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trata-se de um sistema de modelos computacionais para previsão do escoamento ou movimento das águas e, também, para a previsão da qualidade das águas ou transporte de grandezas escalares qualificadoras em corpos de água naturais. Em sua versão 3.6 e superiores, o SisBaHiA oferece recursos para modelamentos de corpos de água com superfície livre sem estratificação vertical significativa. Nesta classe de corpos de água pode-se encontrar rios, canais, lagos, lagoas, reservatórios, estuários, baías e águas costeiras. Os Modelos de Qualidade de Água e Eutrofização (MQA) do SisBaHiA correspondem conjunto de modelos de transporte Euleriano, podendo ser aplicados para escoamentos 2DH, ou em camadas selecionadas de escoamentos 3D. Os MQA permitem simulação acoplada de até 11 parâmetros de qualidade da água e indicadores de eutrofização: sal, temperatura, OD-DBO, nutrientes compostos de nitrogênio e de fósforo e biomassa |
| 1989             | DUFLOW     | O modelo DUFLOW, desenvolvido pelo <i>International Institute for Hydraulic and Environmental Engineering (IHE)</i> (atualmente denominado <i>UNESCO-IHE Institute for Water Education</i> ), <i>Rijkswaterstaat (Public Works Department)</i> , <i>Delft University of Technology</i> , <i>Agricultural University of Wageningen</i> , permite simulação de escoamento não permanente unidimensional e qualidade da água em sistemas de canais abertos, podendo ser inclusive controle de estruturas como diques, bombas, bueiros e sifões. O modelo possui diversas aplicações, tais como a propagação de ondas em estuários, ondas de cheias em rios e operação de sistemas de irrigação e drenagem e pode incluir parâmetros de qualidade da água. A parte de modelagem da qualidade da água foi incluído no DUFLOW em 1992, em sua versão 2.0.                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| Início década 90 | SWAT       | <i>Soil Water and Analysis Tools (SWAT)</i> , modelo físico desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos ( <i>United States Department of Agriculture - USDA</i> ), teve sua origem no modelo <i>SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins)</i> - modificação do modelo hidrológico <i>CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems)</i> . O SWAT pode ser usado na modelagem de bacias hidrográficas que não possuem dados de monitoramento disponíveis. O modelo opera em escala de tempo contínua e permite prognosticar o impacto de longo prazo das práticas de gestão de solo nos recursos hídricos e a produção de sedimentos e aplicação de produtos químicos nas plantações dentro dos grandes complexos de bacias hidrográficas. A última versão do modelo é a versão SWAT2012.                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 1991 - 1994      | AQUASIM    | O programa AQUASIM, desenvolvido pelo <i>EAWAG (Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology)</i> , foi projetado para a identificação e simulação de sistemas aquáticos técnicos e naturais. O modelo realiza simulações, análises de sensibilidade, estimativa de parâmetros (usando dados medidos). O usuário pode especificar qualquer conjunto de variáveis de estado e processos de transformação do modelo.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Continuação)

| Ano         | Modelo                                       | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|-------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1993        | DELFT 3D                                     | O modelo Delft 3D, desenvolvido pela <i>WL Delft Hydraulics</i> , permite uma abordagem multidisciplinar e cálculos em 3D para áreas costeiras, rios e estuários e pode realizar simulações de fluxos, transporte de sedimentos, ondas, qualidade da água, desenvolvimentos morfológicos e ecologia. O modelo é composto por um conjunto de módulos, agrupados em torno de uma interface mútua. Cada módulo pode ser executado de forma independente ou em combinação com um ou mais módulos. Em novembro/2015 será lançada uma nova marca do modelo, <i>Delft3D Flexible Mesh Suite 2016</i> , que incorpora inovações tecnológicas para simulações sobre malhas não estruturadas em 1D-2D-3D.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| 1995        | HEC-HAS                                      | O modelo HEC-HAS ( <i>Hydrological Engineering Center-River Analysis System</i> ), desenvolvido pelo HEC do USACE., possibilita a simulação unidimensional de escoamento em canais abertos, sob o regime permanente e não-permanente e, também, na condição de fundo móvel (transporte de sedimentos). A versão atual, HEC-HAS 5.0, lançada em 2015, permite a modelagem bidimensional do escoamento.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| 1995 - 2000 | SOBEK                                        | SOBEK-RE, versão original do SOBEK, desenvolvido pela <i>WL   Delft Hydraulics</i> em parceria com o Instituto de Gestão das Águas Interiores e Tratamento de Águas Residuais ( <i>Inland Water Management and Waste Water Treatment – RIZA</i> ) do governo da Holanda, constitui sistema de modelagem unidimensional projetado para sistemas fluviais simples e complexos e estuários. Pode ser usado para simular escoamento instável e constante, transporte de sedimentos, morfologia, intrusão salina e qualidade da água, com aplicações na resolução de problemas em matéria de navegação, previsão de inundações, estudos da poluição da água, estuários com água doce e salgada, estudos de mineração de areia, sedimento e morfologia. SOBEK 2 apresenta três linhas básicas de produtos, SOBEK-River, SOBEK-Rural e SOBEK-Urban, sendo cada uma composta por diferentes módulos para simular aspectos específicos do sistema de água, podendo funcionar separadamente ou em combinação. O SOBEK 3 é o sucessor agregado do SOBEK-River, DUFLOW e SOBEK-RE. |
| 1996        | BASINS 1<br>BASINS 2<br>BASINS 3<br>BASINS 4 | Desenvolvido pela USEPA ( <i>United States Environmental Protection Agency</i> ), BASINS ( <i>Better Assessment Science Integrating point &amp; Non-point Sources</i> ) são sistemas de análise ambiental polivalentes que integram a poluição de fontes pontuais e não pontuais. Foram desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA para auxiliar na gestão de bacias hidrográficas e desenvolvimento de TMDL, integrando dados ambientais, ferramentas de análise e modelos de qualidade de água e bacias hidrográficas.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| 1997        | PC-QUASAR                                    | O modelo PC-QUASAR, desenvolvido pelo CEH ( <i>Center for Ecology &amp; Hydrology</i> ), permite fácil comparação entre o estado existente do rio e que existiria depois de uma mudança planejada ou um evento não planejado que tivesse ocorrido na rede fluvial. O modelo descreve as mudanças na qualidade da água ao longo do tempo e permite monitorar episódios de poluição à jusante. O modelo apresenta dois modos de execução: modo de planejamento e modo de previsão dinâmica. O modo de planejamento pode produzir dados de frequência e distribuição cumulativas de vazão e qualidade em locais de interesse. O modo dinâmico (previsão) fornece perfis de vazão e qualidade da água ao longo do sistema fluvial ou contra o tempo em qualquer alcance de interesse. O modelo permite simular vazão do rio, pH, nitrato, temperatura, <i>Escherichia Coli</i> , DBO, OD, poluente conservativo ou traçador.                                                                                                                                               |
| 1997        | EFDC                                         | Desenvolvido pelo Instituto Virgínia de Ciência Marinha Virgínia ( <i>Institute of Marine Science</i> ), a USEPA listou o modelo EFDC como uma ferramenta para a gestão da qualidade da água em 1997. O modelo EFDC é adequado para a simulação da qualidade da água em rios, lagos, reservatórios, estuários e zonas húmidas, incluindo modelos uni, bi ou tridimensionais.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |

Quadro 1 – Evolução histórica dos modelos matemáticos de qualidade de água.

(Conclusão)

| Ano                   | Modelo    | Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|-----------------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2002                  | AQUATOX   | AQUATOX é um modelo de simulação para sistemas aquáticos, desenvolvido pela EPA, que prevê o destino de nutrientes, sedimentos e produtos químicos orgânicos em corpos d'água, bem como os seus efeitos diretos e indiretos em organismos residentes. Simula a transferência de biomassa e produtos químicos a partir de um compartimento do ecossistema para outro. O modelo simula múltiplos estressores ambientais (incluindo nutrientes, cargas orgânicas, sedimentos, substâncias químicas tóxicas e temperatura) e seus efeitos sobre as comunidades de algas, macrófitas, invertebrados e peixes. AQUATOX pode ajudar a identificar e compreender as relações de causa e efeito entre a qualidade química da água, do ambiente físico e a vida aquática. Pode representar uma variedade de ecossistemas aquáticos, incluindo lagos verticalmente estratificados, reservatórios e lagoas, rios e córregos e estuários. A versão 3.1 do modelo contém várias melhorias em relação às versões anteriores que melhoram a interface e utilidade do modelo.                                                                    |
| 2003<br>(versão beta) | QUAL 2K   | O modelo QUAL2K é uma versão modernizada do modelo QUAL2E e apresenta na sua estrutura os seguintes novos elementos: modelo segmentado, especificação da DBO carbonácea, ambientes anóxicos, interações água-sedimento, algas inferiores, redução da luz, pH (potencial hidrogeniônico), patógenos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 2005                  | EDP-RIV1  | O modelo EDP-RIV1, desenvolvido pela Divisão de Proteção Ambiental do Departamento de Recursos Naturais da Georgia ( <i>Georgia Environmental Protection Division of the Georgia Department of Natural Resources</i> ) e pela EPA, baseia-se no modelo CE-QUALRIV1. Consiste num sistema de programas para executar simulações unidimensionais hidrodinâmicas e de qualidade da água, com a finalidade de analisar as condições existentes e realizar alocações de carga de resíduos. O modelo pode representar com sucesso sistemas de rios dendríticos ou ramificados e pode lidar com influências de marés de jusante, efeitos à jusante de lagos, captações de água dinâmicas, operações de vertedouro de barragem e eventos de tempestade. O modelo permite simular interações de 16 variáveis de estado, incluindo temperatura da água, espécies de nitrogênio (ou DBO nitrogenada), espécies de fósforo, OD, demanda de oxigênio carbonácea, algas, ferro, manganês, bactérias coliformes e dois componentes arbitrários. Além disso, o modelo pode simular os impactos de macrófitas sobre OD e ciclagem de nutrientes. |
| 2007                  | QUAL-UFMG | O modelo QUAL-UFMG, desenvolvido por Marcos Von Sperling da Universidade Federal de Minas Gerais para o ambiente computacional da planilha Microsoft Excel, possibilita a modelagem de rios através da utilização de um modelo baseado no QUAL2EU, desenvolvido pela EPA. O QUAL-UFMG torna possível uma simulação rápida e simples das variáveis DBO, OD, nitrogênio total e suas frações, fósforo total e suas frações e coliformes termotolerantes.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

Fonte: Bringer (2017)

Em 1985, a partir de uma parceria entre a Universidade de Tufts e a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA), foi desenvolvido o modelo QUAL-2E. Este modelo é mundialmente conhecido e, ainda hoje, utilizado devido à sua versatilidade e facilidade. O modelo QUAL-2E simula o OD, a DBO e nutrientes, e considera os seguintes fenômenos: respiração das algas e plantas aquáticas, reaeração, e demanda de oxigênio do sedimento (demanda bentônica). A

hidrodinâmica do QUAL-2E é fundamentada na equação unidimensional de advecção-dispersão.

O QUAL-2K, desenvolvido em 2003, também pela Universidade de Tufts, é uma versão aperfeiçoada do QUAL-2E. As principais inovações do QUAL-2K são: implementação em ambiente Microsoft Windows, tendo como interface gráfica planilhas do Excel; os tamanhos dos segmentos de cada trecho podem variar; inclui trechos anóxicos, reduzindo a zero as reações de oxidação a baixos níveis de oxigênio, além de modelar a desnitrificação como uma reação de primeira ordem em baixas taxas de concentração de oxigênio; simulação dos agrupamentos de algas; cálculo da extinção da luz devido a algas, detritos e sólidos inorgânicos; simulação do pH em função da alcalinidade e do carbono inorgânico; simulação da remoção dos patógenos em função da temperatura, da luz e da sedimentação (CHAPRA et al., 2008).

Von Sperling (2014b) apresentou o modelo QUAL-UFMG, desenvolvido a partir do QUAL-2E. O QUAL-UFMG foi implementado no ambiente da planilha Excel e possibilita a modelagem dos seguintes constituintes: demanda bioquímica de oxigênio; oxigênio dissolvido; nitrogênio total e suas frações; fósforo total e suas frações; e coliformes termotolerantes. Apesar de possuir estrutura muito próxima a do QUAL-2E, o QUAL-UFMG exhibe as seguintes simplificações: não inclui as algas e todas as interações com os demais constituintes; não considera a dispersão longitudinal; e utiliza o método Euleriano de integração.

Como exemplos de trabalhos que empregaram a modelos de qualidade da água para a simulação do comportamento do corpo hídrico receptor, após o lançamento de efluentes, podem ser citados Park e Lee (2002), Albertin (2004), Albertin, Mauad e Daniel (2006), Paliwal, Sharma e Kansal (2007), Knapik et al. (2011), Salla et al. (2013), Teodoro et al. (2013), Louzada, Reis e Mendonça (2013), Calmon et al. (2016), Zandonadi, Mendonça e Reis (2016), Fantin, Reis e Mendonça (2017), Sharma, Kansal e Pelletier (2017) e Bringer, Reis e Mendonça (2018).

### 3.4.1. Formulação Matemática do Modelo

A formulação matemática da modelagem da qualidade da água de rios apresenta-se detalhadamente discutida em textos como Chapra (1997) e Von Sperling (2014b), e encontra-se sumarizada nos parágrafos subsequentes. A concentração dos parâmetros de qualidade de água em cada segmento é obtida a partir da soma da variação da concentração (dC) no segmento, com a concentração decorrente do processo de mistura (CM), conforme apresentado pela equação (01).

$$C_{(i+1)} = CM_{(i)} + dC_{(i)} \quad (01)$$

Na equação (01), C retrata a concentração no segmento, e i equivale o incremento. O cálculo da concentração de mistura (CM) é realizado pela equação (02).

$$CM_i = \frac{Q_{rio(i-1)} \cdot C_{rio(i-1)} + Q_{trib(i)} \cdot C_{trib(i)} + Q_{esg(i)} \cdot C_{esg(i)} + Q_{dif(i)} \cdot C_{dif(i)} + C_{inc}}{Q_{rio(i-1)} + Q_{trib(i)} + Q_{esg(i)} + Q_{dif(i)}} \quad (02)$$

Na equação (02):

- $Q_{rio}$ : vazão do rio ( $m^3/s$ );
- $Q_{trib}$ : vazão do tributário afluente ao segmento i ( $m^3/s$ );
- $Q_{esg}$ : vazão de esgoto doméstico afluente ao segmento i ( $m^3/s$ );
- $Q_{dif}$ : vazão incremental por entrada difusa ( $m^3/s$ );
- $C_{rio}$ : concentração do parâmetro estudado no rio (mg/L);
- $C_{trib}$ : concentração do parâmetro estudado no tributário (mg/L);
- $C_{esg}$ : concentração do parâmetro estudado no esgoto bruto (mg/L);
- $C_{dif}$ : concentração do parâmetro estudado por entrada difusa (mg/L);
- $C_{inc}$ : concentração da carga incremental direta (g DBO/d.m).

#### 3.4.1.1. Modelagem da Demanda Bioquímica e do Oxigênio Dissolvido

O cômputo da acumulação de DBO em cada segmento ( $dL/dt$ ) envolve as parcelas referentes ao decaimento da matéria orgânica no rio, a sedimentação e a carga difusa, respectivamente, conforme a formulação matemática apresentada pela equação (03).

$$\frac{dL}{dt} = -K_d \cdot L - K_s \cdot L + L_{rd} \quad (03)$$

Na equação (03):

- L: concentração de DBO última em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- $K_d$ : coeficiente de decomposição da DBO no rio ( $d^{-1}$ );
- $K_s$ : coeficiente de remoção de DBO por sedimentação ( $d^{-1}$ );
- $L_{rd}$ : taxa de entrada de DBO última difusa ( $g/m^3.d$ ).

A modelagem do comportamento do OD, por sua vez, envolve as parcelas referentes a reaeração, decomposição, demanda de sedimento, fotossíntese, respiração, e a demanda nitrogenada, conforme a equação diferencial mostrada pela equação (04).

$$\frac{dC}{dt} = K_2 \cdot (C_s - C) - K_d \cdot L - S_d + F - R - R_{O2amon} \cdot (f_{nitr} \cdot K_{an}) \cdot N_{amon} \quad (04)$$

Na equação (04):

- C: concentração de oxigênio dissolvido em um tempo de percurso t qualquer (mg/L);
- $K_2$ : coeficiente de reaeração ( $d^{-1}$ );
- $C_s$ : concentração de saturação de oxigênio dissolvido (mg/L);
- $S_d$ : demanda de oxigênio pelo sedimento ( $g O_2/m^3.d$ );
- F: taxa de produção de oxigênio por fotossíntese ( $g O_2/m^3.d$ );
- R: taxa de consumo de oxigênio pela respiração ( $g O_2/m^3.d$ );
- $R_{O2amon}$ : relação entre o oxigênio consumido por cada unidade de amônia oxidada a nitrito ( $mg O_2/mg N_{amon}$ );
- $f_{nitr}$ : fator de correção do coeficiente de nitrificação em função do OD (adimensional);
- $K_{an}$ : coeficiente de conversão da amônia a nitrito ( $d^{-1}$ );
- $N_{amon}$ : concentração de N-amônia em um tempo de percurso t qualquer (mg/L).

A última parcela da equação (04), referente à demanda nitrogenada, corresponde ao consumo de oxigênio necessário à nitrificação (oxidação da amônia a nitrito, e deste a nitrato). A cada 1,0 mg/L de amônia oxidada a nitrito ocorre o consumo de 3,2 mg/L de oxigênio, a cada 1,0 mg/L de nitrito oxidado a nitrato o consumo de oxigênio é de 1,1 mg/L, sendo assim, a cada 1,0 mg/L de amônia oxidado a nitrato ocorre o consumo de oxigênio de 4,3 mg/L (BOWIE et al., 1985).

### 3.4.1.2. Modelagem do Nitrogênio

A modelagem do nitrogênio envolve os seguintes processos: a sedimentação do nitrogênio orgânico particulado; a conversão do nitrogênio orgânico a amônia, liberação da amônia pelo sedimento de fundo; e a nitrificação (oxidação da amônia a nitrito e este a nitrato).

A transformação da amônia em nitritos ocorre pela atuação de bactérias, principalmente as do gênero *Nitrossomonas*, conforme apresentado na equação (05).



A oxidação dos nitritos a nitratos dá-se pela atuação das bactérias do gênero *Nitrobacter*, conforme apresentado pela equação (06).



E a reação global da nitrificação, obtida pela soma das equações (05) e (06), encontra-se apresentada pela equação (07).



Pode-se observar nas equações (05), (06) e (07), que durante a nitrificação além do consumo de oxigênio livre, ocorre também a liberação de  $\text{H}^+$ , consumindo a alcalinidade do meio, e ocasionando a redução do pH.

A formulação matemática da modelagem dos compostos de nitrogênio está representada por meio equações (08), (09), (10), (11), (12) e (13).

$$\frac{dN_{\text{org}}}{dt} = -K_{\text{oa}} \cdot N_{\text{org}} - K_{\text{so}} \cdot N_{\text{org}} \quad (08)$$

$$f_{\text{nitr}} = 1 - e^{-K_{\text{nitrOD}} \cdot \text{OD}} \quad (09)$$

$$\frac{dN_{\text{amon}}}{dt} = K_{\text{oa}} \cdot N_{\text{org}} - K_{\text{an}} \cdot f_{\text{nitr}} \cdot N_{\text{amon}} + \frac{S_{\text{Namon}}}{H} \quad (10)$$

$$\frac{dN_{\text{nitri}}}{dt} = K_{\text{an}} \cdot f_{\text{nitr}} \cdot N_{\text{amon}} - K_{\text{nn}} \cdot N_{\text{nitri}} \quad (11)$$

$$\frac{dN_{\text{nitra}}}{dt} = K_{\text{nn}} \cdot N_{\text{nitri}} \quad (12)$$

$$N_{\text{tot}} = N_{\text{org}} + N_{\text{amon}} + N_{\text{nitr}} + N_{\text{nitra}} \quad (13)$$

Nas equações (08), (09), (10), (11), (12) e (13):

- $N_{\text{org}}$ : concentração de nitrogênio orgânico (mg/L);
- $N_{\text{nitr}}$ : concentração de nitrito (mg/L);
- $N_{\text{nitra}}$ : concentração de nitrato (mg/L);
- $N_{\text{tot}}$ : concentração de nitrogênio total (mg/L);
- OD: concentração de oxigênio dissolvido (mg/L);
- $K_{\text{oa}}$ : coeficiente de conversão de nitrogênio orgânico a amônia ( $\text{d}^{-1}$ );
- $K_{\text{so}}$ : coeficiente de remoção do nitrogênio orgânico por sedimentação ( $\text{d}^{-1}$ );
- $K_{\text{nitrOD}}$ : coeficiente de inibição da nitrificação por baixo OD (L/mg);
- $K_{\text{nn}}$ : coeficiente de conversão do nitrito a nitrato ( $\text{d}^{-1}$ );
- $S_{\text{Namon}}$ : coeficiente de liberação de amônia pelo sedimento de fundo ( $\text{g/m}^2.\text{d}$ );
- H: profundidade do curso d'água (m).

Deve-se ressaltar que os processos de amonificação e nitrificação mantem a mesma quantidade de nitrogênio total, uma vez que ocorre nestes processos é a conversão do nitrogênio orgânico a amônia e da amônia a formas mais oxidadas (nitrito e nitrato).

### 3.5. OTIMIZAÇÃO

#### 3.5.1. Técnicas de Otimização

Na simulação da disposição final de efluentes tratados, no âmbito de uma bacia hidrográfica, a quantidade de possíveis soluções para o problema de tratamento dos esgotos é muito elevada, dificultando a tomada de decisão. Nos modelos de otimização, o objetivo do problema, representado analiticamente por uma função objetivo, será maximizado ou minimizado, de acordo com a situação; desta forma, a otimização consiste no procedimento de sucessivas simulações para determinar a solução ótima (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998). Assim, o emprego de técnicas de otimização e modelos de qualidade de água tem auxiliado no processo decisório.

Técnicas de otimização são aplicadas quando, na análise de um sistema, ocorre a necessidade de se otimizar o processo de tomada de decisão, conforme uma valoração estabelecida pela função-objetivo (LANNA, 2002). Estas técnicas são constituídas pelos seguintes itens: um espaço de busca, onde se encontram as possíveis soluções do problema; e uma função-objetivo, uma função matemática usada na avaliação das soluções produzidas. Desse modo, a otimização tem como perspectiva central obter a solução que equivalha ao ponto máximo ou mínimo da função-objetivo (LACERDA; CARVALHO, 1999).

A evolução tecnológica da computação e o aumento da complexidade dos problemas de gerenciamento de recursos hídricos têm propiciado o desenvolvimento de modelos matemáticos e simuladores computacionais como instrumento de apoio ao processo decisório. A determinação do método a ser utilizado em cada situação depende das seguintes variáveis: características do sistema; análise dos dados disponíveis; confiabilidade destes dados; restrições; e objetivos específicos (ALBERTIN, 2008).

Os modelos de otimização, em sua maioria, são resolvidos a partir do emprego de algum tipo de programação matemática. As principais técnicas de otimização são a Programação Linear (PL); Programação Dinâmica (PD); Programação Não-Linear (PNL); e Métodos Heurísticos (SANTOS, 2007).

A Programação Linear é uma técnica bastante empregada em problemas de recursos hídricos. As razões de sua ampla utilização são: flexibilidade na adaptação a uma gama de problemas; maior facilidade de compreensão, se comparada a outras técnicas; capacidade de atender problemas de grande porte; e disponibilidade de pacotes computacionais. Entretanto, a maior limitação desta técnica encontra-se no fato da exigência da linearidade das funções, muitas vezes não característico das funções dos problemas de recursos hídricos (BARBOSA, 2002).

As técnicas de Programação Não-Linear possibilitam o desenvolvimento de problemas com função objetivo não-linear, sem a necessidade de fazer aproximações. No entanto, a principal dificuldade desta técnica é a dependência de bons valores iniciais, além do inconveniente de convergência em problemas descontínuos (FORMIGA, 2005).

A Programação Dinâmica supõe uma sequência de acontecimentos e uma série de alternativas representando cada etapa da sequência. Nesta programação, sejam quais forem o estado inicial e as decisões iniciais, as demais decisões constituirão uma política ótima ao estado anterior. A desvantagem desta técnica é a chamada “praga da dimensionalidade” que ocorre com sistemas muito complexos, reservatórios múltiplos, por exemplo, quando sua capacidade é limitada devido à necessidade de memória no computador (BRAGA; BARBOSA; NAKAYAMA, 1998).

Segundo Zufferey (2012), os métodos heurísticos são constituídos por um processo de geração iterativa que direciona uma heurística subordinada, combinando inteligentemente diferentes conceitos para explorar o espaço de pesquisa, no qual as estratégias de aprendizagem são informações estruturadas para encontrar soluções eficazes, ou próximas do ótimo. Destacam-se os seguintes métodos: Estratégias Evolucionárias, Programação Genética, *Ant Colony Algorithms*, Algoritmos Evolucionários, *Simulated Annealing*, Busca-Tabu.

Os Algoritmos Genéticos, os mais conhecidos métodos dos Algoritmos Evolucionários, apresentam algumas vantagens em relação aos demais métodos de otimização. São elas: execução de busca a partir de uma população de pontos e não de um único ponto; utilização somente de informações da função-objetivo, não requerendo derivadas ou outras informações; simples implementação, não necessitando de conhecimento matemático complexo; capacidade de trabalhar com grande número de variáveis; adaptação às técnicas de computação paralela; obtenção de uma série de parâmetros ótimos e não uma simples solução; utilização de regras de transição probabilísticas e não determinísticas; e facilidade de associação com outras técnicas (SOARES, 2003).

### **3.5.2. Algoritmos Genéticos**

Os Algoritmos Genéticos (AGs) reproduzem o processo da evolução genética dos seres vivos na natureza e utilizam o princípio da seleção e evolução natural através das gerações, visando encontrar a melhor solução para determinado problema, através da obtenção do ótimo global na programação matemática. Este método de otimização foi desenvolvido por John Holland em 1975, e difundido por David Goldberg em 1989. O Algoritmo Genético está fundamentado em três elementos: os

parâmetros a serem otimizados ou genes, o operador genético e a função objetivo (KAINI; ARTITA; NICKLOW, 2012).

O Algoritmo Genético inicia estabelecendo uma população inicial de cromossomos (a primeira geração) constituída por um conjunto aleatório de cromossomos como possível solução para o problema. No decorrer do processo evolutivo, a população é avaliada conforme a qualidade da solução obtida, e os cromossomos recebem uma nota, chamada aptidão. Os cromossomos mais aptos são selecionados, enquanto os menos aptos são descartados. Os cromossomos selecionados podem passar por modificações através dos operadores de *crossover* ou por mutação, gerando nova população para a próxima geração. Este processo é realizado repetidas vezes até que a solução satisfatória seja encontrada (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Os cromossomos são historicamente representados pela codificação binária, no entanto, este código apresenta como desvantagem a necessidade de mais memória para o processamento quando a precisão é aumentada e as longas cadeias de bits tornam a convergência mais lenta. A codificação real surge como uma alternativa, esta utiliza o valor real como parâmetro do cromossomo em populações sem executar o processo de codificação e decodificação antes do cálculo do valor da aptidão (HAUPT; HAUPT, 1998).

Os operadores de seleção são responsáveis por escolher os cromossomos da população inicial que possuem melhor aptidão para formar a nova geração. Os operadores de seleção comumente disponíveis nos AGs são variações da seleção de torneios, seleção de truncamento, seleção de roda de roleta e seleção de Boltzmann. E os mais empregados na maioria dos códigos modernos são a seleção de torneio e/ou truncamento, por serem esquemas de seleção invariantes, e por apresentarem caráter elitista quando combinados (NICKLOW et al, 2010).

Os operadores de *crossover* (ou cruzamento) baseiam-se na troca de partes dos cromossomos (pais), que formarão duas novas soluções (filhos). A recombinação ocorre em uma determinada parcela de cromossomos “pais”, a taxa de *crossover* que garante a obtenção de quantidade esperada de novas soluções. O operador de *crossover* possibilita a manutenção parcial da diversidade populacional. A verdadeira fonte de diversidade populacional é o operador de mutação (LOUATI et al, 2011).

Os operadores de mutação modificam de forma aleatória o valor contido nos genes de um cromossomo, a cada bit de uma solução recém-criada tem uma determinada chance de ser invertida. Ao mesmo tempo que a mutação melhora a diversidade dos cromossomos na população, ela também apaga as informações contidas neste cromossomo, então, a taxa de mutação utilizada deve ser pequena, mas o suficiente para proporcionar a diversidade (LACERDA; CARVALHO, 1999).

Aplicações do Algoritmo Genético em conjunto a modelagem da qualidade de água, quando da otimização e seleção de sistemas de tratamento de efluentes, são encontradas nos estudos de Burn e Yulianti (2001), Cho, Sung e Ha (2004), Yandamuri, Srinivasan e Bhallamudi, (2006), Aras, Togan e Berkun (2007), Albertin (2008), Carvalho e Kaviski (2009), Valory, Reis e Mendonça (2016), Santoro, Reis e Mendonça (2016), Fantin, Reis e Mendonça (2017) e Bringer, Reis e Mendonça (2018).

Bringer, Reis e Mendonça (2018) empregaram modelo de simulação da qualidade da água, o Algoritmo Genético e análise multiobjetivo para selecionar sistemas de tratamento de esgotos considerando-se os padrões de qualidade ambiental para os parâmetros demanda bioquímica de oxigênio e oxigênio dissolvido em efluentes. O trabalho foi aplicado à bacia hidrográfica do rio Pardo (Espírito Santo, Brasil). Os autores chegaram a resultados que indicaram que a conservação de padrões estabelecidos para os efluentes pode provocar a superestimativa de plantas de tratamento de esgotos e, conseqüentemente, a má distribuição de recursos financeiros relacionados à implantação de ETES.

O trabalho de Fantin, Reis e Mendonça (2017) constitui um exemplo de abordagem econômica que estabeleceu uma metodologia para a pré-seleção de sistemas de tratamento de esgoto no âmbito de uma bacia hidrográfica baseada no uso combinado de modelo de qualidade de água, técnica de otimização (AG) e conjunto de critérios técnicos e econômicos. A metodologia foi aplicada à bacia hidrográfica do rio Pardo (Espírito Santo, Brasil). Os resultados obtidos indicaram que o modelo de otimização que buscou a minimização do somatório das eficiências de remoção de DBO no âmbito da bacia, considerando-se o emprego da autodepuração dos corpos d'água sem a imposição de padrões de qualidades para os efluentes, pré-selecionou sistemas de tratamento que variaram da combinação de reatores UASB e lagoas de

polimento a sistemas de infiltração lenta, alternativas que apresentaram menores estimativas de custos presentes líquidos.

Valory, Reis e Mendonça (2016) combinaram o Algoritmo Genético e modelo de qualidade de água para a determinação de eficiências mínimas para tratamento de esgoto em bacias hidrográficas. Os modelos de otimização incorporaram padrões de qualidade ambiental para os parâmetros de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio e medidas de equidade entre sistemas de tratamento de esgoto, tanto como restrições quanto como funções objetivo, aplicados à bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória (Espírito Santo, Brasil). Dentre os modelos de otimização desenvolvidos, os melhores resultados foram obtidos quando as capacidades de autodepuração dos rios foram consideradas, sem a imposição de padrões de qualidade para efluentes.

O trabalho de Santoro, Reis e Mendonça (2016) conduziu a avaliação de modelos de otimização aplicáveis a determinação de eficiências de remoção de DBO no tratamento de efluentes em bacias hidrográficas. Os modelos de otimização consideraram a minimização do somatório das eficiências, a minimização da inequidade e os padrões de qualidade ambiental para os parâmetros de oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio, aplicados à bacia hidrográfica do rio Pardo (Espírito Santo, Brasil). Os resultados obtidos indicaram que os modelos de otimização que incorporaram medidas de equidade na função objetivo apresentaram desempenho satisfatório. Já os modelos de otimização que incorporaram a medida de equidade como restrição do problema não apresentaram, para a área de estudo, respostas consistentes.

Carvalho e Kaviski (2009) desenvolveram uma metodologia para auxiliar a tomada de decisão quanto a aplicação de medidas de despoluição hídrica. O problema de otimização foi solucionado a partir da aplicação da técnica de otimização Algoritmos Genéticos. A metodologia proposta foi aplicada à bacia hidrográfica do rio Palmital (Paraná, Brasil). Os resultados obtidos permitiram indicar o melhor conjunto de medidas de despoluição para o sistema hídrico analisado.

Albertin (2008) propôs três modelos de otimização multiobjetivo que consideraram a maximização da carga lançada pelas fontes poluidoras, a melhora qualitativa da água,

e a minimização de violações dos padrões de DBO e OD. Destaca-se neste trabalho a restrição imposta ao modelo de otimização que promove a distribuição equitativa da eficiência do tratamento entre as fontes poluidoras. O modelo de otimização, aplicado com auxílio do Algoritmo Genético, foi integrado ao modelo de qualidade de água QUAL-2K e aplicado à bacia do rio Atibaia (São Paulo, Brasil). Os resultados indicaram que o AG demonstrou ser uma técnica efetiva para solução de problemas de otimização multiobjetivo em aplicações de gerenciamento de qualidade de água, identificando facilmente as variáveis de decisão e a frente Pareto.

Os autores Aras, Togan e Berkun (2007) desenvolveram um modelo de gestão de qualidade de água que incorporou um Algoritmo Genético e o aplicaram a uma bacia hidrográfica contaminada por três fontes de disposição de efluentes. O modelo buscou as eficiências de remoção de DBO, de modo com que o custo de tratamento fosse minimizado e restrições de qualidade de água satisfeitas. Os resultados demonstraram que o AG apresentou desempenho adequado, podendo ser aplicado a estudos de modelagem de qualidade de água.

Yandamuri, Srinivasan e Bhallamudi (2006) desenvolveram uma estrutura de otimização multiobjetivo utilizando a técnica Algoritmo Genético para solucionar problemas de alocação de cargas de efluentes, considerando o custo total do tratamento, a equidade entre os pontos de disposição de efluentes e uma medida de desempenho que reflete a violação dos padrões de oxigênio dissolvido. A metodologia desenvolvida foi aplicada a bacia hidrográfica do rio Willamete (Oregon, Estados Unidos) e os resultados indicaram que os níveis de tratamento ideais e os custos de tratamento correspondentes são maiores para as soluções de máximo desempenho, quando se comparados às soluções de menor custo.

Cho, Sung e Ha (2004) desenvolveram uma metodologia para gerenciamento de qualidade de água integrando o modelo de qualidade de água QUAL-2E ao Algoritmo Genético visando maximizar a qualidade do corpo hídrico receptor e minimizar os custos do tratamento de efluentes e a aplicaram à bacia do rio Youngsan (Coreia do Sul). Os parâmetros de qualidade de água considerados neste estudo foram demanda bioquímica de oxigênio, oxigênio dissolvido, nitrogênio total e fósforo total. Foram comparados os resultados dos quatro cenários que não utilizaram AG aos resultados obtidos pelo modelo de otimização que utilizou o AG como técnica. Os resultados

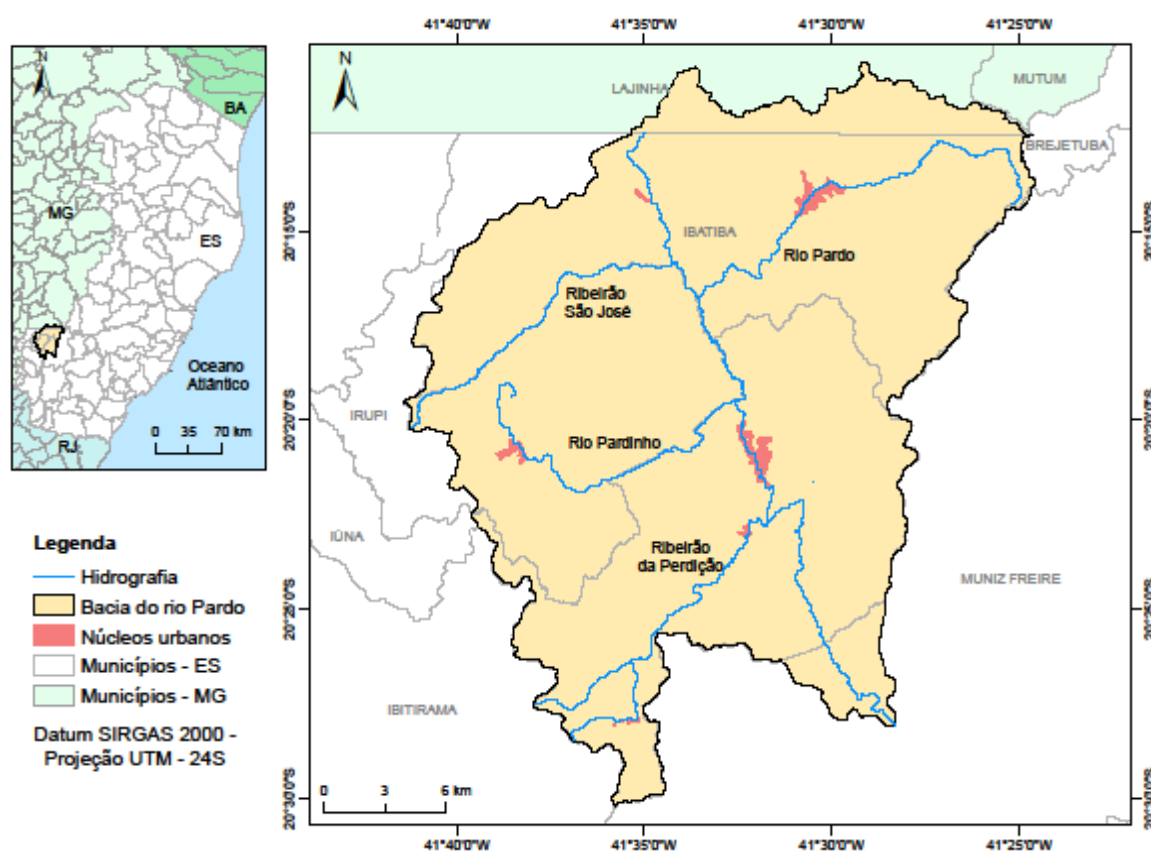
gerados pelo modelo simulado com auxílio do AG foram, segundo os autores, muito melhores que os dos quatro cenários quanto cumprimento das metas de qualidade e otimização de custos.

Burn e Yulianti (2001) empregaram o Algoritmo Genético integrado ao modelo de qualidade de água QUAL-2E para solucionar o problema de alocação de cargas de efluentes na bacia do rio Willamette (Oregon, Estados Unidos). Foram criados três modelos de otimização com objetivos diferentes, o primeiro modelo visou a minimização dos custos de tratamento e o número de violações dos limites de oxigênio dissolvido, o segundo considerou a minimização dos custos de tratamento e a maximização da equidade, e o terceiro modelo buscou a determinação de níveis de remoção durante o período crítico do ano, considerando a maximização da qualidade da água e da equidade. Os autores concluíram que os AGs demonstraram ser uma técnica eficaz para solucionar problemas de alocação de cargas de efluentes.

#### 4. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é constituída pela bacia hidrográfica do rio Pardo (Figura 2), curso d'água afluente do rio Braço Norte Esquerdo, importante afluente do rio Itapemirim. A área da bacia do rio Pardo possui aproximadamente 611 km<sup>2</sup> e compreende partes de quatro municípios localizados no estado do Espírito Santo (Ibatiba, Irupi, Iúna, e Muniz Freire) e de um município do estado de Minas Gerais (Lajinha). O rio Pardo nasce no município de Ibatiba e possui extensão aproximada de 57,9 km.

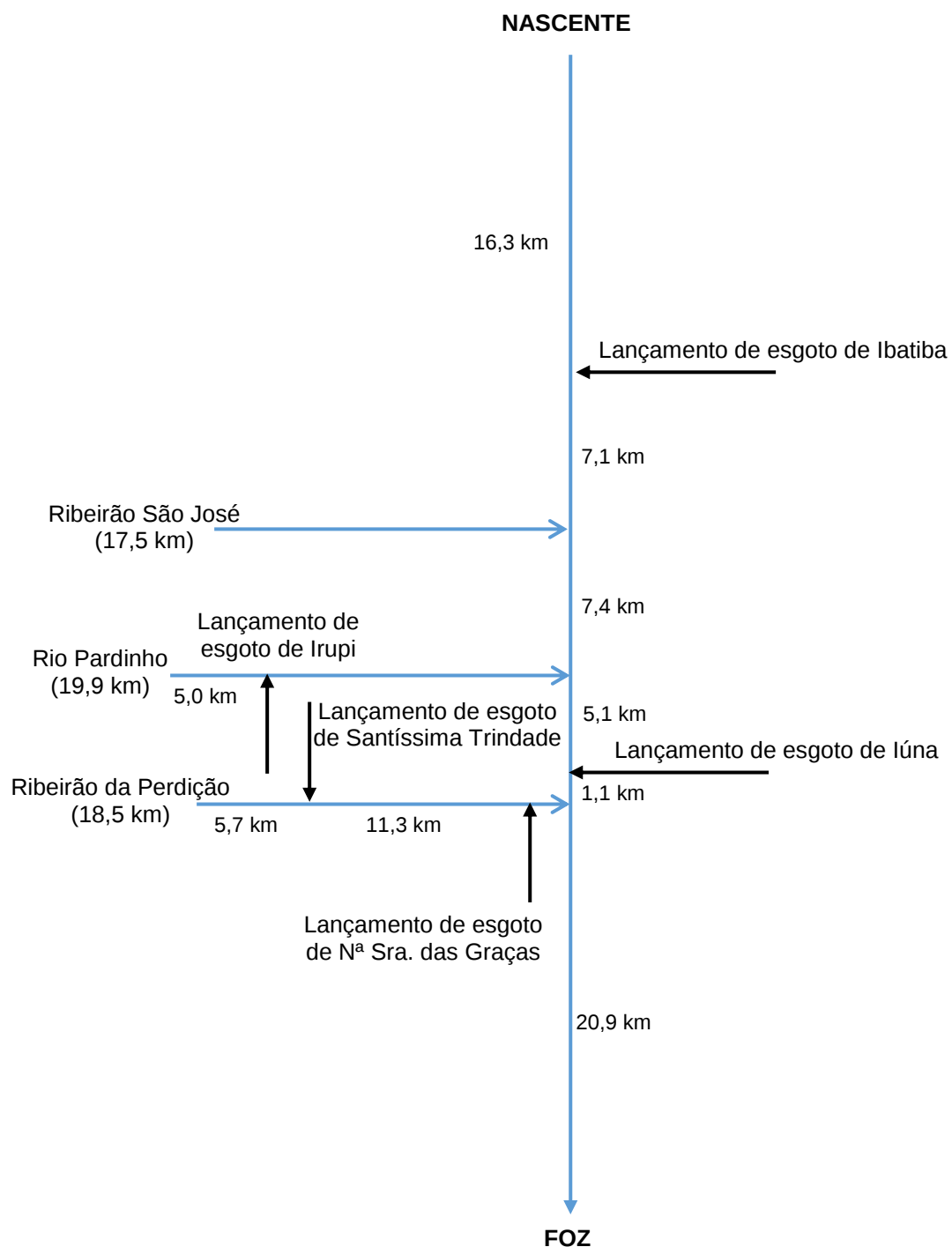
Figura 2 – Localização da bacia hidrográfica do rio Pardo.



O rio Pardo possui como principais afluentes o ribeirão São José, o rio Pardinho e o ribeirão da Perdição. O rio Pardo recebe diretamente os esgotos domésticos brutos gerados nos núcleos urbanos dos municípios de Ibatiba e Iúna. O rio Pardinho, por sua vez, recebe os esgotos gerados no núcleo urbano do município de Irupi. Já o ribeirão da Perdição recebe os esgotos gerados nas localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. O diagrama unifilar com os principais cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo está apresentado na Figura 3. Não existem

estações de tratamento de esgotos em operação em qualquer dos referidos pontos de geração de esgotos brutos na bacia do rio Pardo.

Figura 3 – Diagrama unifilar da bacia hidrográfica do rio Pardo.



## 5. METODOLOGIA

A metodologia empregada nesta dissertação envolve a associação, no âmbito de uma bacia hidrográfica, de um modelo de simulação de qualidade de água com uma técnica de otimização para obtenção de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio em sistemas de tratamento de esgotos. Estas eficiências devem garantir que o lançamento dos efluentes tratados atendam aos padrões ambientais estabelecidos pela legislação vigente.

Embora a metodologia proposta neste trabalho seja aplicável a qualquer bacia hidrográfica, o modelo de otimização proposto foi empregado na bacia hidrográfica do rio Pardo, importante tributário do rio Itapemirim, curso d'água localizado na porção sul do estado do Espírito Santo.

### 5.1. MODELAGEM MATEMÁTICA DA QUALIDADE DE ÁGUA

A simulação da qualidade da água foi realizada por modelo matemático desenvolvido no ambiente computacional do *software* MatLab (*Matrix Laboratory*), voltado para cálculos numéricos, que associa análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e elaboração de gráficos. O modelo elaborado, baseado no modelo QUAL-UFMG, descreve a variação espacial dos constituintes OD, DBO, nitrogênio total e suas frações (nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato), ao longo de um curso d'água.

A bacia do rio Pardo, que compõe a área de estudo da presente dissertação, recebe contribuições de fontes pontuais e distribuídas. As fontes pontuais são constituídas pelos três tributários do rio Pardo (rio Pardinho, ribeirão da Perdição e ribeirão São José) e os lançamentos de esgotos domésticos de cinco localidades situadas ao longo da bacia (sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna, e os distritos Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças); as fontes distribuídas, por sua vez, pelas vazões incrementais e cargas de DBO e nitrogênio referentes aos esgotos gerados pela população rural.

O modelo desenvolvido, assim como o QUAL-UFMG, utiliza o método de integração Euleriano, que requer passos de integração menores que os demais métodos de integração, visando evitar a instabilidade numérica. No presente trabalho, foram

calculadas as concentrações de OD, DBO e nitrogênio total e suas frações em cada segmento do curso d'água (C), conforme equação (01) apresentada no item 3.4.1.

Os fenômenos interagentes considerados na modelagem dos referidos parâmetros de qualidade de água foram a desoxigenação devido à oxidação da fração carbonácea da matéria orgânica, a nitrificação devido à oxidação da amônia, a demanda de oxigênio pelo sedimento e a reaeração atmosférica. Não foram considerados a produção de oxigênio pela fotossíntese e o consumo do oxigênio pela respiração.

As características fisiográficas, assim como as constantes cinéticas e os dados hidrodinâmicos da bacia hidrográfica do rio Pardo considerados neste trabalho reproduziram aqueles obtidos por Calmon et al. (2016), que desenvolveu um procedimento metodológico para o apoio ao processo de enquadramento dos cursos d'água superficiais aplicado à mesma bacia hidrográfica analisada no presente estudo.

A concentração de saturação de oxigênio adotada foi 8,11 mg/L, obtido por Calmon et al. (2016) a partir da fórmula proposta por Popel (1979), assumindo-se a altitude média da bacia igual a 847 metros e a temperatura média igual a 20,6°C.

Calmon et al. (2016) obtiveram as relações funcionais entre vazão e velocidade, e entre vazão e profundidade, a partir dos registros de medições de vazão, entre os anos de 1996 e 2013, da estação fluviométrica de Terra Corrida – Montante, estação instalada e em operação no rio Pardo. As equações para ajuste da velocidade e da profundidade em função da vazão, equações (14) e (15), respectivamente, basearam-se no trabalho de Thomann e Mueller (1987).

$$U=0,1433 \cdot Q^{0,6305} \quad (14)$$

$$H=0,6076 \cdot Q^{0,2566} \quad (15)$$

Nas equações (36) e (37), U representa a velocidade do curso d'água (m/s), Q a vazão do curso d'água (m³/s) e H a profundidade do curso d'água (m).

O coeficiente que representa a oxidação da matéria orgânica no rio,  $K_d$ , foi determinado em função das características hidráulicas do corpo d'água (profundidade

e vazão), por meio de equação proposta por Hydrosience Inc. (1971), conforme equação (16).

$$K_d = 0,3 \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{-0,434} \quad (\text{para } H \leq 2,5 \text{ m}) \quad (16)$$

O coeficiente que regula o fenômeno da reaeração atmosférica,  $K_2$ , também foi obtida por meio de correlação com variáveis hidráulicas, a partir da formulação estabelecida originalmente por O'Connor & Dobbins (1958, apud BOWIE et al, 1985) (equação (17)).

$$K_2 = 3,93 \cdot v^{0,5} \cdot H^{-1,5} \quad (\text{para } 0,6 \text{ m} \leq H \leq 4,0 \text{ m e } 0,05 \text{ m/s} \leq v \leq 0,8 \text{ m/s}) \quad (17)$$

O coeficiente de sedimentação  $K_s$  adotado neste trabalho foi  $0,05 \text{ d}^{-1}$ . A escolha deste valor foi feita a partir da faixa de valores típicos para rios rasos que recebem esgoto bruto de baixa concentração, conforme Tabela 3. A adoção deste valor para  $K_s$ , está a favor da segurança, pois a opção pelo limite inferior da faixa produziria redução de uma quantidade pequena de DBO na massa líquida devido a sedimentação.

Tabela 3 – Valores típicos do coeficiente de sedimentação  $K_s$  em  $\text{d}^{-1}$  (base e,  $20^\circ\text{C}$ ).

| Origem                                                    | Rios rasos | Rios profundos |
|-----------------------------------------------------------|------------|----------------|
| Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado           | 0,10-0,35  | 0,05-0,20      |
| Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração | 0,05-0,25  | 0,00-0,15      |
| Curso d'água recebendo efluente primário                  | 0,05-0,10  | 0,00-0,05      |
| Curso d'água recebendo efluente secundário                | -          | -              |
| Curso d'água recebendo efluente com águas limpas          | -          | -              |

Nota: rios rasos: profundidade inferior a cerca de 1,0 ou 1,5 m; rios profundos: profundidade superior a cerca de 1,0 ou 1,5 m.

Fonte: Von Sperling (2014b) (adaptado).

O coeficiente que expressa a demanda de oxigênio pelo sedimento, o  $S_d'$ , estabelecido a partir dos valores propostos por Aguirre (2000), assumiu, neste estudo, o valor de  $0,50 \text{ g O}_2/\text{m}^2.\text{d}$ . A demanda de oxigênio do sedimento ( $S_d$ ) foi ajustada para se tornar dimensionalmente homogênea a partir da relação entre o coeficiente  $S_d'$  e a profundidade do curso d'água (m), conforme mostrado pela equação (18).

$$S_d = \frac{S_d'}{H} \quad (18)$$

Os coeficientes de reação do nitrogênio, assim como as concentrações de constituintes, em suas diversas formas, tanto nos esgotos brutos, como nos cursos d'água, foram obtidos a partir da literatura técnica corrente associada à modelagem

da qualidade de água, considerados cursos d'água apresentando características similares àqueles que compõem a área de estudo.

Os coeficientes de reação do modelo do nitrogênio adotados (Tabela 4) foram os valores médios das faixas de valores típicos apresentadas por Von Sperling (2014b).

Tabela 4 – Valores adotados para os coeficientes da modelagem do nitrogênio.

| Coeficiente                                                                                        | Unidade             | Valor adotado |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------------|
| Coeficiente de sedimentação do N orgânico ( $K_{so}$ )                                             | $d^{-1}$            | 0,05          |
| Coeficiente de conversão do N orgânico a amônia ( $K_{oa}$ )                                       | $d^{-1}$            | 0,225         |
| Coeficiente de conversão de amônia a nitrito ( $K_{an}$ )                                          | $d^{-1}$            | 0,20          |
| Coeficiente de conversão do nitrito a nitrato ( $K_{nn}$ )                                         | $d^{-1}$            | 0,50          |
| Fluxo de liberação de amônia pelo sedimento de fundo ( $S_{amon}$ )                                | $g/m^2.d$           | 0,25          |
| Coeficiente de inibição da nitrificação por baixo OD ( $K_{nitroD}$ )                              | $L/mg$              | 0,60          |
| Relação entre oxigênio consumido por cada unidade de amônia oxidada a nitrito ( $R_{O2amon}$ )     | $mg\ O_2/mg\ Namon$ | 3,2           |
| Relação entre o oxigênio consumido por cada unidade de nitrito oxidado a nitrato ( $R_{O2nitri}$ ) | $mg\ O_2/mg\ Nitri$ | 1,1           |

Os valores dos coeficientes cinéticos foram corrigidos, em função da temperatura adotada no presente trabalho, com emprego dos valores típicos do coeficiente de temperatura ( $\theta$ ) indicados pela literatura: 1,024 para  $K_2$ ,  $K_s$ ,  $K_{so}$  (BOWIE et al, 1985); 1,047 para o coeficiente  $K_d$ ,  $K_{oa}$ ,  $K_{nn}$ ; 1,060 para  $S_d'$  (EPA, 1987); e 1,080 para  $K_{an}$  (THOMANN; MUELLER, 1987).

Para o desenvolvimento das simulações foram adotados os valores da vazão de referência  $Q_{90}$  apresentados por Calmon et al. (2016). A vazão incremental foi determinada pelo balanço de massa, obtido pela diferença entre a vazão a jusante do trecho simulado e a vazão nas cabeceiras dos cursos d'água. O valor adotado para a vazão incremental nas simulações foi o mesmo utilizado pelos referidos autores,  $0,035\ m^3/s.km^2$ , considerado uniforme para todos os cursos d'água analisados. Para todos os cursos d'água da bacia do rio Pardo, assumiu-se as concentrações de OD, DBO, Norg e Namon  $7,5\ mg/L$ ,  $2,0\ mg/L$ ,  $1,0\ mg/L$ , e  $1,0\ mg/L$ , respectivamente.

No estudo de Calmon et al. (2016), a carga orgânica dos efluentes domésticos gerados pela população residente ao longo da bacia do rio Pardo foi classificada em rural ou urbana, de acordo com a forma de poluição hídrica. Os efluentes domésticos de origem rural foram considerados desprovidos de qualquer tipo de tratamento, assumindo-se que estes esgotos fossem lançados *in natura*. Desta forma, uma carga incremental direta de DBO foi adotada ao longo de toda a extensão da bacia,

representando o lançamento da carga proveniente dos esgotos da zona rural. O valor da carga incremental direta de DBO estimado pelos referidos autores e assumido pelo presente trabalho foi 9,35 g de DBO/m.d. As vazões dos efluentes domésticos dos núcleos urbanos da bacia e o número de habitantes de cada núcleo são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Vazão dos efluentes domésticos de origem urbana da bacia hidrográfica do rio Pardo.

| Localidade                     | População urbana em 2030<br>(habitantes) | Vazão de lançamento de<br>esgotos urbanos (L/s) |
|--------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Ibatiba                        | 18.125                                   | 24,30                                           |
| Irupi                          | 4.918                                    | 5,20                                            |
| Iúna                           | 14.821                                   | 19,90                                           |
| Santíssima Trindade            | 301                                      | 0,30                                            |
| N <sup>a</sup> Sra. das Graças | 600                                      | 0,60                                            |

Fonte: Calmon et al. (2016)

A concentração de DBO dos efluentes urbanos foi considerada igual a 400 mg/L, conforme adotado por Calmon et al. (2016). Foram realizadas simulações da qualidade de água da bacia do rio Pardo para os seguintes cenários, quanto às concentrações de nitrogênio orgânico e amônia:

- Cenário 1: A concentração de nitrogênio orgânico dos efluentes foi considerada igual a 30 mg/L, valor máximo da faixa de valores típicos proposta por Von Sperling (2014b) para efluentes domésticos. A concentração de amônia dos efluentes adotada foi igual a 50 mg/L, valor máximo proposto por Feigin et al. (1991, apud NYENJE et al, 2010). Neste trabalho foram adotados valores conservadores para as concentrações do nitrogênio orgânico e da amônia no esgoto doméstico buscando-se trabalhar em favor da segurança, uma vez que quanto maiores as concentrações do nitrogênio no esgoto bruto, mais elevados serão os níveis mínimos de remoção deste constituinte a fim de se garantir o atendimento aos padrões de qualidade ambiental;
- Cenário 2: A partir dos valores das concentrações de nitrogênio orgânico e amônia adotados pelo Cenário 1, considerou-se que toda a concentração de nitrogênio orgânico dos esgotos domésticos foi convertida a amônia por meio do processo de amonificação, adotando-se nitrogênio orgânico com concentração nula e amônia com concentração de 80 mg/L.

## 5.2. MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

Embora a perspectiva central do presente trabalho seja a determinação de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio dos efluentes visando o atendimento dos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pelas resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011 para cursos d'água e efluentes, os modelos de otimização empregados nesta pesquisa estimaram também as eficiências de remoção de DBO. Uma vez que o processo de nitrificação demanda oxigênio da massa líquida, o cômputo das concentrações de OD torna-se necessário. Desta forma, como a disponibilidade de OD está condicionada a presença de matéria orgânica, também foram determinadas as eficiências de remoção de DBO. Foram propostos três modelos de otimização apresentados a seguir.

### ▪ Modelo de Otimização 1

O primeiro Modelo de Otimização, originalmente proposto por Louzada, Reis e Mendonça (2013), buscou a determinação das eficiências mínimas de remoção de DBO para os cinco pontos de lançamento de esgotos da bacia do rio Pardo, observando os padrões de qualidade ambiental dos parâmetros DBO e OD. A aplicação deste Modelo de Otimização, que permitiu a determinação das eficiências de remoção mínimas de DBO sem a incorporações das demandas de oxigênio associadas à nitrificação permitiu que, numa etapa subsequente, fossem determinadas as eficiências mínimas necessárias para a remoção dos compostos de nitrogênio, considerados dois aspectos: 1º) a demanda de oxigênio para a oxidação dos compostos de carbono (processo de oxidação que normalmente se estabelece antes da nitrificação quando da disposição final de esgotos brutos frescos) já teria sido atendida e 2º) as demandas para a remoção da amônia poderiam ser determinadas a partir da aplicação de um segundo modelo de otimização (Modelo de Otimização 2) de tal modo que os padrões ambientais associados ao OD e à amônia fossem atendidos, com a garantia de que a DBO já teria sido removida num nível satisfatório.

É importante ressaltar que, mesmo que os cursos d'água que constituem esta bacia não tenham passado pelo processo de enquadramento e sejam considerados classe 2, conforme preconizado pela Resolução CONAMA nº 357/2005, o presente trabalho, quando possível, também considerou eventual atendimento aos padrões de qualidade

estabelecidos para as demais classes de enquadramento para corpos d'água doce. A formulação matemática do Modelo de Otimização 1 foi representada pela equação (19) e inequações (20) a (27).

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \sum_{i=1}^n E_{\text{DBO}_i} \quad (19)$$

$$E_{\text{DBO}_i} \geq 0\% \quad (20)$$

$$E_{\text{DBO}_i} \leq 90\% \quad (21)$$

Para corpos d'água classe 1 de enquadramento:

$$\text{DBO}_r \leq 3,0 \quad (22)$$

$$\text{OD}_r \geq 6,0 \quad (23)$$

Para corpos d'água classe 2 de enquadramento:

$$\text{DBO}_r \leq 5,0 \quad (24)$$

$$\text{OD}_r \geq 5,0 \quad (25)$$

Para corpos d'água classe 3 de enquadramento:

$$\text{DBO}_r \leq 10,0 \quad (26)$$

$$\text{OD}_r \geq 4,0 \quad (27)$$

Nas equações de (19) a (27):

- $E_{\text{DBO}_i}$ : eficiência de remoção de DBO no i-ésimo sistema de tratamento de efluente de uma bacia hidrográfica;
- $\text{DBO}_r$ : concentração de DBO no curso d'água (mg/L);
- $\text{OD}_r$ : concentração de OD no curso d'água (mg/L).

A Equação (19) representa a função objetivo, e as inequações (20) e (27) configuram as restrições do Modelo. A Inequação (20) assegura que as variáveis de decisão não sejam negativas, além de considerar a possibilidade do emprego da capacidade de autodepuração dos rios para a assimilação dos efluentes. A Inequação (21) limita o valor máximo de remoção da DBO no efluente a 90%. As inequações (22) a (27), por sua vez, indicam os padrões de qualidade estabelecidos para DBO e OD pela

Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos de água doce de acordo com sua classe de enquadramento.

### ▪ Modelo de Otimização 2

O segundo Modelo de Otimização, proposto pelo presente trabalho, buscou a determinação das eficiências mínimas de remoção de nitrogênio amoniacal para os cinco pontos de lançamento de esgotos da bacia do rio Pardo, assumindo-se, para a condução desta tarefa, os valores de eficiências mínimas de remoção de DBO obtidos pelo Modelo de Otimização 1.

A função objetivo deste Modelo é representada pela equação (28). Os valores mínimos e máximos assumidos para a eficiência de remoção de nitrogênio também constituíram restrições deste modelo, conforme inequações (29) e (30).

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \sum_{j=1}^n E_{\text{Namon}_j} \quad (28)$$

$$E_{\text{Namon}_i} \geq 0\% \quad (29)$$

$$E_{\text{Namon}_j} \leq 90\% \quad (30)$$

Nas equações de (28) a (30):

- $E_{\text{Namon}_j}$ : eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal no j-ésimo sistema de tratamento de efluente de uma bacia hidrográfica.

Os padrões ambientais de qualidade, estabelecidos para os compostos de nitrogênio nos corpos de água doce de acordo com as classes de enquadramento estabelecidas pela Resolução CONAMA nº 357/2005 constituem as restrições deste modelo, conforme apresentado pelas inequações (31) a (40). Os padrões para o nitrogênio amoniacal de acordo com o pH do corpo d'água para os cursos d'água classe 1 e 2 encontram-se representados pelas inequações (31) a (34) e, para os cursos d'água classe 3, pelas inequações (35) a (38). Os padrões ambientais de qualidade para o nitrogênio nas formas de nitrito e nitrato, para quaisquer classes de enquadramento, são representados pelas inequações (39) e (40).

$$N_{\text{amon}_r} < 3,7 \text{ para } \text{pH} \leq 7,5 \quad (31)$$

$$N_{\text{amon}_r} < 2,0 \text{ para } 7,5 \leq \text{pH} \leq 8,0 \quad (32)$$

$$N_{amon_r} < 1,0 \text{ para } 8,0 \leq pH \leq 8,5 \quad (33)$$

$$N_{amon_r} < 0,5 \text{ para } pH > 8,5 \quad (34)$$

$$N_{amon_r} < 13,3 \text{ para } pH \leq 7,5 \quad (35)$$

$$N_{amon_r} < 5,6 \text{ para } 7,5 \leq pH \leq 8,0 \quad (36)$$

$$N_{amon_r} < 2,2 \text{ para } 8,0 \leq pH \leq 8,5 \quad (37)$$

$$N_{amon_r} < 1,0 \text{ para } pH > 8,5 \quad (38)$$

$$N_{nitri_r} < 1,0 \quad (39)$$

$$N_{nitra_r} < 10,0 \quad (40)$$

Nas equações de (31) a (40):

- $N_{amon_r}$ : concentração de nitrogênio amoniacal no curso d'água (mg/L);
- $N_{nitri_r}$ : concentração de nitrito no curso d'água (mg/L);
- $N_{nitra_r}$ : concentração de nitrato no curso d'água (mg/L).

### ▪ Modelo de Otimização 3

A formulação do Modelo de Otimização 3 baseou-se na mesma perspectiva estabelecida pelos modelos de otimização 1 e 2, modelos que buscaram a minimização do somatório dos valores das eficiências de tratamento de esgotos no âmbito da bacia hidrográfica do rio Pardo. O terceiro modelo, no entanto, buscou determinar as eficiências mínimas de remoção de DBO e nitrogênio amoniacal simultaneamente e para os cinco pontos de lançamento de esgotos da bacia.

O Modelo de Otimização 3 foi aplicado para a mesma condição de lançamento referente ao Modelo de Otimização 1, condição que considerou o emprego da capacidade de autodepuração dos rios para a assimilação dos efluentes (condição de lançamento 1). Além desta condição, foram realizadas simulações com auxílio do Modelo de Otimização 3 para outras duas condições de lançamento, estabelecidas conforme Art. 21 da Resolução CONAMA nº 430/2011 (artigo que definiu as condições de lançamento de esgotos para o parâmetro DBO). São elas:

- i. Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no efluente igual a 120 mg/L e,
- ii. Condição de lançamento 3: eficiência de remoção de DBO mínima de 60%.

Neste modelo, a função objetivo, representada pela equação (41), possui duas parcelas de somatório, sendo uma referente à eficiência de remoção de DBO, e outra à eficiência de remoção do nitrogênio.

$$\text{Minimizar } [f(E)] = \alpha \sum_{i=1}^n E_{\text{DBO}_i} + \beta \sum_{j=1}^n E_{\text{Namon}_j} \quad (41)$$

Assumiu-se que as constantes  $\alpha$  e  $\beta$  são iguais a 1 (um), e que os valores de  $E_{\text{DBO}_i}$  e  $E_{\text{Namon}_j}$  formam os pares de eficiências de remoção de DBO e nitrogênio amoniacal para cada lançamento de esgotos da bacia do rio Pardo, conforme indicado no Quadro 2. As restrições referentes aos limites das eficiências de remoção do constituinte no efluente e aos padrões de qualidade estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 considerados neste modelo foram as mesmas assumidas pelos modelos anteriores, conforme inequações (20) a (27) e (29) a (40).

Quadro 2 – Pares de eficiência de remoção de DBO e amônia e suas respectivas localidades.

| Eficiências de remoção de DBO e amônia   | Localidade          |
|------------------------------------------|---------------------|
| $(E_{\text{DBO}_1}, E_{\text{Namon}_1})$ | Ibatiba             |
| $(E_{\text{DBO}_2}, E_{\text{Namon}_2})$ | Irupi               |
| $(E_{\text{DBO}_3}, E_{\text{Namon}_3})$ | Lúna                |
| $(E_{\text{DBO}_4}, E_{\text{Namon}_4})$ | Santíssima Trindade |
| $(E_{\text{DBO}_5}, E_{\text{Namon}_5})$ | Nª Sra. das Graças  |

Os modelos de otimização 2 e 3, que buscam a determinação das eficiências mínimas de remoção de nitrogênio amoniacal, foram aplicados para os cenários 01 e 02 (cenários definidos em função da distribuição das diferentes concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal nos efluentes, conforme item 5.1).

### 5.3. TÉCNICA DE OTIMIZAÇÃO

A aplicação dos modelos de otimização apresentados no item 5.2 foi realizada pela técnica de otimização Algoritmo Genético (AG), com o auxílio do *toolbox Optimization*, disponível no ambiente computacional do *software* MatLab. Esta técnica possui como principais operadores tipos de seleção, *crossover* e mutação; como principais parâmetros, a dimensão da população inicial, elitismo, probabilidade de recombinação e probabilidade de mutação.

Os operadores e parâmetros que foram adotados neste projeto reproduziram os valores utilizados por Valory, Reis e Mendonça (2016) ao avaliarem eficiências mínimas de tratamento de esgotos para disposições fictícias de esgotos na porção superior do Rio Santa Maria da Vitória (ES), sumarizados da seguinte forma:

- Codificação: real;
- População inicial: 300 (trezentos) indivíduos;
- Seleção: por torneio;
- *Crossover*: aritmético;
- Taxa de *crossover*: 50%;
- Mutação: adaptativo;
- Critério de parada: atingir 100 gerações ou os resultados convergirem;
- Elitismo: 3 (três) indivíduos.

Diante da natureza da técnica de otimização (técnica metaheurística), visando atenuar a possibilidade de obtenção de resultado que não corresponda ao máximo global, foram efetuadas 5 (cinco) simulações para cada condição de disposição final de efluente e modelo de otimização empregado. Soluções iguais ou semelhantes indicam que estão próximas do ótimo global, ou que constituem o ótimo global.

#### 5.4. PRÉ-SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS

Foram pré-selecionados sistemas de tratamento para os cinco pontos de disposição final de esgotos na bacia estudada a partir das eficiências mínimas de remoção de DBO e nitrogênio amoniacal. É importante ressaltar que a escolha do sistema de tratamento de esgotos deve ser feita a partir da análise de critérios técnicos, econômicos, ambientais e sociais, sendo as eficiências de remoção de DBO e de nitrogênio apenas dois dos critérios técnicos disponíveis para sustentar o referido processo de seleção. Um adequado processo de seleção deve considerar vários outros critérios, tais como, demanda por área de implantação, simplicidade operacional, geração de odor e de ruído e quantidade de lodo. Neste contexto, o presente trabalho limitou-se à pré-seleção de sistemas de tratamento considerando apenas os critérios eficiência de remoção de DBO e eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal.

A partir do conjunto de alternativas de tratamento de esgotos apresentado por Von Sperling (2014a), considerando-se as faixas de eficiências de remoção de DBO e nitrogênio, foram obtidos os valores médios de eficiência de remoção para cada faixa (Tabela 6). Estes valores médios constituíram os valores de referência utilizados na pré-seleção.

Para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças (localizados na zona rural de Lúna) não foram admitidos sistemas que demandem energia elétrica para aeração, impondo-se limitação no consumo de energia. No entanto, foram admitidos, para estes povoados, sistemas de tratamento associados à disposição final de efluentes no solo, pois estes povoados constituem localidades pequenas, com número de habitantes muito reduzido e as vazões do efluente final pequenas, não requerendo, assim, área tão grande para disposição no solo. As alternativas de tratamento associadas à disposição final do efluente no solo não foram consideradas para as sedes dos municípios de Ibatiba, Lúna e Irupi, localidades mais populosas cujos volumes de efluentes a serem dispostos demandariam grandes áreas, o que poderia eventualmente inviabilizar esta opção de tratamento.

Tabela 6 – Conjunto de alternativas consideradas na etapa de pré-seleção de sistemas de tratamento de esgotos.

| Alternativas de Tratamento                                   | Eficiências Médias de Remoção (%) |            |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------|------------|
|                                                              | DBO                               | Amônia - N |
| A01 Tratamento primário (tanques sépticos)                   | 32,5                              | 30         |
| A02 Tratamento primário convencional                         | 32,5                              | 30         |
| A03 Tratamento primário avançado                             | 62,5                              | 30         |
| A04 Lagoa facultativa                                        | 80                                | 50         |
| A05 Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                      | 80                                | 50         |
| A06 Lagoa aerada facultativa                                 | 80                                | 30         |
| A07 Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação       | 80                                | 30         |
| A08 Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa +lagoa de maturação  | 82,5                              | 57,5       |
| A09 Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + lagoa de alta taxa | 82,5                              | 75         |
| A10 Lagoa anaeróbia + lagoa facultativa + remoção de algas   | 87,5                              | 50         |
| A11 Infiltração lenta                                        | 94,5                              | 80         |
| A12 Infiltração rápida                                       | 91,5                              | 65         |
| A13 Escoamento superficial                                   | 85                                | 50         |
| A14 Sistemas alagados construídos ( <i>wetlands</i> )        | 85                                | 50         |
| A15 Tanque séptico + filtro anaeróbio                        | 82,5                              | 45         |
| A16 Tanque séptico + infiltração                             | 94                                | 65         |
| A17 Reator UASB                                              | 67,5                              | 50         |
| A18 UASB + lodos ativados                                    | 88                                | 67,5       |
| A19 UASB + biofiltro aerado submerso                         | 88                                | 67,5       |
| A20 UASB + filtro anaeróbio                                  | 81                                | 50         |
| A21 UASB + filtro biológico percolador de alta carga         | 86,5                              | 50         |
| A22 UASB + flotação por ar dissolvido                        | 88                                | 30         |
| A23 UASB + lagoas de polimento                               | 82                                | 57,5       |
| A24 UASB + lagoa aerada facultativa                          | 80                                | 30         |
| A25 UASB + lagoa aerada mist. comp. + lagoa decantação       | 80                                | 30         |
| A26 UASB + escoamento superficial                            | 83,5                              | 50         |
| A27 Lodos ativados convencional                              | 89                                | 80         |
| A28 Lodos ativados - aeração prolongada                      | 93,5                              | 80         |
| A29 Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | 93,5                              | 80         |
| A30 Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | 89                                | 80         |
| A31 Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | 89                                | 80         |
| A32 Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | 95,5                              | 80         |
| A33 Filtro biológico percolador de baixa carga               | 89                                | 75         |
| A34 Filtro biológico percolador de alta carga                | 85                                | 50         |
| A35 Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | 91,5                              | 80         |
| A36 Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | 91,5                              | 80         |
| A37 Biodisco                                                 | 91,5                              | 75         |

Fonte: Von Sperling (2014a)

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente capítulo são apresentados, em três etapas, os resultados da aplicação da metodologia proposta neste trabalho à bacia do rio Pardo. Na primeira etapa são abordadas as capacidades de autodepuração dos cursos d'água da bacia em estudo que recebem lançamentos de esgotos domésticos sem qualquer tipo de tratamento. Em seguida, são apresentadas as eficiências de remoção de DBO e nitrogênio dos esgotos, estimadas para cada localidade a partir da associação entre modelo de qualidade de água e técnica de otimização. Na parte final do capítulo, são apresentados e discutidos os resultados da pré-seleção dos sistemas de tratamento de esgotos para cada uma das localidades atualmente responsáveis por lançamento de esgotos brutos nos cursos d'água da bacia.

Tendo em vista que os cursos d'água que constituem a bacia em estudo não passaram por processo de enquadramento, estes são considerados classe 2, conforme preconizado pela Resolução CONAMA nº 357/2005. Entretanto, quando possível, o presente trabalho estima eficiências mínimas de tratamento de esgotos considerando a eventual adoção dos limites estabelecidos para rios classes 1 e 3.

### 6.1. SIMULAÇÃO DO LANÇAMENTO DE ESGOTOS BRUTOS

A simulação inicial obteve os perfis de concentração de diferentes parâmetros de qualidade de água considerando a situação atual da bacia do rio Pardo, com lançamentos de esgotos brutos em cinco pontos de disposição ao longo da bacia (Ibatiba, Irupi, Iúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças). Os resultados destas simulações, realizadas por meio de modelo de qualidade de água desenvolvido no ambiente computacional do *software* MatLab, reproduziram perfis de concentração dos constituintes quando do emprego do modelo QUAL-UFMG.

Foram obtidos os perfis de concentração dos parâmetros OD, DBO, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato ao longo dos três cursos d'água da bacia do Rio Pardo que recebem os lançamentos de esgotos (rio Pardo, rio Pardinho e ribeirão da Perdição), para cada um dos cenários conformados a partir da distribuição das concentrações do nitrogênio total entre as espécies nitrogênio orgânico e amônia.

### 6.1.1. Perfis de Concentrações para o Cenário 1

A Tabela 7 apresenta, para cada curso d'água da bacia estudada que recebe lançamentos de esgotos, as concentrações críticas dos parâmetros OD (representada pela concentração mínima), DBO, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato (estas últimas representadas pela concentrações máximas de cada parâmetro), obtidas pela simulação das condições de qualidade de água considerando-se concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal nos efluentes 30,0 mg/L e 50,0 mg/L, respectivamente.

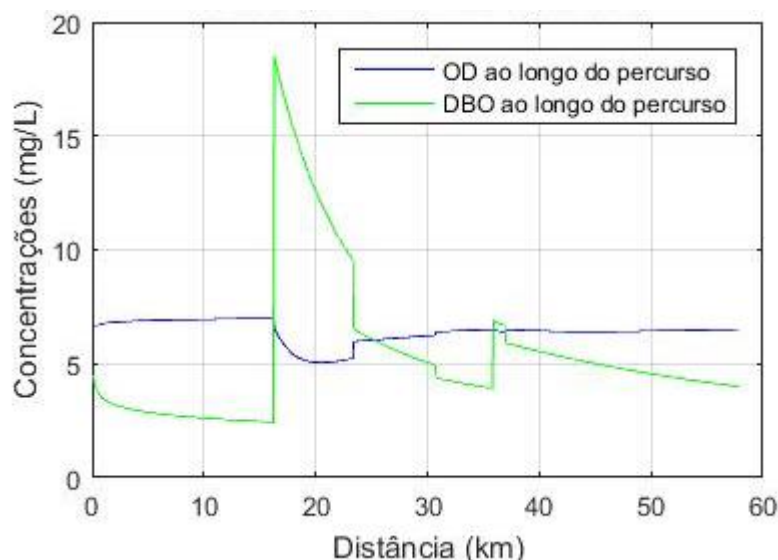
Tabela 7 – Concentrações críticas para o Cenário 1.

| Curso d'água         | OD (mg/L) | DBO (mg/L) | Amônia (mg/L) | Nitrito (mg/L) | Nitrato (mg/L) |
|----------------------|-----------|------------|---------------|----------------|----------------|
| Rio Pardo            | 5,04      | 18,46      | 3,58          | 0,49           | 0,38           |
| Rio Pardinho         | 5,60      | 14,12      | 3,01          | 0,39           | 0,24           |
| Ribeirão da Perdição | 6,59      | 4,43       | 1,69          | 0,30           | 0,18           |

As figuras 4, 6 e 8 apresentam os perfis de OD e DBO ao longo do rio Pardo, rio Pardinho e ribeirão da Perdição, respectivamente. As figuras 5, 7 e 9, por sua vez, apresentam os perfis das formas de nitrogênio ao longo destes cursos d'água.

Com base no estabelecido pela Resolução CONAMA nº357/2005 para rios classe 2 e a partir dos perfis de concentração gerados pelo modelo de qualidade, nota-se que mesmo com os lançamentos dos esgotos brutos na bacia hidrográfica do rio Pardo, as concentrações de OD mantiveram-se acima do limite mínimo de 5,0 mg/L. Quanto à DBO, os cursos d'água rio Pardo e rio Pardinho, apresentaram concentrações superiores ao limite máximo de 5,0 mg/L, apresentando-se em desacordo com a referida classe de qualidade. Com relação às formas de nitrogênio (amoniacal, nitrito e nitrato, mesmo com o aporte dos esgotos brutos, as concentrações estão de acordo com o preconizado para rios classe 2 que apresentem valores de pH abaixo de 7,5.

Figura 4 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardo para o Cenário 1.

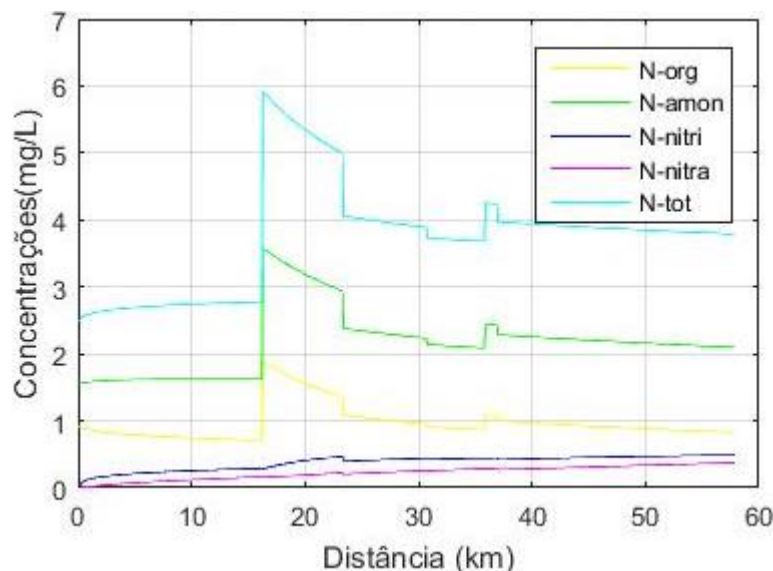


O perfil de DBO do rio Pardo (Figura 4) apresenta dois picos de concentração referentes ao aporte de esgotos domésticos dos municípios de Ibatiba (quilometro 16,3) e Lúna (quilometro 35,9), atingindo os valores de 18,46 mg/L, e 6,89 mg/L de DBO, respectivamente. Observam-se também neste perfil decréscimos da concentração de DBO nos três pontos em que o rio Pardo recebe o desague dos cursos d'água ribeirão São José, rio Pardinho e ribeirão da Perdição, nos quilômetros 23,4, 30,8 e 37,0, respectivamente. O ribeirão São José, por não receber carga orgânica proveniente de lançamentos pontuais de esgotos domésticos, contribui para o aumento na diluição da matéria orgânica no rio Pardo. O rio Pardinho recebe o lançamento dos esgotos domésticos do município de Irupi e contribui para o aumento da vazão do rio Pardo sem, contudo, provocar aumento da concentração de DBO. O ribeirão da Perdição recebe aportes de esgotos domésticos de pouca expressão provenientes dos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças e, em função da capacidade de autodepuração, suas águas chegam ao rio Pardo com baixas concentrações de matéria orgânica (no máximo menores que as encontradas no rio Pardo) contribuindo desta forma para a diluição da mesma.

O perfil de OD do rio Pardo (Figura 4) indica que o aumento na concentração de DBO causado pelo lançamento dos esgotos domésticos de Ibatiba provocou relevante consumo de OD, cuja concentração mínima atingiu o valor 5,04 mg/L. Nota-se, também, que com as entradas dos afluentes ribeirão São José, rio Pardinho e ribeirão

da Perdição ocorreu aumento, ainda que pouco expressivo, nas concentrações de OD.

Figura 5 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardo para o Cenário 1.



Os perfis de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal do rio Pardo (Figura 5) apresentaram picos de concentração nos pontos de lançamento dos esgotos domésticos referentes aos municípios de Ibatiba e Iúna, e quedas nas concentrações nos pontos em que o rio Pardo recebe seus tributários (ribeirão São José, rio Pardinho, e ribeirão da Perdição). As concentrações de nitrogênio orgânico estimadas pelo modelo de qualidade atingiram valores máximos 1,89 mg/L e 1,08 mg/L nos pontos de lançamento dos esgotos domésticos de Ibatiba e Iúna, respectivamente. As concentrações de nitrogênio amoniacal estimadas pelo modelo de qualidade atingiram 3,58 mg/L e 2,45 mg/L nos pontos de disposição final dos esgotos domésticos daqueles municípios.

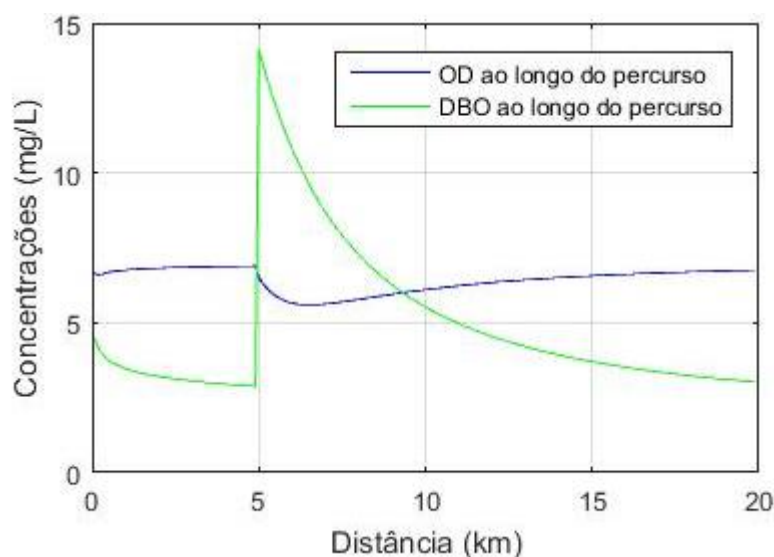
É importante observar que a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece padrões de qualidade para os compostos nitrogenados em corpos d'águas doces de acordo com a classe de enquadramento e a faixa de pH destas águas (Tabela 1). Classificando-se o rio Pardo como um rio classe 2 (função do fato de não ter passado pelo processo de enquadramento), para valores de pH inferiores a 7,5, a concentração máxima de nitrogênio amoniacal obtida pelo modelo de qualidade (3,58 mg/L) apresentou-se inferior ao padrão de qualidade estabelecido pela Resolução (3,7 mg/L). Entretanto, para valores de pH entre 7,5 e 8,0, a concentração máxima admissível para amônia total é 2,0 mg/L, condição que não seria atendida no rio Pardo

após a disposição final dos esgotos da sede do município de Ibatiba. Para o eventual enquadramento do rio Pardo como classe 1, as mesmas considerações seriam válidas, uma vez que os padrões de qualidade ambientais para os compostos nitrogenados estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 são idênticos para corpos d'água classes 1 e 2. Para eventual enquadramento do rio Pardo como curso d'água classe 3, classe de uso que apresenta padrões de qualidade menos restritivos, as concentrações de nitrogênio amoniacal só superariam o padrão estabelecido para valores de pH superiores a 8,0 (para valores de pH entre 8,0 e 8,5 a concentração máxima de nitrogênio amoniacal deve ser 2,2 mg/L).

Os perfis de nitrito e nitrato (Figura 5) apresentam um crescimento praticamente constante ao longo do percurso do rio Pardo. Este aumento gradativo na concentração destes parâmetros é consequência do processo de nitrificação, na qual a amônia é oxidada a nitrito, e o nitrito por sua vez a nitrato. Observa-se que após o aporte de esgotos domésticos de Ibatiba ocorre um crescimento da concentração de nitrito e nitrato, devido à entrada de nitrogênio amoniacal presente nos esgotos domésticos. O tributário ribeirão São José produz, por diluição, retração no crescimento dos perfis de nitrito e nitrato. Ao longo do trecho do rio Pardo simulado pelo modelo de qualidade, as concentrações de nitrito variavam entre zero e 0,49 mg/L, enquanto os de nitrato entre zero e 0,38 mg/L, ambos valores de concentrações inferiores aos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

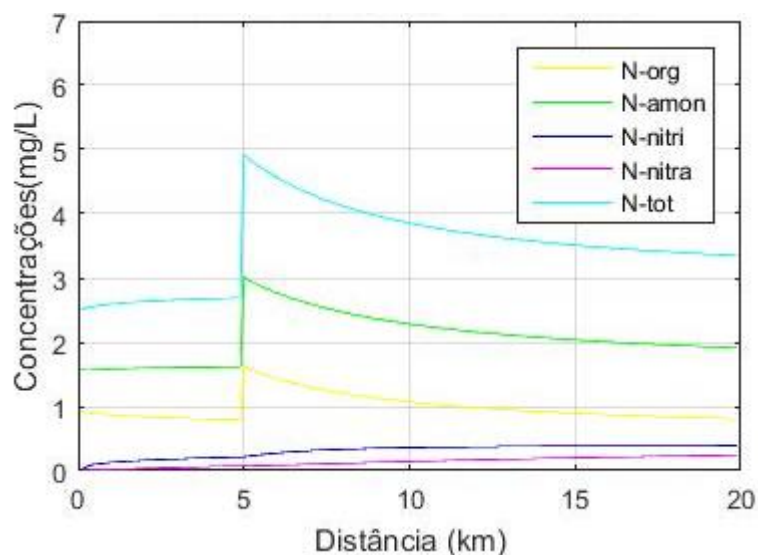
O perfil de nitrogênio total (Figura 5), obtido pelo somatório das concentrações das formas de nitrogênio (nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato), indica decaimento do nitrogênio ao longo do percurso, em função da sedimentação do nitrogênio orgânico particulado.

Figura 6 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardinho para o Cenário 1.



O perfil de DBO do rio Pardinho (Figura 6) apresenta um pico de concentração de 14,12 mg/L referente ao aporte de esgotos domésticos do município de Irupi (quilometro 5,0). O perfil de OD indica decaimento das concentrações em decorrência do aporte de matéria orgânica associado à disposição final dos esgotos domésticos de Irupi. A concentração mínima de OD estimada para o rio Pardinho foi 5,60 mg/L.

Figura 7 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardinho para o Cenário 1.



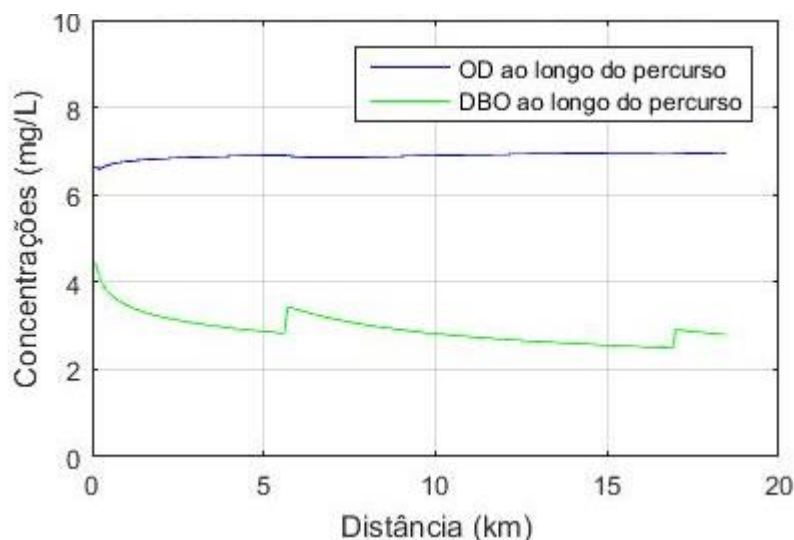
Os perfis de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal do rio Pardinho (Figura 7) apresentaram picos de concentração no ponto de disposição final dos esgotos domésticos do município de Irupi. As concentrações de nitrogênio orgânico estimadas pelo modelo de qualidade atingiram o valor 1,63 mg/L e as concentrações de nitrogênio amoniacal chegaram a 3,01 mg/L.

Assim como observado quando das simulações conduzidas para o rio Pardo, os padrões de qualidade não seriam atendidos nas seguintes condições:

- Para valores de pH superiores a 7,5, considerando-se eventuais enquadramentos nas classes 1 e 2;
- Para valores de pH superiores a 8,0, assumindo-se perspectiva de enquadramento na classe 3.

Os perfis de nitrito e nitrato (Figura 7) apresentam um crescimento praticamente constante ao longo do percurso estudado. As concentrações de nitrito atingem valor máximo 0,39 mg/L, enquanto as de nitrato variam entre zero e 0,24 mg/L, valores máximos que representam concentrações inferiores aos padrões de qualidade ambiental preconizados pela Resolução CONAMA nº357/2005. O perfil de nitrogênio total apresenta o decaimento do nitrogênio ao longo do percurso, em função da sedimentação do nitrogênio orgânico particulado.

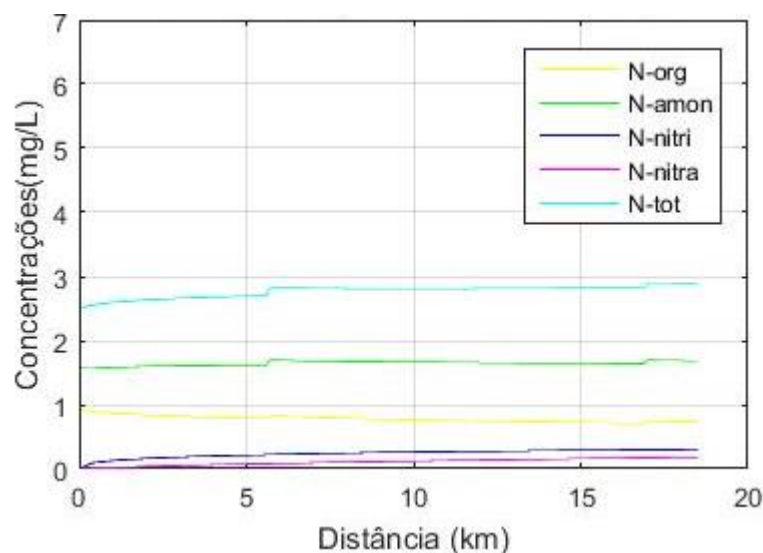
Figura 8 – Perfis de concentração de OD e DBO do ribeirão da Perdição para o Cenário 1.



O perfil de DBO do ribeirão da Perdição (Figura 8) apresenta dois pequenos picos de concentração, referentes ao aporte de esgotos domésticos das localidades Santíssima Trindade (quilometro 5,7) e Nossa Senhora das Graças (quilometro 17), atingindo os valores de 3,44 mg/L, e 2,91 mg/L de DBO, respectivamente. O perfil de OD deste curso d'água (Figura 8) apresenta variações pouco relevantes nos pontos de lançamento dos esgotos, uma vez que as vazões dos esgotos domésticas das referidas localidades são pouco expressivas, em função da pequena população, não

estabelecendo demanda significativa de oxigênio para a oxidação da matéria orgânica. A concentração mínima de OD ao longo do trecho simulado foi 6,59 mg/L. Observa-se, portanto, que em toda a extensão do ribeirão da Perdição os padrões ambientais de qualidade estabelecidos para os parâmetros DBO e OD para a classe 2 foram atendidos.

Figura 9 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do ribeirão da Perdição para o Cenário 1.



Os perfis de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal do ribeirão da Perdição (Figura 9) indicam pequenos acréscimos de concentração nos pontos de disposição final dos esgotos domésticos referentes às localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. As concentrações de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal estimadas pelo modelo de qualidade atingiram 0,83 mg/L e 1,69 mg/L, respectivamente, no lançamento dos esgotos da localidade Santíssima Trindade; e 0,74 mg/L e 1,69 mg/L quando da disposição dos esgotos de Nossa Senhora das Graças.

No ribeirão da Perdição, o padrão de qualidade fixado pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para nitrogênio amoniacal em rios classe 1 e 2 só seria superado naquelas condições em que o pH da água fosse superior a 8,0. Os padrões de qualidade para a classe 3 só não seriam atendidos para condições de qualidade que envolvessem valores de pH superiores a 8,5.

Os perfis de nitrito e nitrato do ribeirão da Perdição (Figura 8) apresentam crescimento constante ao longo do percurso simulado. As concentrações de nitrito variam entre

zero e 0,30 mg/L, enquanto que as de nitrato flutuam de zero a 0,18 mg/L. As concentrações máximas estimadas para nitrito e nitrato mantiveram-se abaixo dos padrões de qualidade estabelecidos para rios classe 2. O perfil de nitrogênio total, assim como ocorreu para os demais cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo, apresentou decaimento apenas em função do processo de sedimentação do nitrogênio orgânico particulado.

### 6.1.2. Perfis de Concentrações para o Cenário 2

A Tabela 8 apresenta as concentrações críticas dos parâmetros OD, DBO, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, obtidas pela simulação das condições de qualidade de água considerando as concentrações de nitrogênio orgânico e amoniacal nos efluentes zero e 80,0 mg/L, respectivamente.

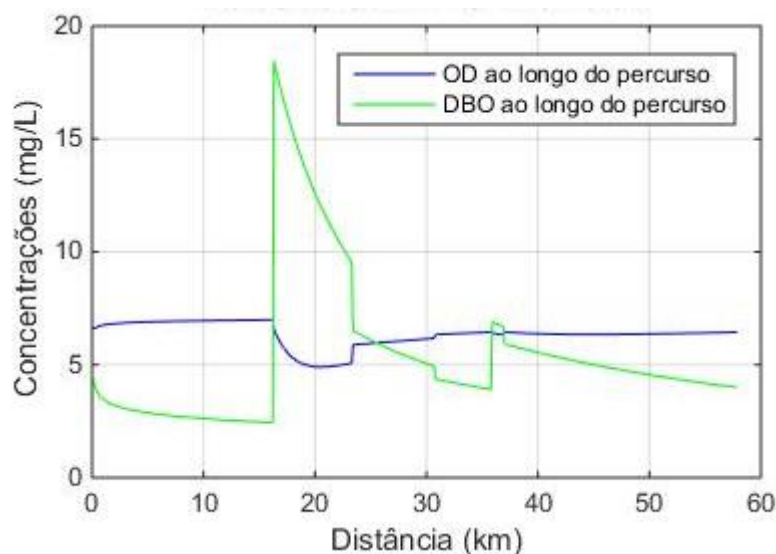
Tabela 8 – Concentrações críticas para o Cenário 2.

| Curso d'água         | OD (mg/L) | DBO (mg/L) | Amônia (mg/L) | Nitrito (mg/L) | Nitrato (mg/L) |
|----------------------|-----------|------------|---------------|----------------|----------------|
| Rio Pardo            | 4,90      | 18,46      | 4,79          | 0,55           | 0,41           |
| Rio Pardinho         | 5,51      | 14,12      | 3,86          | 0,43           | 0,27           |
| Ribeirão da Perdição | 6,59      | 4,43       | 1,74          | 0,31           | 0,18           |

As figuras 10, 12 e 14 apresentam os perfis de OD e DBO ao longo do rio Pardo, rio Pardinho e ribeirão da Perdição, respectivamente. As figuras 11, 13 e 15, por sua vez, os perfis das formas de nitrogênio ao longo destes cursos d'água.

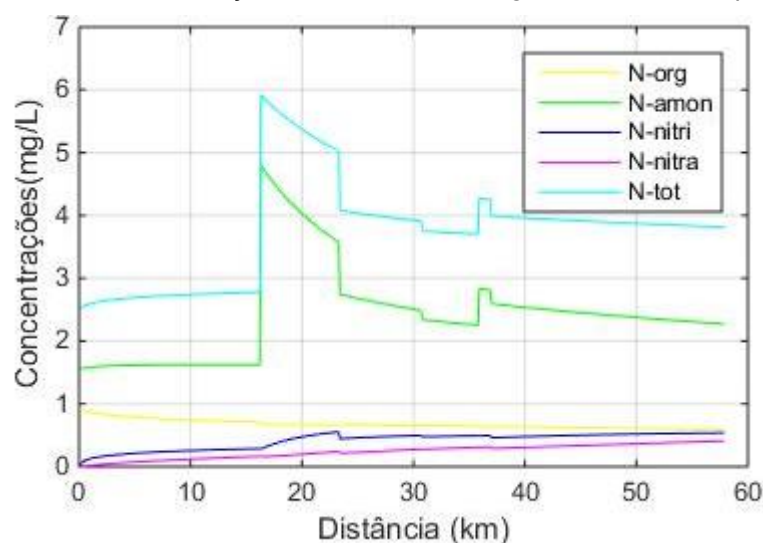
Nota-se que, diferentemente das concentrações de OD obtidas pelo modelo de qualidade para o cenário 1, as concentrações de OD no rio Pardo geradas para o cenário 2 infringiram o padrão de qualidade do oxigênio dissolvido definido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para rios classe 2. Observa-se, também, que quanto à DBO, as concentrações críticas obtidas para o cenário 2 são idênticas às aquelas obtidas para o cenário 1. Em relação às concentrações críticas das formas do nitrogênio, as concentrações de nitrogênio amoniacal superaram o padrão ambiental de qualidade para rios classe 2 nos rios Pardo e Pardinho.

Figura 10 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardo para o Cenário 2.



O perfil de DBO do rio Pardo (Figura 10) obtido pela simulação com o modelo de qualidade para o cenário 2 possui comportamento idêntico ao perfil de DBO obtido para o cenário 1. O perfil de OD para este cenário apresenta comportamento similar ao obtido para o cenário 1; as concentrações, no entanto, são menores e a concentração crítica de OD (4,90 mg/L) foi inferior ao padrão de qualidade para águas doces classe 2. A diminuição das concentrações de OD para o cenário 2 foi consequência do aumento da demanda nitrogenada, uma vez que este cenário assumiu o aumento da concentração de nitrogênio amoniacal a ser oxidado a nitrito e este a nitrato.

Figura 11 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardo para o Cenário 2.



O perfil de nitrogênio orgânico do rio Pardo (Figura 11) apresenta decréscimo constante, uma vez que, no cenário 2, assumiram-se nulas as concentrações de nitrogênio orgânico no esgoto bruto (desta forma, a disposição final dos esgotos não contribuía para o aumento da concentração deste constituinte no curso d'água). A concentração inicial do nitrogênio orgânico era 0,92 mg/L e atingiu 0,59 mg/L no final do trecho simulado, diminuição de concentração que ocorreu devido ao processo de amonificação.

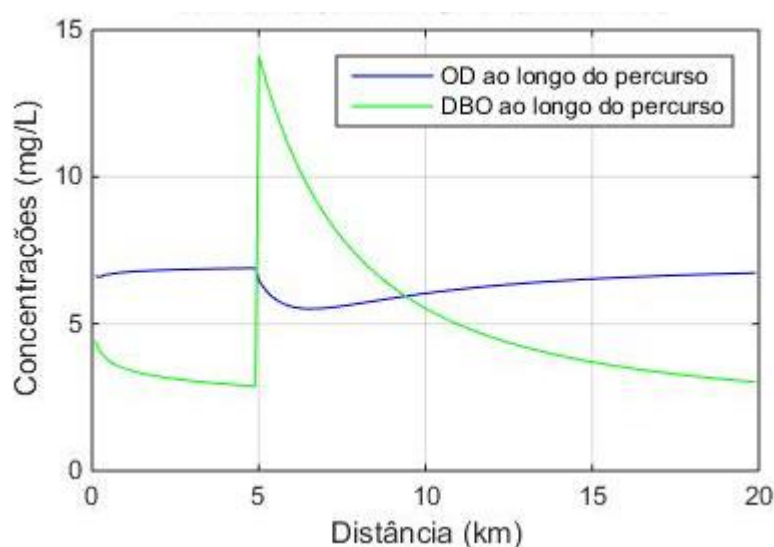
O perfil de nitrogênio amoniacal do rio Pardo obtido para o cenário 2 apresentou valores de concentrações similares aos do perfil para o cenário 1, com picos de concentração nos pontos de lançamento dos esgotos domésticos referentes aos municípios de Ibatiba e Lúna, e com quedas nas concentrações devido ao recebimento dos tributários. Os picos de concentração de nitrogênio amoniacal estimados pelo modelo de qualidade atingiram 4,79 mg/L e 2,84 mg/L nos pontos de disposição final dos esgotos domésticos daqueles municípios. Nota-se que o perfil de concentração de nitrogênio amoniacal ultrapassou padrão de qualidade estabelecido pela Resolução CONAMA nº357/2005, considerando o rio Pardo como rio classe 2, para qualquer valor de pH. Para o eventual enquadramento do rio Pardo como curso d'água classe 1, as mesmas considerações seriam válidas, uma vez que os padrões de qualidade ambientais para os compostos nitrogenados estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 são idênticos para corpos d'água classe 1 e 2. Para eventual enquadramento do rio Pardo como curso d'água classe 3, classe de uso que apresenta padrões de qualidade menos restritivos, a concentração de nitrogênio amoniacal só superaria o padrão estabelecido para valores de pH superiores a 8,0 (para pH entre 8,0 e 8,5 a concentração máxima de nitrogênio amoniacal deve ser 2,2 mg/L).

Os perfis de nitrito e nitrato do rio Pardo (Figura 11) apresentam concentrações crescentes em função da nitrificação. É relevante observar que o lançamento dos esgotos domésticos de Ibatiba produziu aumento da concentração de nitrito e nitrato, visto que o aporte destes esgotos acarreta o crescimento da concentração de nitrogênio amoniacal que, oxidado produz nitrito. Observa-se também que a chegada dos afluentes ribeirão São José, rio Pardinho e ribeirão da Perdição produz, por diluição, retração no crescimento dos perfis de nitrito e nitrato. Ao longo do trecho do

rio Pardo simulado pelo modelo de qualidade, as concentrações de nitrito variaram entre zero e 0,54 mg/L, enquanto as de nitrato entre zero e 0,41 mg/L, ambos valores de concentrações inferiores aos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005.

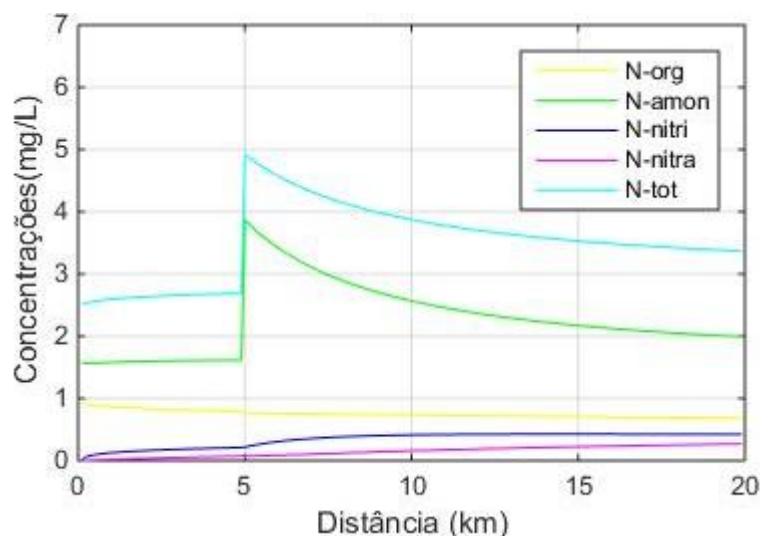
O perfil de nitrogênio total do rio Pardo (Figura 11) para o cenário 2 apresenta-se semelhante ao perfil obtido para o cenário 1, observando-se o decaimento do nitrogênio no curso d'água ao longo do trecho simulado.

Figura 12 – Perfis de concentração de OD e DBO do rio Pardinho para o Cenário 2.



O perfil de DBO do rio Pardinho (Figura 12) foi similar ao obtido para o cenário 1, com um pico de concentração de 14,12 mg/L referente ao lançamento de esgotos do município de Irupi (quilometro 5,0). O perfil de OD obtido para o cenário 2 apresenta concentrações de OD próximas às estimadas para o cenário 1, com decaimento das concentrações em decorrência do aporte de matéria orgânica associado à disposição final nos esgotos domésticos de Irupi. A concentração mínima de OD estimada para o rio Pardinho foi 5,51 mg/L.

Figura 13 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do rio Pardinho para o Cenário 2.

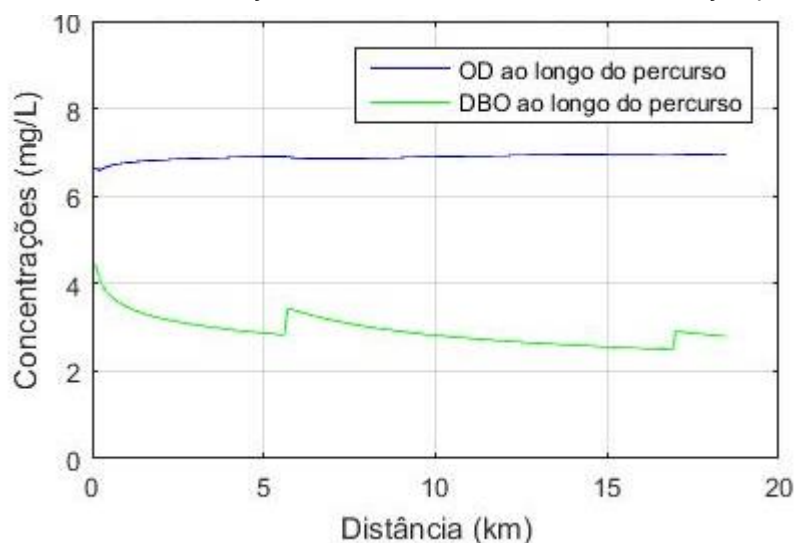


O perfil do nitrogênio orgânico do rio Pardinho (Figura 13) apresenta variação de concentrações entre 0,92 mg/L e 0,69 mg/L. O perfil do nitrogênio amoniacal tem um pico de concentração no ponto de lançamento dos esgotos domésticos de Irupi, atingindo o valor de 3,86 mg/L, superior ao padrão de qualidade ambiental estabelecido pela Resolução CONAMA nº357/2005 para este parâmetro para qualquer valor de pH para rios classes 1 e 2. Para eventual enquadramento do rio Pardo como curso d'água classe 3, as concentrações de nitrogênio amoniacal superariam o padrão estabelecido para valores de pH superiores a 8,0.

Os perfis de nitrito e nitrato do rio Pardinho (Figura 13) apresentam crescimento constante ao longo do trecho simulado para o cenário 2, assim como os perfis associados ao cenário 1. As concentrações de nitrito variam entre zero e 0,42 mg/L, enquanto as concentrações do nitrato variam entre zero e 0,27 mg/L. As concentrações destes parâmetros no trecho simulado encontram-se abaixo dos padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº357/2005 para todas as classes de qualidade dos corpos d'água.

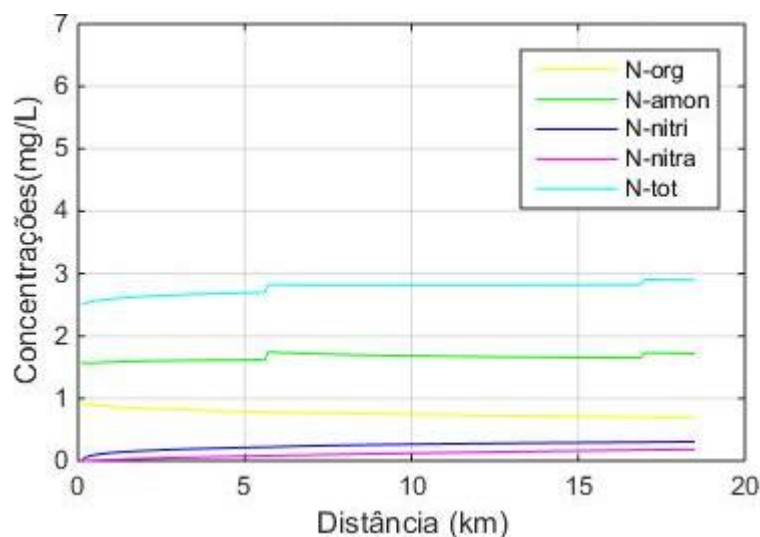
O perfil de nitrogênio total do rio Pardinho para o cenário 2 apresentou decaimento ao longo do percurso, em função da sedimentação do nitrogênio orgânico particulado.

Figura 14 – Perfis de concentração de OD e DBO do ribeirão da Perdição para o Cenário 2.



O perfil de DBO do ribeirão da Perdição (Figura 14) obtido a partir do segundo cenário de disposição de efluentes, apresenta valores de concentração idênticos ao do perfil obtido para o cenário 1, com dois pequenos picos de concentração referentes aos lançamentos dos esgotos domésticos das localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. O perfil de OD deste curso d'água (Figura 14) para o cenário 2, apresenta concentrações praticamente constantes, com concentração mínima igual a 5,52 mg/L. Observa-se, portanto, que em toda a extensão do ribeirão da Perdição os padrões ambientais de qualidade estabelecidos para os parâmetros DBO e OD para rios classe 2 e 3 foram atendidos; entretanto, considerando os padrões impostos para rios classe 1, ambos os parâmetros ultrapassaram os valores estabelecidos.

Figura 15 – Perfis de concentração das formas de nitrogênio do ribeirão da Perdição para o Cenário 2.



O perfil de nitrogênio orgânico do ribeirão da Perdição (Figura 15) apresenta concentrações variando entre 0,92 mg/L e 0,70 mg/L.

O perfil do nitrogênio amoniacal do ribeirão da Perdição possui dois pequenos picos de concentração referentes aos aportes de esgotos domésticos das localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, atingindo 1,74 mg/L e 1,73 mg/L, respectivamente. Quanto ao atendimento aos padrões de qualidade ambiental observa-se que para rios classes 1 e 2 o padrão de qualidade só seria superado naquelas condições em que o pH da água fosse superior a 8,0; para rios classe 3 o padrão só não seria atendido para condições de qualidade se os valores de pH fossem superiores a 8,5.

Tanto o perfil de nitrito quanto o perfil de nitrato do ribeirão da Perdição apresentam comportamento crescente; as concentrações de nitrito variam de zero a 0,31 mg/L enquanto as de nitrato flutuam de zero a 0,18 mg/L, não ultrapassando os padrões de qualidade ambiental estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para quaisquer classes de qualidade dos cursos d'água. O perfil de nitrogênio orgânico do ribeirão da Perdição apresentou decaimento apenas em função do processo de sedimentação do nitrogênio orgânico particulado.

## 6.2. EFICIÊNCIAS MÍNIMAS DE REMOÇÃO DE DBO E NITROGÊNIO

A presente seção apresenta os conjuntos de eficiências mínimas obtidas, para os diferentes pontos de disposição final de esgotos da bacia hidrográfica do rio Pardo, a partir do emprego combinado do algoritmo genético (AG) com modelo de qualidade de água. É importante ressaltar, conforme citado anteriormente, que pelo fato do AG constituir técnica metaheurística de otimização, o resultado obtido por uma simulação pode não representar o ótimo global. Por esta razão, para se garantir que o ótimo global (ou valor próximo ao ótimo global) tenha sido encontrado, foram realizadas, por cenário de disposição de efluente e por modelo de otimização empregado, 5 (cinco) simulações (APÊNDICE A). Resultados iguais ou muito próximos, para minimização do somatório do conjunto de eficiências sugerem obtenção de conjunto ótimo de eficiências no âmbito da bacia hidrográfica do rio Pardo.

O Modelo de Otimização 1 buscou as eficiências mínimas de remoção de DBO para os lançamentos de efluentes ao longo da bacia do Rio Pardo. O resultado da aplicação deste modelo foi utilizado pelo Modelo de Otimização 2 para a obtenção de eficiências mínimas de remoção de nitrogênio amoniacal para os referidos pontos de disposição final de efluentes. O Modelo de Otimização 3 buscou simultaneamente as eficiências mínimas de remoção de DBO e de nitrogênio amoniacal para os mesmos lançamentos.

Deve-se ressaltar que, embora a Resolução CONAMA nº 357/2005 determine padrões de qualidade ambiental para o nitrogênio nas formas de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato, o presente trabalho buscou valores de eficiências mínimas de remoção do nitrogênio amoniacal. Conforme observado no item 6.1, as simulações dos lançamentos dos esgotos brutos ao longo da bacia do rio Pardo, independentemente do cenário de disposição final assumido, conduziram a concentrações de nitrito e nitrato em conformidade com os padrões de qualidade ambiental, indicando não haver necessidade de redução das concentrações destas duas formas de nitrogênio nos cursos d'água.

Conforme previamente estabelecido, o trabalho avaliou as respostas dos modelos de otimização quando considerados cursos d'água pertencentes as diferentes classes de usos. As simulações com as restrições referentes à classe 1 de enquadramento não foram levadas a termo, uma vez que as condições de contorno adotadas pelo modelo de qualidade (valores assumidos diretamente de matéria orgânica gerada pela população rural residente da bacia) impuseram concentrações iniciais de DBO nos cursos d'água superiores aos padrões de qualidade ambiental desta classe. Desta forma, não seria possível o eventual enquadramento do curso d'água nesta classe de uso mesmo se não houvessem lançamentos de esgotos gerados na bacia. Como pode ser observados na Figura 4 (item 6.1.1), por exemplo, já nos primeiros quilômetros do trecho simulado do rio Pardo, antes mesmo do lançamento de esgotos do distrito sede de Ibatiba, a concentração de DBO apresenta valores superiores a 3,0 mg/L, padrão de qualidade ambiental estabelecido para a DBO em rios classe 1.

### 6.2.1. Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 1

A Tabela 9 reúne as eficiências mínimas de remoção de DBO estimadas a partir do emprego do primeiro modelo de otimização, considerando os padrões de qualidade ambiental estabelecidos para as classes 2 e 3 de águas doces.

Tabela 9 – Eficiências (em %) mínimas de remoção de DBO obtidos pelo Modelo de Otimização 1.

| Classe de enquadramento das águas doces | Ibatiba | Irupi | Lúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças | Valor da função objetivo |
|-----------------------------------------|---------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 2                                       | 85      | 82    | 19   | 0                   | 0                              | 186                      |
| 3                                       | 53      | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 90                       |

Pode-se observar que, considerando-se os padrões de qualidade ambientais estabelecidos para a classe de qualidade 2, apenas as sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna demandariam tratamento dos efluentes para remoção de DBO. Ao se analisar os padrões de qualidade ambiental estabelecidos para corpos d'água classe 3, apenas Ibatiba e Irupi necessitariam promover remoção de DBO do esgoto antes da disposição final no corpo d'água. A indicação de eficiência de remoção nula sugere que os despejos de esgotos das demais localidades da bacia por si só não confeririam aos cursos d'água receptores características em desacordo com suas classes de qualidade.

Nas figuras de 16 a 23 são apresentados os perfis de concentração de DBO e OD ao longo do rio Pardo e do rio Pardinho após incorporação das eficiências de remoção de DBO reunidas na Tabela 10. Os perfis de concentração de DBO e OD ao longo do ribeirão da Perdição, curso d'água que recebe os lançamentos de esgotos gerados pelos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, não foram apresentados pois reproduziram aqueles associados à disposição final de efluentes brutos (Figura 8). A indicação de eficiências nulas de remoção de DBO para estes povoados sugerem que seus esgotos poderiam ser assimilados em função da capacidade de autodepuração do corpo receptor sem que as concentrações remanescentes de OD e DBO se apresentassem em desacordo com os padrões de qualidade fixados para rios classe 2 ou 3.

Figura 16 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2.

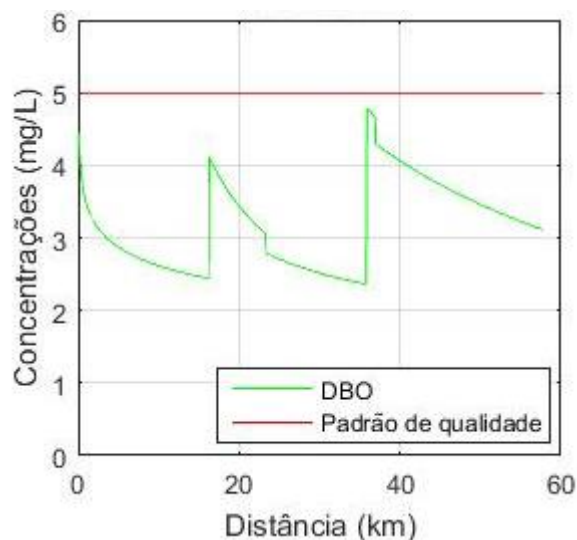


Figura 17 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2.

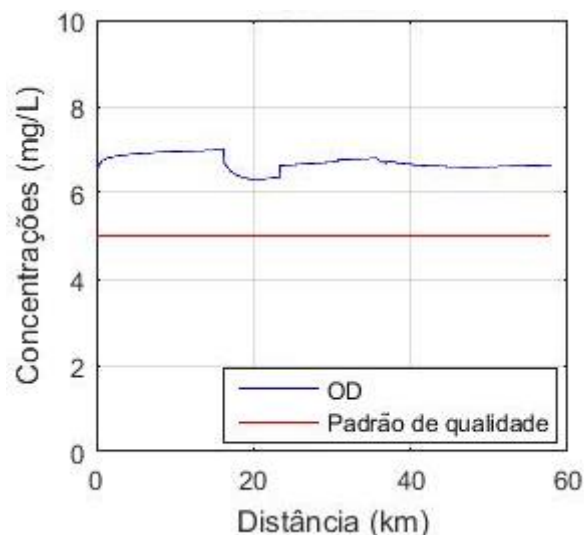


Figura 18 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2.

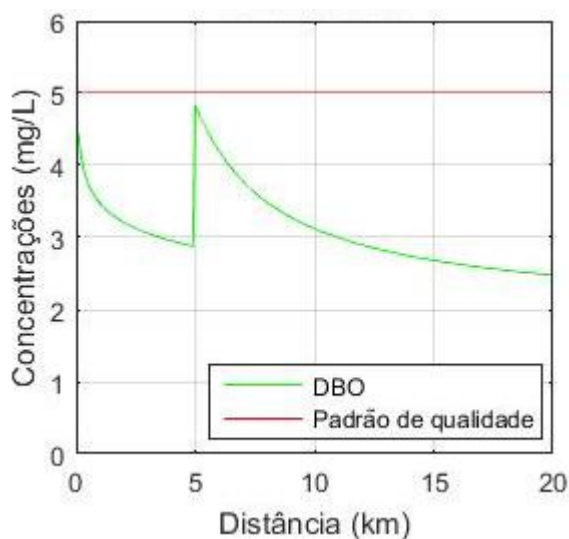


Figura 19 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 2.

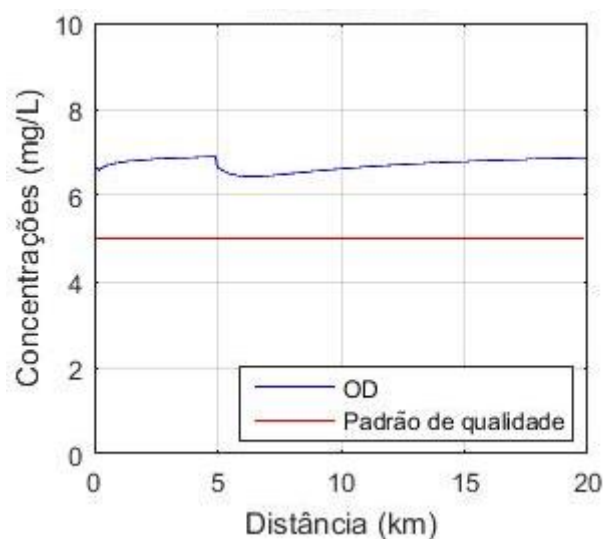


Figura 20 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3.

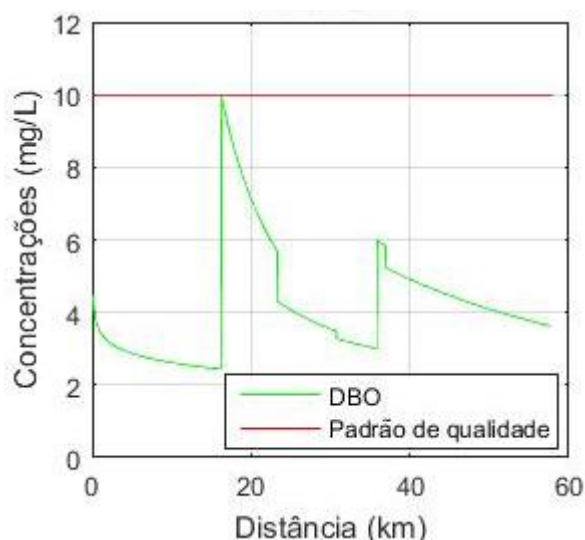


Figura 21 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3.

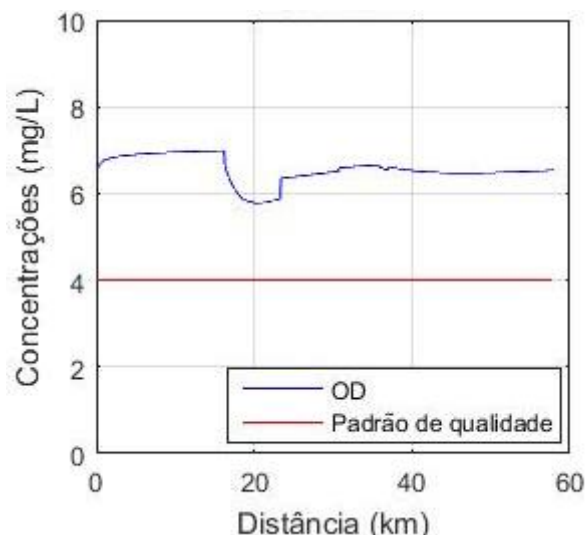


Figura 22 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3.

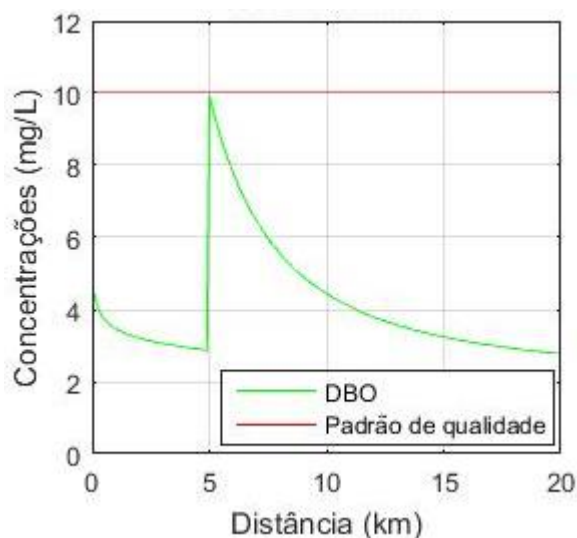
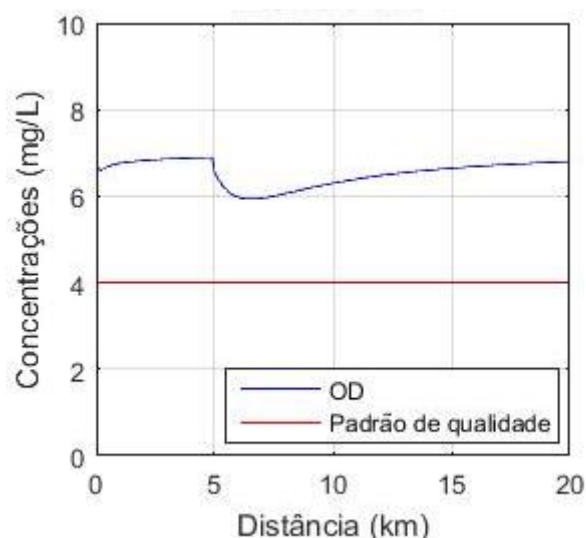


Figura 23 – Perfil de concentração de OD no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 1 e da perspectiva de enquadramento na classe 3.



Ao se observar as figuras 16 a 23 pode-se constatar que, como os padrões de qualidade constituíram restrições dos modelos de otimização, as concentrações mínimas de OD e máximas de DBO, nos cursos d'água objetos das simulações, respeitaram os limites impostos para as diferentes classes de uso.

### **6.2.2. Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 2**

As eficiências mínimas de remoção de amônia foram estimadas pelo Modelo de Otimização 2 a partir das eficiências mínimas de remoção de DBO obtidas pelo Modelo de Otimização 1 e para os dois cenários de disposição de efluentes assumidos neste trabalho. A avaliação conjunta das eficiências de remoção dos compostos de carbono e nitrogênio foi realizada visando garantir concentrações de oxigênio dissolvido suficientes para que fosse possível atender às demandas carbonácea e nitrogenada assegurando-se, adicionalmente, o atendimento dos padrões de qualidade ambiental. As tabelas 10 e 11 apresentam as eficiências de remoção de DBO e amônia para diferentes faixas de pH, considerando os cursos d'água da bacia do rio Pardo como rios classe de qualidade 2 ou 3, respectivamente.

Tabela 10 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 considerando rios classe 2 de enquadramento.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%)  |                 |                 |                     |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba         | Irupi           | Iúna            | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 85 <sup>1</sup> | 82 <sup>1</sup> | 19 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 0                        |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 0               | 0               | 0               | 0                   | 0                  |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 85 <sup>1</sup> | 82 <sup>1</sup> | 19 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 184                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 80              | 71              | 33              | 0                   | 0                  |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 85 <sup>1</sup> | 82 <sup>1</sup> | 19 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 42                       |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 34              | 8               | 0               | 0                   | 0                  |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 85 <sup>1</sup> | 82 <sup>1</sup> | 19 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 214                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 88              | 82              | 44              | 0                   | 0                  |                          |

Nota: <sup>1</sup>Os valores de eficiências de remoção de DBO utilizadas nesta simulação foram as obtidas pelo Modelo de Otimização 1.

Tabela 11 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 considerando rios classe 3 de enquadramento.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%)  |                 |                |                     |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba         | Irupi           | Iúna           | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 0                        |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0               | 0               | 0              | 0                   | 0                  |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 0                        |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0               | 0               | 0              | 0                   | 0                  |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 126                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 69              | 57              | 0              | 0                   | 0                  |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 0                        |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0               | 0               | 0              | 0                   | 0                  |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 0                        |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0               | 0               | 0              | 0                   | 0                  |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 53 <sup>1</sup> | 37 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup> | 0 <sup>1</sup>      | 0 <sup>1</sup>     | 174                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 89              | 73              | 12             | 0                   | 0                  |                          |

Nota: <sup>1</sup>Os valores de eficiências de remoção de DBO utilizadas nesta simulação foram as obtidas pelo Modelo de Otimização 1.

Ao se analisar os resultados obtidos nas simulações sumarizados por meio das tabelas 10 e 11, são consideradas relevantes as seguintes observações:

- As eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças foram nulas, assim como as eficiências de remoção de DBO estimadas pelo Modelo de Otimização 1 para estes povoados. Assim como observado quando da apropriação de eficiências de remoção de matéria orgânica, os efluentes gerados nos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças não demandam tratamento para remoção de amônia antes da disposição final, uma vez que o corpo d'água receptor (ribeirão da Perdição) possui capacidade de autodepuração suficiente para manter as concentrações de amônia abaixo dos padrões de qualidade ambientais associados às diferentes classes de uso.
- Elevações de pH conduzem o deslocamento do equilíbrio químico no sentido da espécie mais tóxica de amônia (amônia não-ionizada), fazendo com que os padrões ambientais apresentem-se mais rigorosos em ambientes básicos. Como consequência, quando incorporadas as restrições do Modelo de Otimização conformadas pelos padrões de qualidade associados à valores mais elevados de pH, foram apropriadas eficiências mais elevadas para remoção de amônia.
- Os grupos de simulações do segundo cenário de disposição final de efluentes produziram eficiências de remoção de amônia superiores àquelas apropriadas para o primeiro cenário. Este fato foi consequência da forma de distribuição do nitrogênio total entre o nitrogênio orgânico e o nitrogênio amoniacal. No segundo cenário assumiu-se todo o nitrogênio orgânico já convertido em amônia.

Analisando-se exclusivamente os resultados reunidos na Tabela 10, apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- Para ambos os cenários foram geradas eficiências de remoção de amônia apenas para as duas primeiras faixas de pH (inferior ou igual a 7,5 e entre 7,5 e 8,0), faixas que apresentam padrões de qualidade ambiental menos restritivos. Para valores de pH superiores a 8,0 não foi possível a determinação das eficiências mínimas de remoção de amônia em função de dois aspectos:

- a) a concentração de nitrogênio amoniacal assumida para os cursos d'água (1,0 mg/L) apresentou-se igual ou superior ao padrão de qualidade estabelecido para condições de pH superiores a 8,0 e b) a eficiência de remoção de 90% constituiu, no modelo de otimização, restrição que definiu o limite superior do espaço de busca para eficiências.
- Para águas com pH inferior ou igual a 7,5, considerando-se o cenário 1 de disposição de efluentes, as eficiências de remoção de nitrogênio amoniacal obtidas foram nulas para os cinco pontos de disposição final, indicando que os corpos d'água seriam capazes de assimilar a carga de nitrogênio amoniacal recebida e manter as concentrações deste constituinte dentro do padrão de qualidade ambiental para esta faixa de pH. Para a mesma condição de lançamento, mas para águas com pH entre 7,5 e 8,0, existe necessidade de remoção de nitrogênio amoniacal apenas nos efluentes gerados nas sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna, empregando-se eficiências mínimas de 80%, 71% e 33%, respectivamente.
  - Para o cenário 2, considerando-se as águas com pH inferior ou igual a 7,5, Ibatiba e Irupi apresentaram necessidade de remoção de nitrogênio amoniacal. Os esgotos gerados na sede do município de Ibatiba demandariam remoção mínima de 34%. Para Irupi a remoção mínima para o nitrogênio amoniacal seria de 8%. Para esta condição de lançamento, se as águas apresentarem com pH entre 7,5 e 8,0, ocorreria aumento na necessidade remoção de nitrogênio amoniacal, impondo aos efluentes gerados nas sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna eficiências de remoção 88%, 82% e 44%, respectivamente.

A partir da análise particular da Tabela 11:

- Para ambos os cenários foram geradas eficiências de remoção de amônia apenas para as três primeiras faixas de pH (inferior ou igual a 7,5, entre 7,5 e 8,0 e entre 8,0 e 8,5). Para valores de pH superiores a 8,5 não foi possível determinação das eficiências mínimas de remoção de amônia em função de dois aspectos: a) a concentração de nitrogênio amoniacal assumida para os cursos d'água (1,0 mg/L) apresentou-se igual ou superior ao padrão de qualidade estabelecido para condições de pH superiores a 8,5 e b) a eficiência

de remoção 90% constituiu, no modelo de otimização, restrição que definiu o limite superior do espaço de busca para eficiências.

- Para ambos os cenários de disposição de efluentes, assumindo-se valores de pH inferiores ou iguais a 8,0, as eficiências de remoção de amônia obtidas para os cinco pontos de lançamentos foram nulas (as concentrações de amônia no corpo d'água apresentaram-se invariavelmente abaixo dos padrões de qualidade ambiental). Para a cenário 1, para a faixa de pH entre 8,0 e 8,5, somente as localidades de Ibatiba e Irupi demandariam remoção de nitrogênio amoniacal, com eficiências mínimas de remoção de 69% e 57%, respectivamente. Para o segundo cenário, a remoção de nitrogênio amoniacal também se mostrou necessária para Lúna; as eficiências mínimas de remoção de amônia foram 89%, 73% e 12% para as localidades de Ibatiba, Irupi e Lúna, respectivamente.

As figuras 24 a 29 apresentam os perfis de concentração de amônia ao longo dos cursos d'água, elaborados a partir da aplicação das eficiências estimadas por este modelo para águas classe 2. Perfis similares para águas classe 3 encontram-se apresentados nas figuras 30 a 33. Foram apresentados perfis apenas para as situações em que os corpos d'água recebiam lançamentos de efluentes tratados.

Figura 24 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

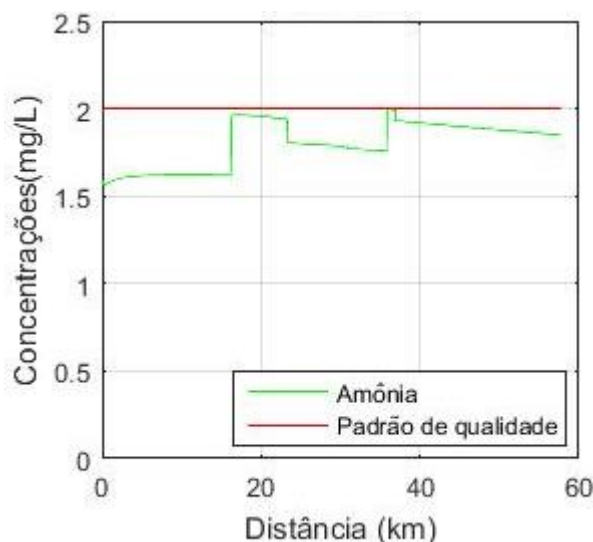


Figura 25 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

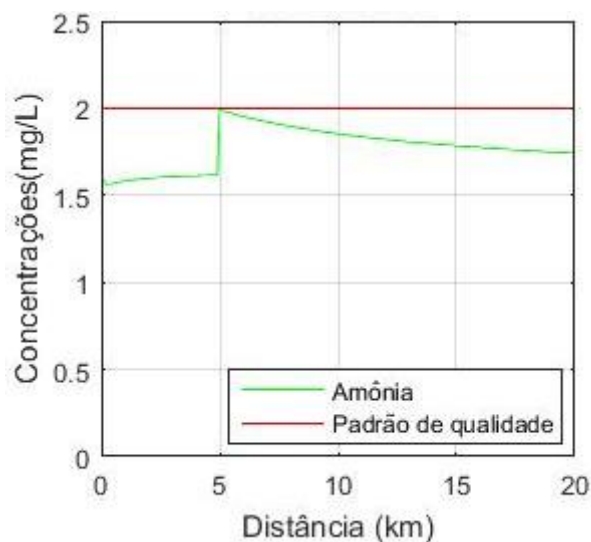


Figura 26 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

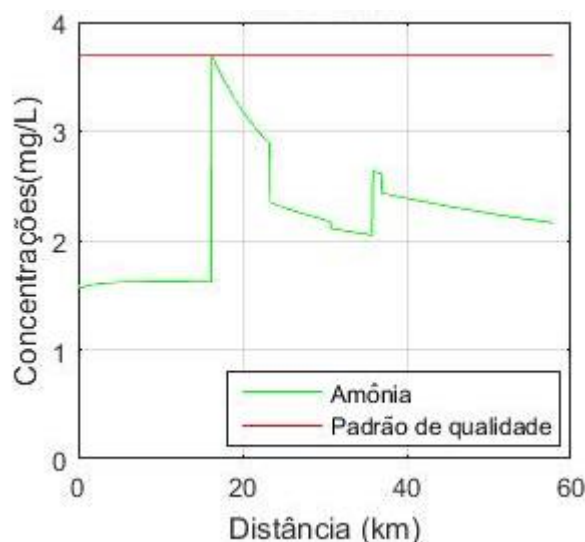


Figura 27 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

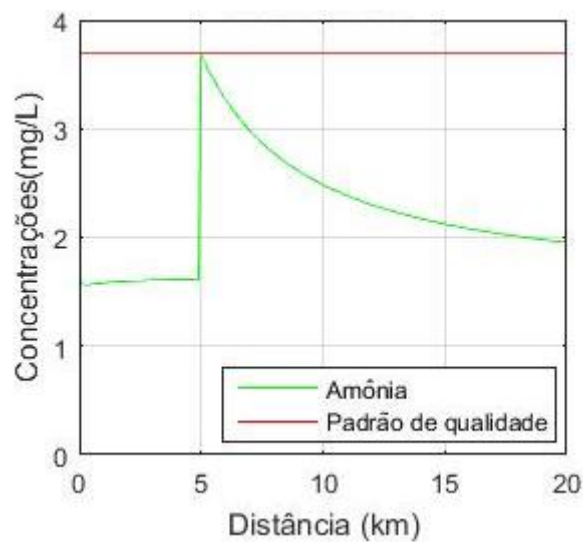


Figura 28 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

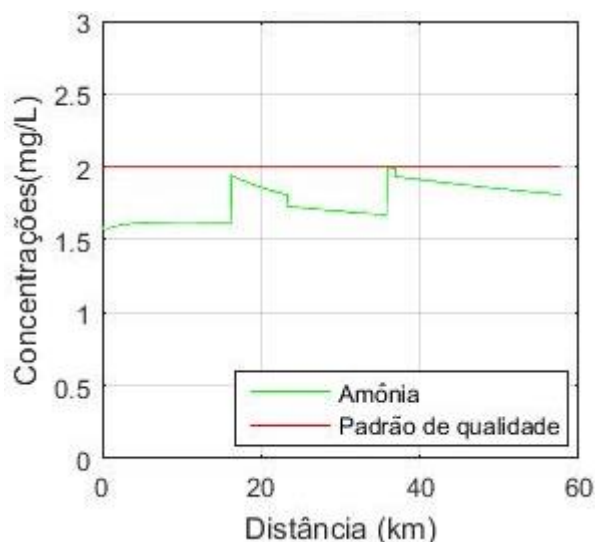


Figura 29 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

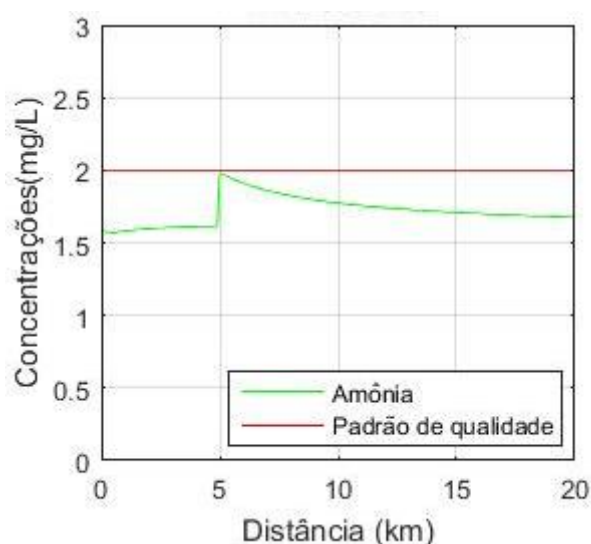


Figura 30 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

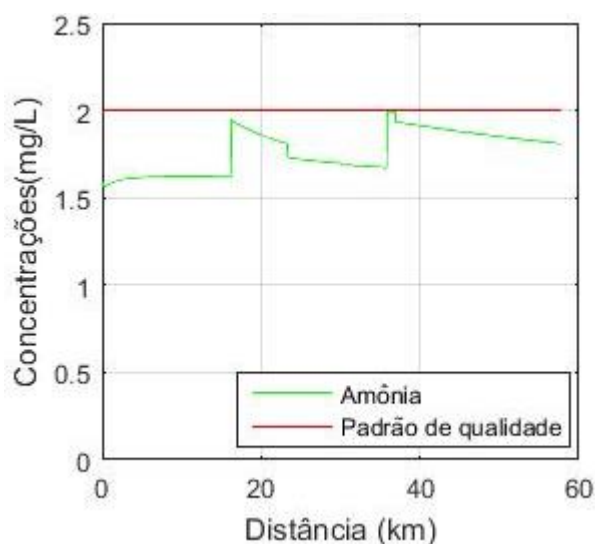


Figura 31 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

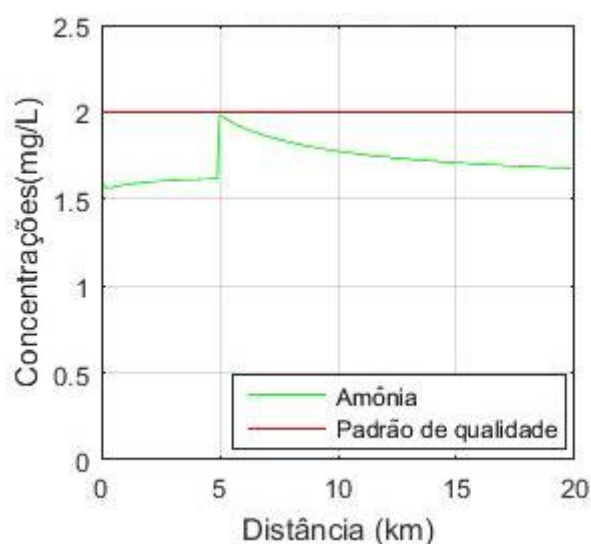


Figura 32 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

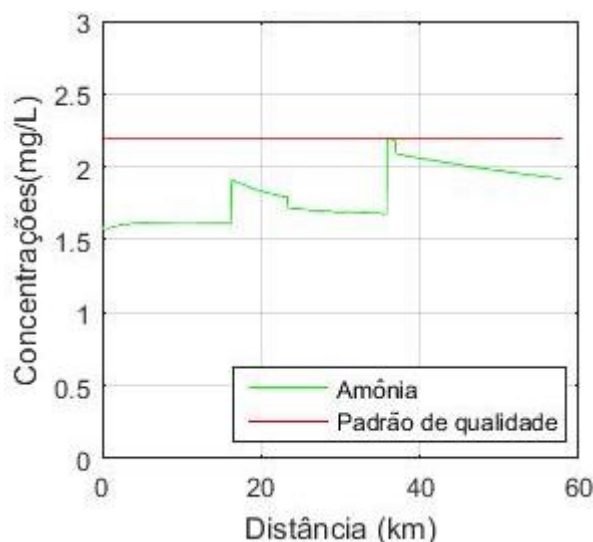
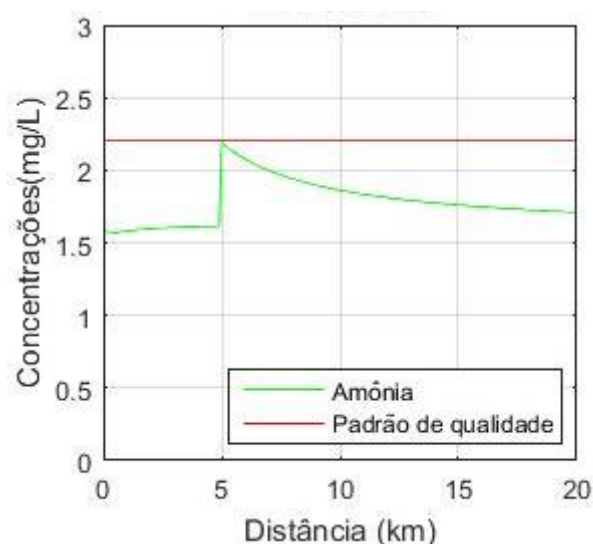


Figura 33 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.



Da simples inspeção das figuras 24 a 33 é possível observar que as eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 permitiram que as concentrações de amônia atingissem o limite máximo estabelecido pelo padrão de qualidade ambiental para as diferentes classes de qualidade, o que evidencia que os valores de eficiências estimados foram os menores possíveis.

### 6.2.3. Conjunto de Eficiências de Remoção Estimado pelo Modelo de Otimização 3

Os conjuntos de eficiências mínimas de remoção de DBO e nitrogênio amoniacal estimados pelas simulações que empregaram o Modelo de Otimização 3, para ambos os cenários de disposição de efluentes analisados neste trabalho e considerada a perspectiva de enquadramento dos cursos d'água da bacia na classe 2, encontram-se apresentados na Tabela 12. As eficiências mínimas estimadas, quando do eventual enquadramento na classe 3, estão reunidas na Tabela 13.

Tabela 12 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando rios classe 2 de enquadramento.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 15   | 0                   | 0                              | 180                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 87             | 81    | 13   | 0                   | 0                              | 365                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 80             | 71    | 33   | 0                   | 0                              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 15   | 0                   | 0                              | 222                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 34             | 8     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 85             | 81    | 15   | 0                   | 0                              | 396                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 90             | 82    | 43   | 0                   | 0                              |                          |

Tabela 13 – Eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando rios classe 3 de enquadramento.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 90                       |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 90                       |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 216                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 69             | 57    | 0    | 0                   | 0                              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 90                       |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 90                       |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 53             | 37    | 0    | 0                   | 0                              | 263                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 83             | 73    | 17   | 0                   | 0                              |                          |

A simples inspeção das Tabelas 12 e 13 permite constatar que as eficiências de remoção de DBO e de amônia, estimadas pelo Modelo de Otimização 3, foram muito próximas às do Modelo de Otimização 2 (apresentadas nas tabelas 10 e 11), conservando-se válidas as considerações feitas para o conjunto de eficiências apropriadas por meio do segundo modelo de otimização.

Ao se analisar exclusivamente os resultados resumidos na Tabela 12, observa-se que:

- Para primeiro cenário de disposição de efluentes e valores de pH inferiores ou iguais a 7,5, as eficiências de remoção de DBO foram 84%, 81% e 15% para as sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna, respectivamente, e nulas para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. As eficiências de remoção de amônia foram nulas para as cinco localidades. Para a faixa de pH entre 7,5 e 8,0, as eficiências de remoção de DBO foram 87%, 81% e 13% para Ibatiba, Irupi e Lúna, respectivamente, e nulas para os povoados; as eficiências de remoção de amônia para Ibatiba, Irupi e Lúna foram 80%, 71% e 33%, respectivamente, e nulas para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças.
- No segundo cenário de disposição de efluentes, para a primeira faixa de pH (pH inferior ou igual a 7,5), as eficiências de remoção de DBO foram idênticas às estimadas para a mesma faixa de pH no primeiro cenário; as eficiências de remoção de amônia, por sua vez, foram 34% para Ibatiba, 8% para Irupi e nulas para as demais localidades. Para a faixa de pH entre 7,5 e 8,0, as eficiências de remoção DBO foram 85% (Ibatiba), 81% (Irupi) e 15% (Lúna), enquanto as eficiências de remoção de amônia foram 90% (Ibatiba), 82% (Irupi) e 43% (Lúna). Os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças apresentaram eficiências nulas tanto para remoção de DBO quanto para a de amônia.

Quanto da análise da Tabela 13, observou-se que:

- Para todas as faixas de pH, independentemente do cenário de simulação considerado, as eficiências de remoção de DBO apresentaram os mesmos valores: 53% para a Ibatiba, 37% para Irupi e nulas para as demais localidades. É relevante observar que este conjunto de eficiências de remoção de DBO

reproduz os resultados obtidos por meio do Modelo de Otimização 1 para águas classe 3.

- Quanto às eficiências de remoção de amônia, para ambas as classes de enquadramento e para as duas primeiras faixas de pH (inferior ou igual a 7,5 e entre 7,5 e 8,0), os valores foram nulos para os cinco pontos de lançamento. Para a faixa de pH entre 8,0 e 8,5, considerando o primeiro cenário de disposição de efluentes, as eficiências de remoção de amônia foram 69% para Ibatiba, 57% para Irupi, e nulas para as demais localidades. Para o segundo cenário, assumiram valores de 83% para Ibatiba, 73% para Irupi, 17% para Lúna e nulas para os dois povoados.

Os perfis de concentração de DBO, OD e nitrogênio amoniacal elaborados a partir do conjunto de eficiências estimadas por meio do Modelo de Otimização 3, para águas classe 2 e para os diferentes cenários de disposição de efluentes, encontram-se apresentados nas figuras de 34 a 57. Perfis de DBO, OD e nitrogênio amoniacal para águas classe 3 encontram-se apresentados nas figuras de 58 a 69. Estes perfis são referentes às águas com pH entre 8,0 e 8,5, para ambos os cenários considerados, visto que apenas para esta condição de pH foi necessária remoção de amônia.

Figura 34 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

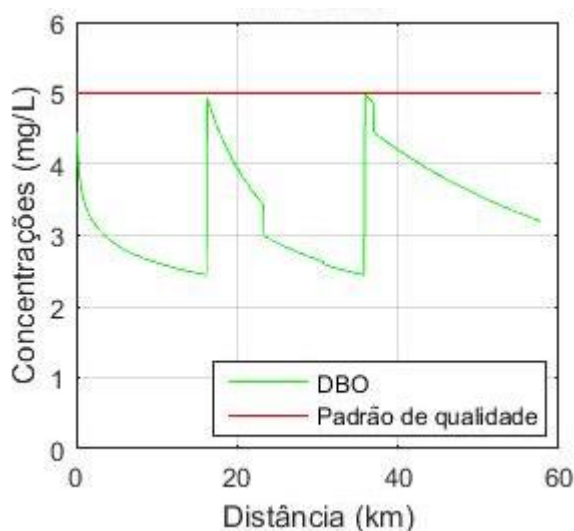


Figura 35 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

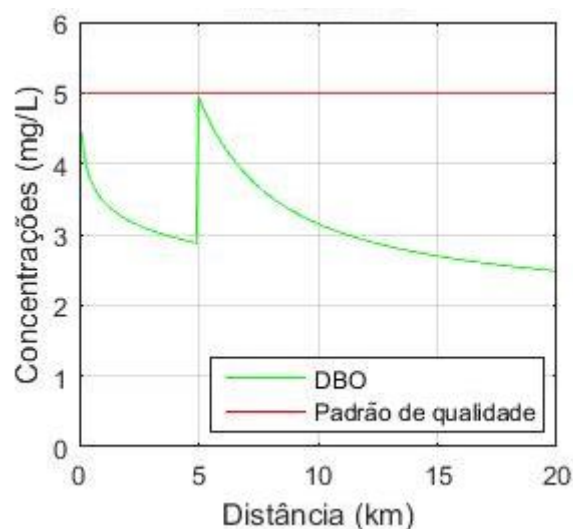


Figura 36 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

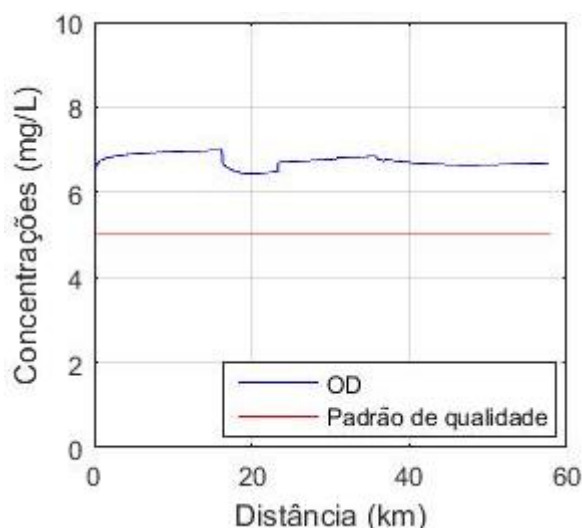


Figura 37 – Perfil de concentração de OD no rio Pardiniho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

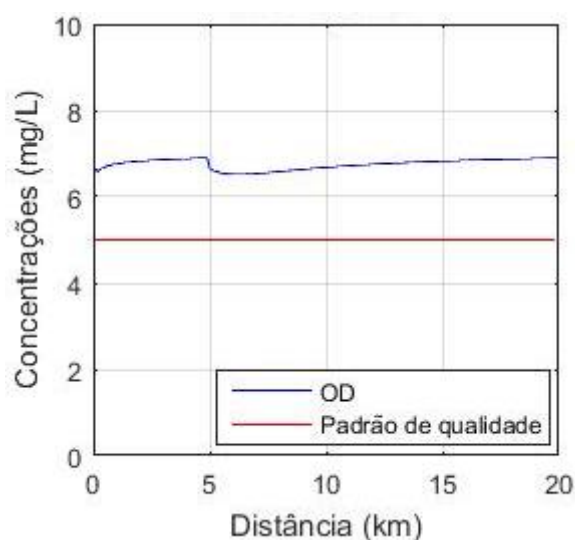


Figura 38 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

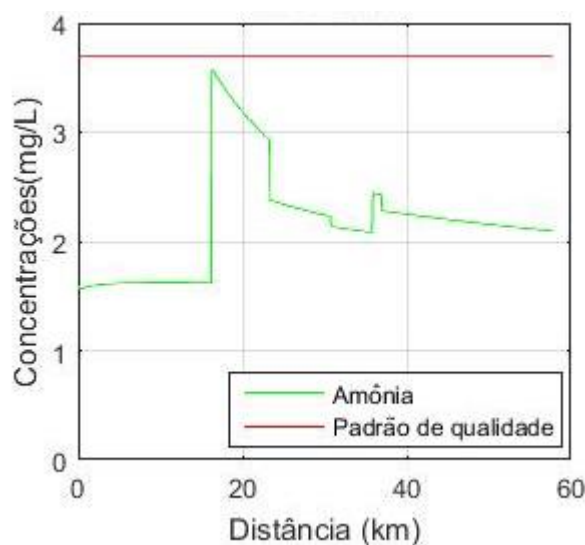


Figura 39 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardiniho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

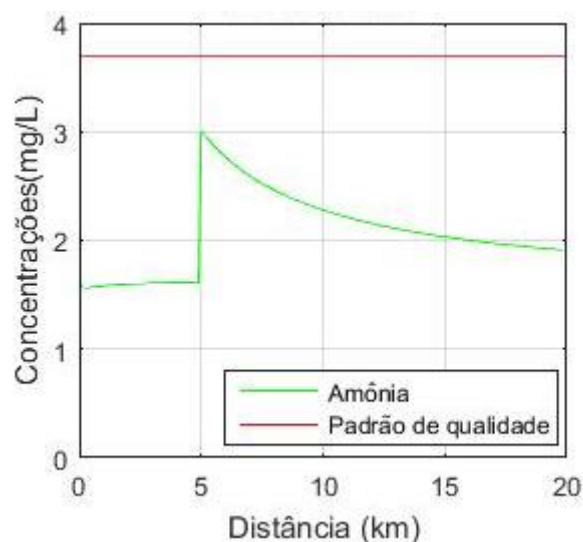


Figura 40 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

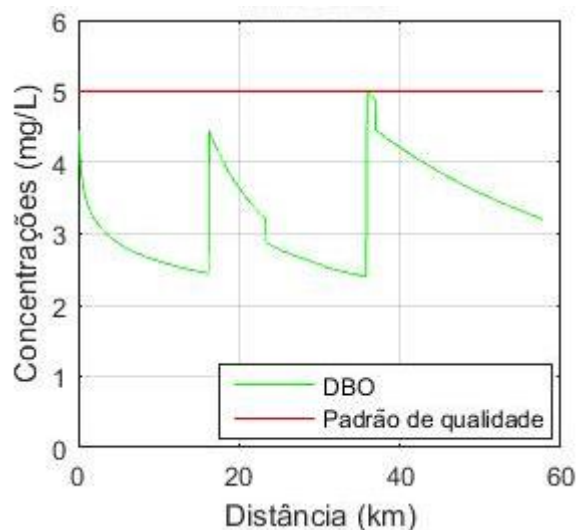


Figura 41 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

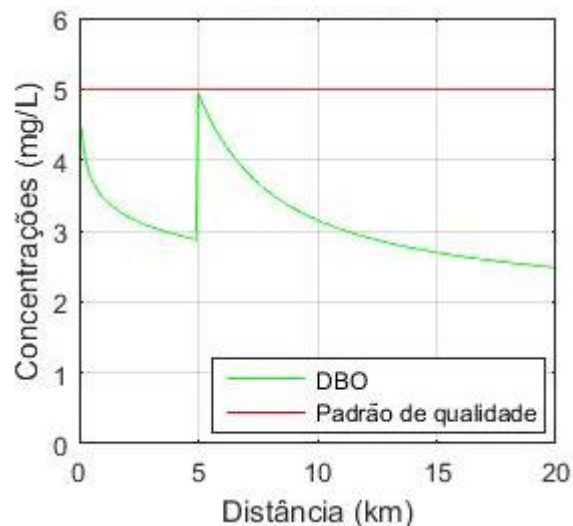


Figura 42 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

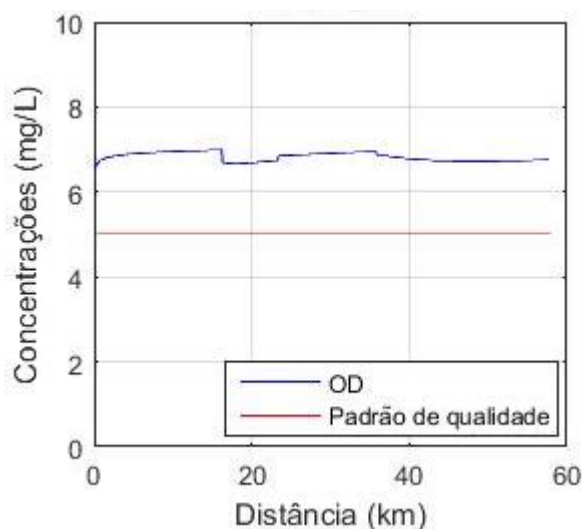


Figura 43 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

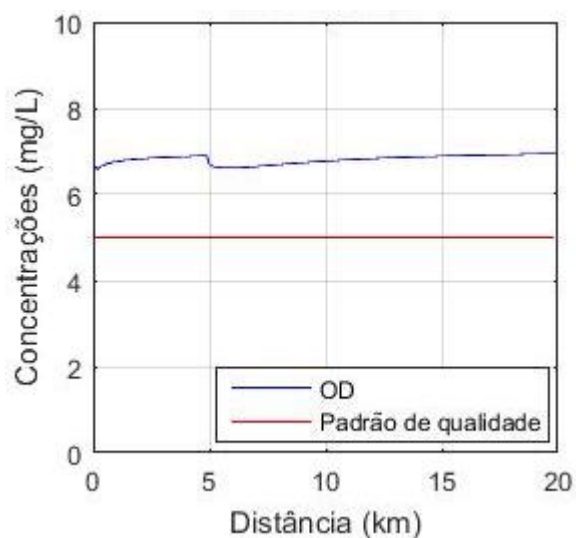


Figura 44 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

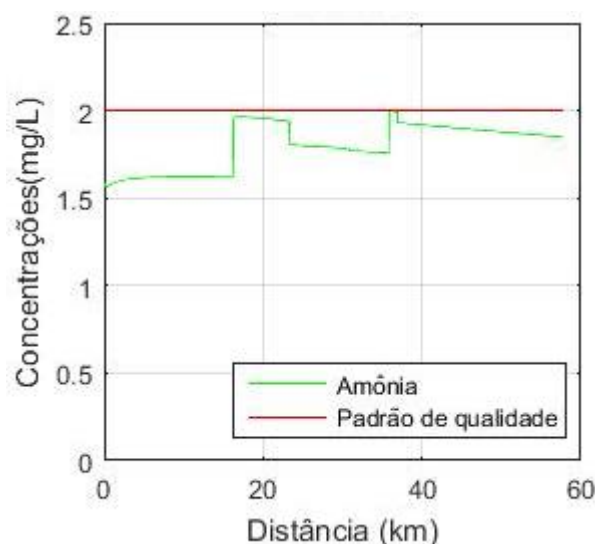


Figura 45 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

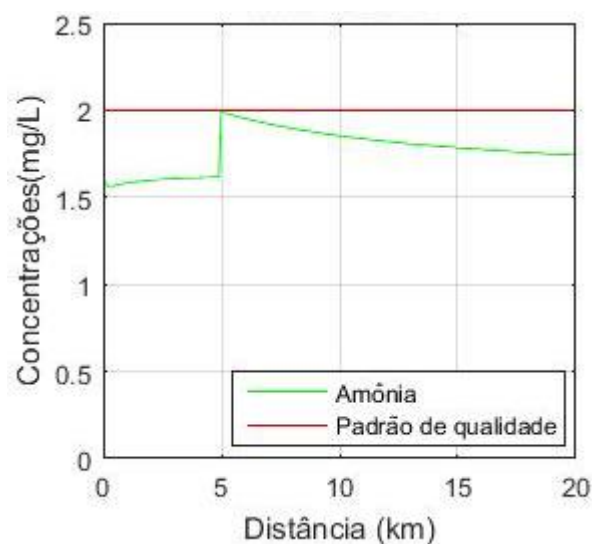


Figura 46 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

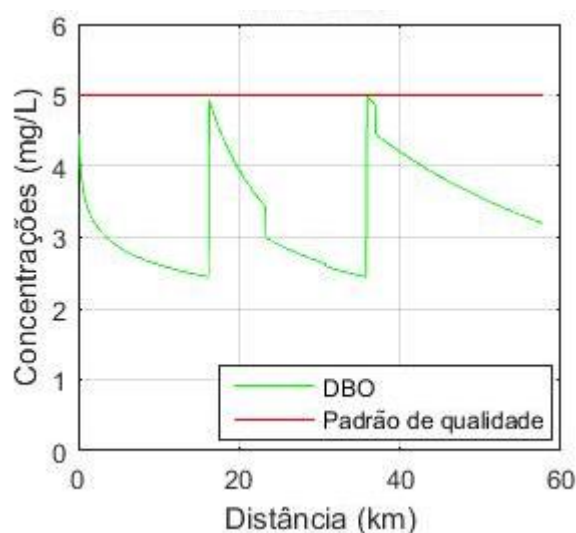


Figura 47 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

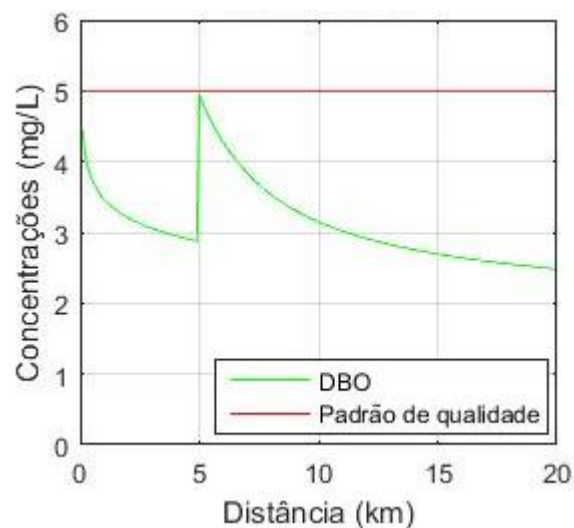


Figura 48 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

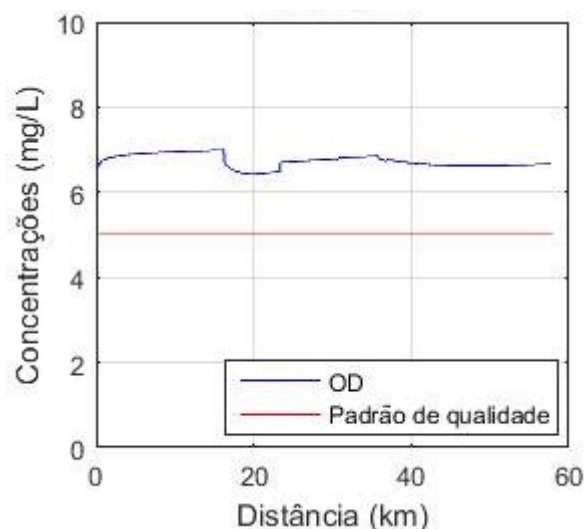


Figura 49 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

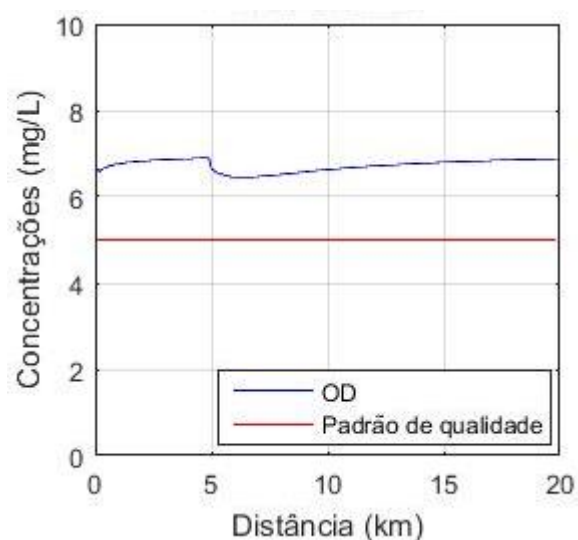


Figura 50 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

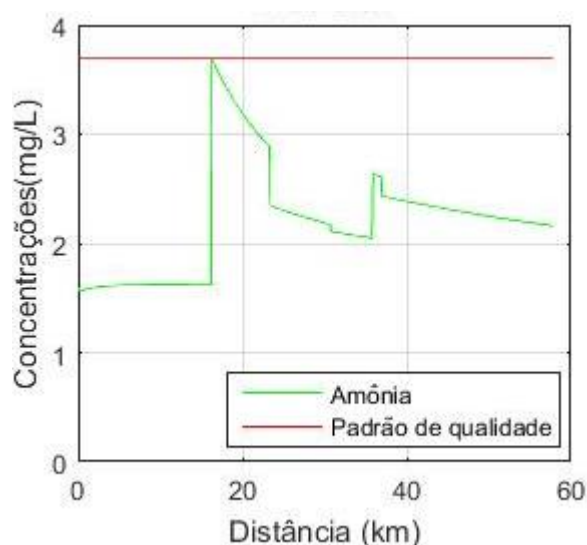


Figura 51 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH inferior ou igual a 7,5.

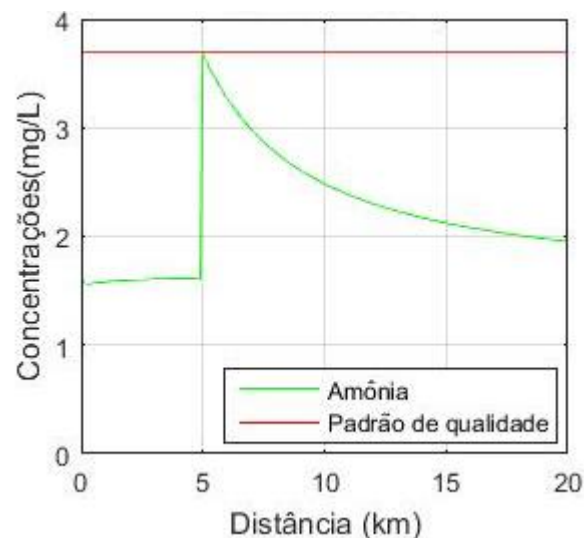


Figura 52 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

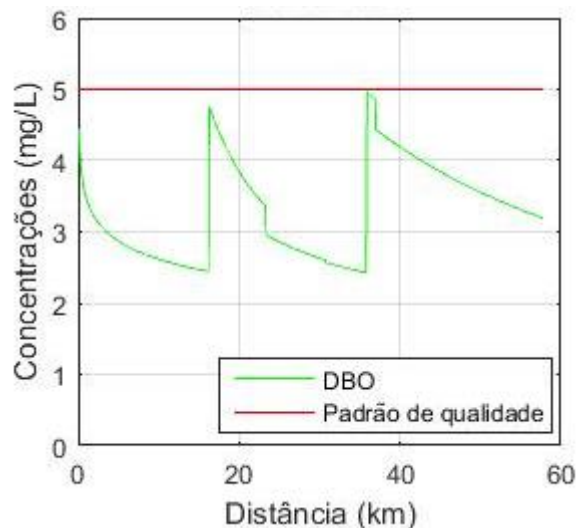


Figura 53 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

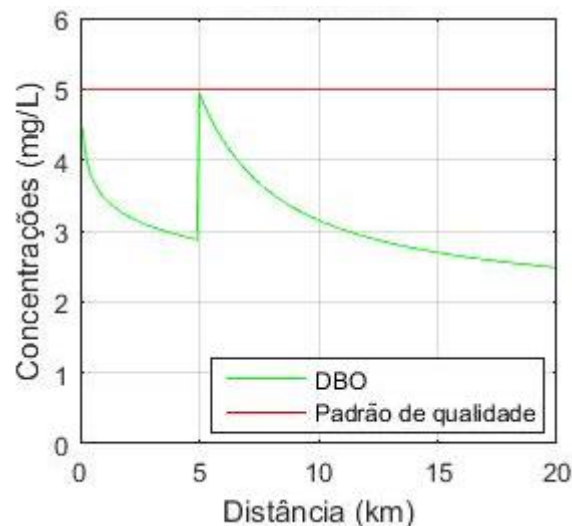


Figura 54 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

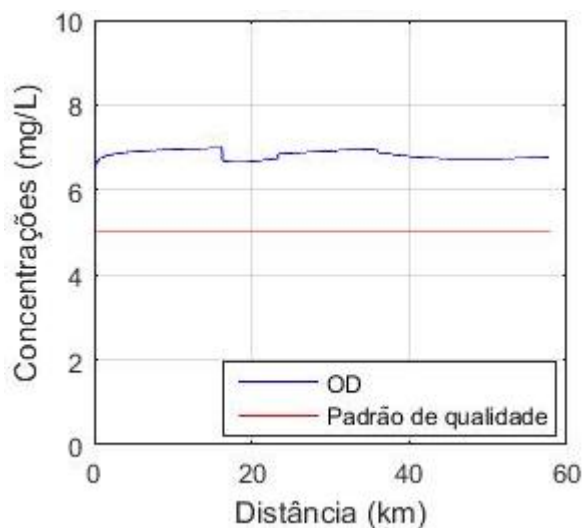


Figura 55 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de depoluição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

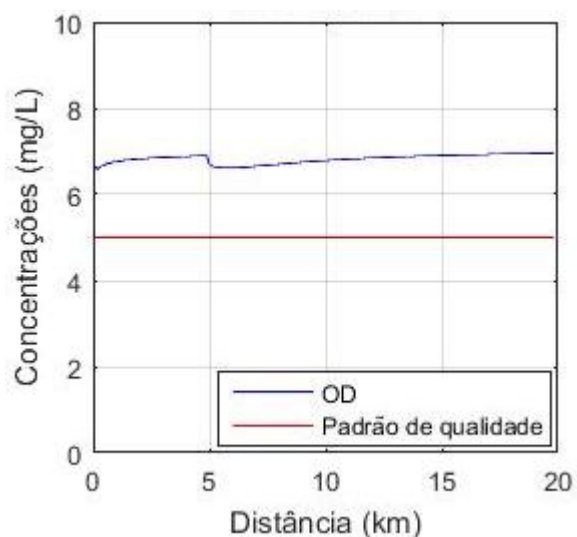


Figura 56 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

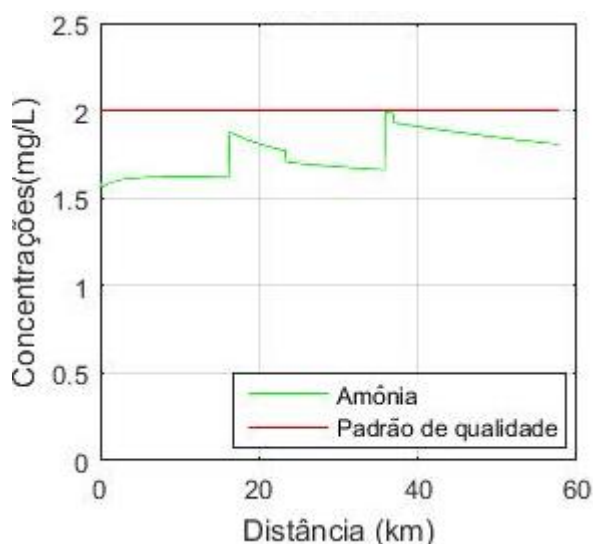


Figura 57 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0.

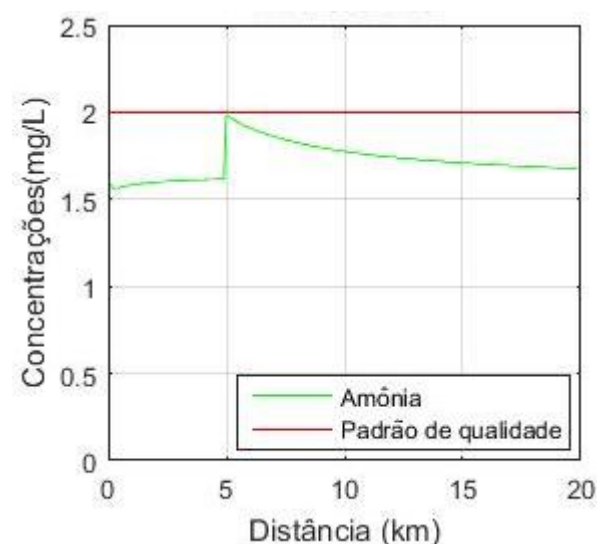


Figura 58 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

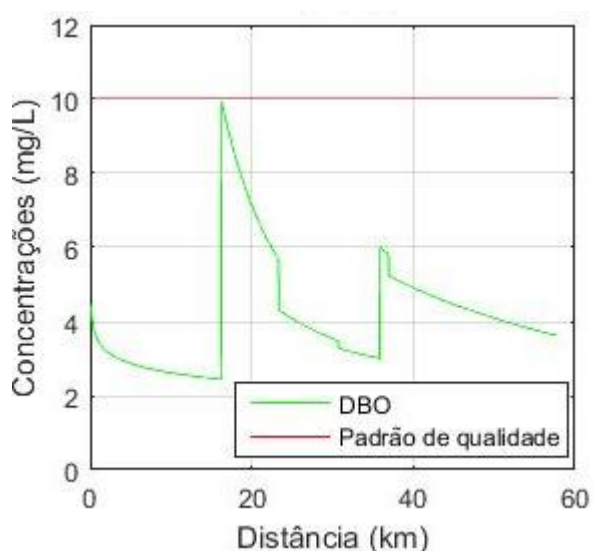


Figura 59 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

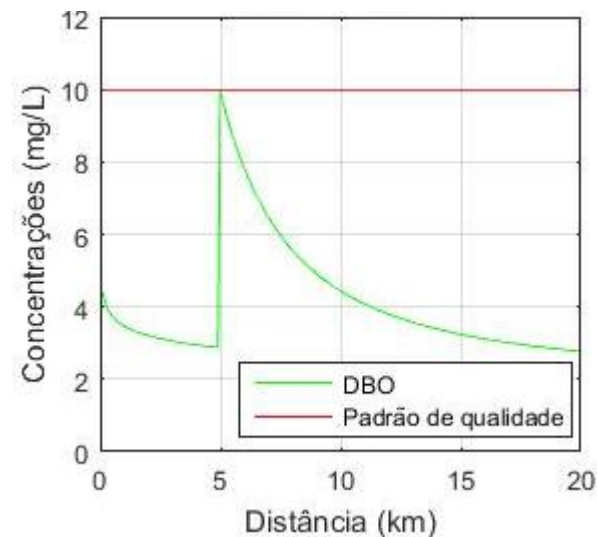


Figura 60 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

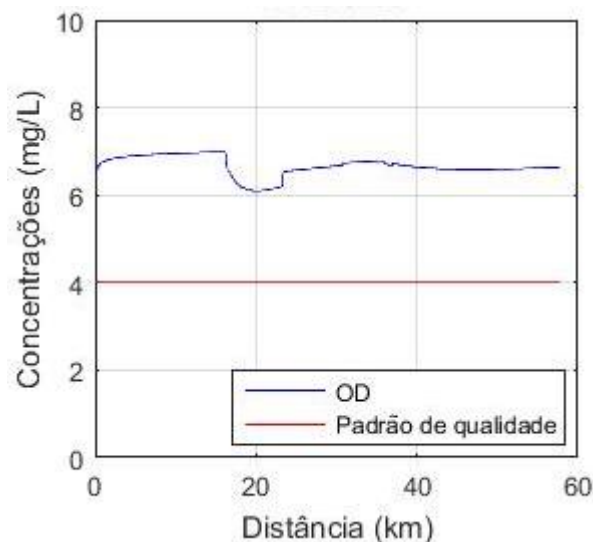


Figura 61 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de depoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

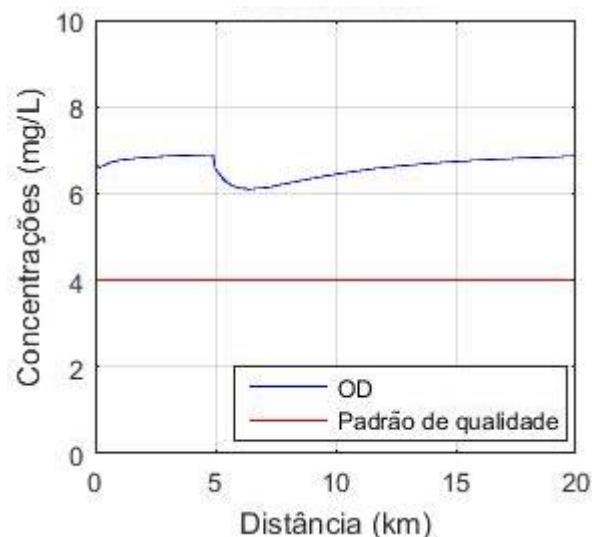


Figura 62 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

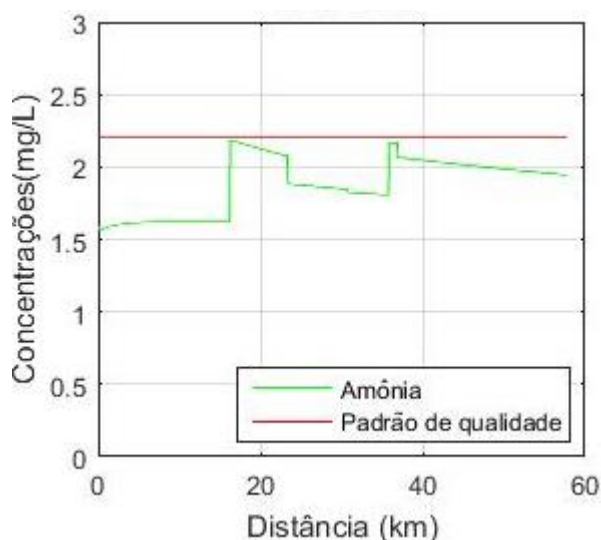


Figura 63 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

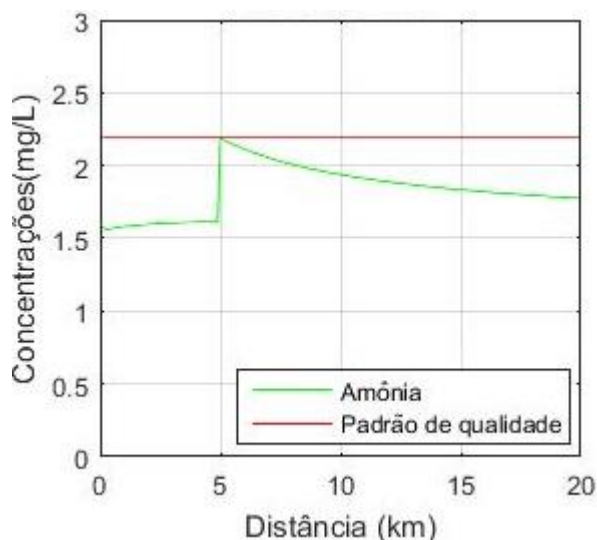


Figura 64 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

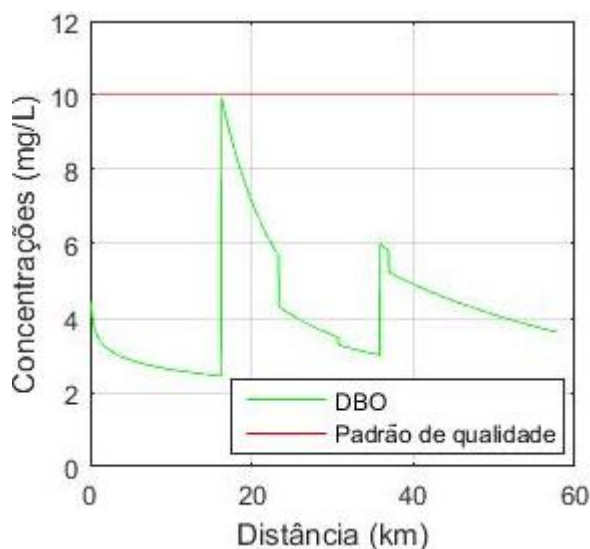


Figura 65 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

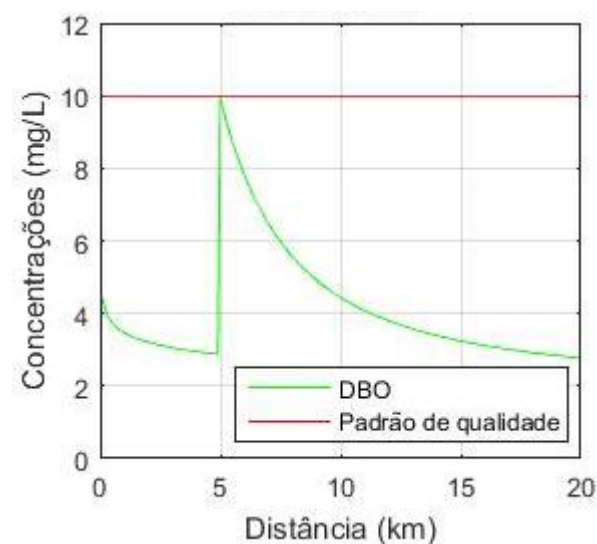


Figura 66 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

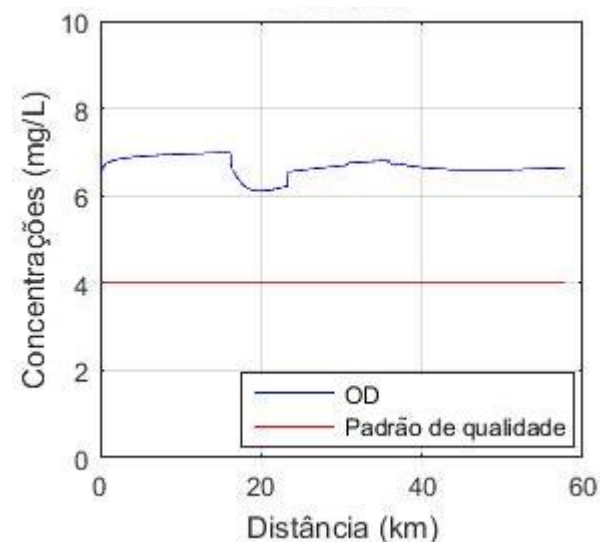


Figura 67 – Perfil de concentração de OD no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de despoluição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

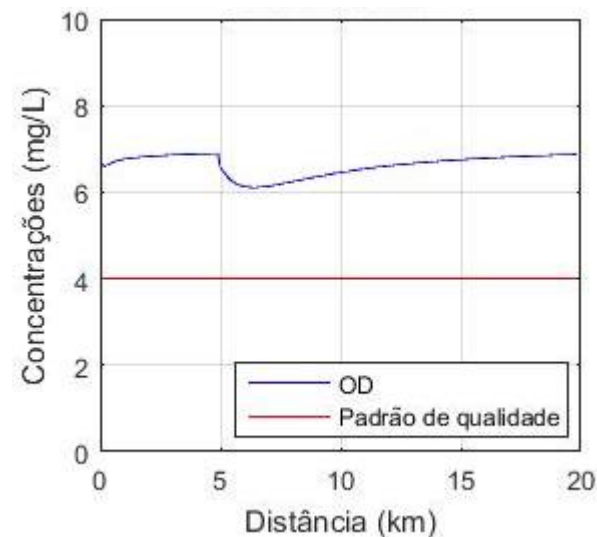


Figura 68 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.

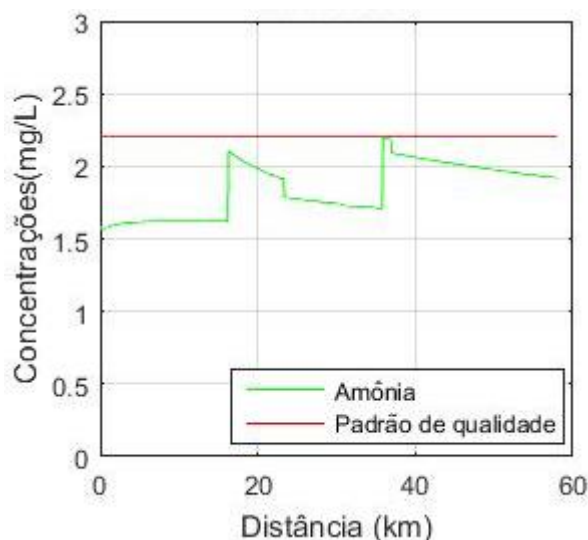
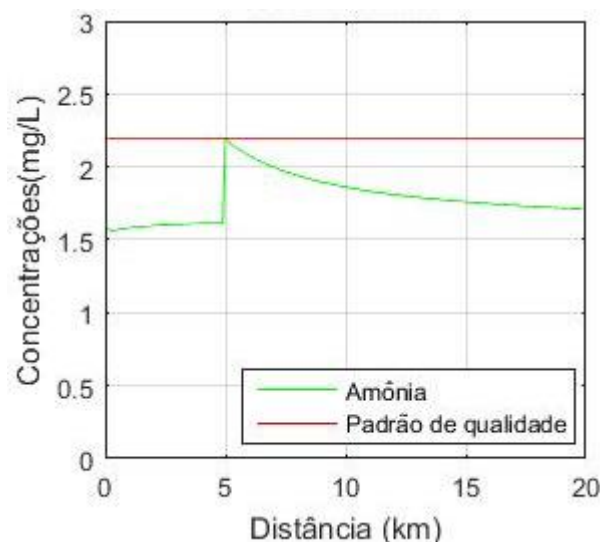


Figura 69 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo a partir da adoção das eficiências de remoção estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição final de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5.



Em função da semelhança entre as eficiências estimadas pelos diferentes modelos de otimização, optou-se por utilizar exclusivamente o Modelo de Otimização 3 para a estimativa das eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia quando da incorporação de outras restrições ao modelo de otimização. São elas: a) concentração máxima de DBO de 120 mg/L; e b) eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

6.2.3.1. Considerando a concentração máxima de DBO do efluente final igual a 120 mg/L

A Tabela 14 reúne as eficiências mínimas de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3, a partir da perspectiva de que a concentração máxima de DBO do efluente do sistema de tratamento seja 120 mg/L e do enquadramento dos cursos d'água na classe 2. A Tabela 15, por sua vez, reúne as eficiências apropriadas quando considerada a possibilidade de enquadramento dos rios na classe 3.

Tabela 14 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para a DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 2.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 70   | 70                  | 70                             | 375                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 70   | 70                  | 70                             | 560                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 85             | 71    | 29   | 0                   | 0                              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 70   | 70                  | 70                             | 417                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 34             | 8     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 70   | 70                  | 70                             | 588                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 89             | 81    | 43   | 0                   | 0                              |                          |

Tabela 15 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para a DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 3.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 350                      |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 350                      |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 476                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 69             | 57    | 0    | 0                   | 0                              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 350                      |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 350                      |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 70             | 70    | 70   | 70                  | 70                             | 523                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 87             | 73    | 13   | 0                   | 0                              |                          |

A simples verificação das tabelas 14 e 15 permite constatar que:

- Os quatro conjuntos de simulações considerando-se as águas dos rios como classe 2 apresentaram eficiências de remoção DBO iguais (84% em Ibatiba, 81% em Irupi e 70% para Iúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças). Nos seis conjuntos de simulações em que se assumiu rios classe 3, as eficiências de remoção de DBO foram iguais a 70% para todas as localidades, garantindo que a concentração de DBO no esgoto tratado seja no máximo 120 mg/L.
- Quanto à amônia, pode-se notar que as eficiências de remoção apresentaram valores similares aos obtidos pelos modelos de otimização 2 (Tabelas 10 e 11) e 3 (Tabelas 12 e 13). Desta forma, verificou-se que a incorporação da restrição associada ao efluente de concentração máxima de DBO 120 mg/L não produziu qualquer efeito sobre as eficiências de remoção de amônia.

Nas figuras 70 a 75 estão apresentados os perfis de concentração de DBO ao longo dos rios Pardo, Pardinho e ribeirão da Perdição, nesta ordem, considerando-se rios classificados como classe 2 e 3 e a restrição associada ao efluente de concentração máxima de DBO de 120 mg/L.

Figura 70 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.

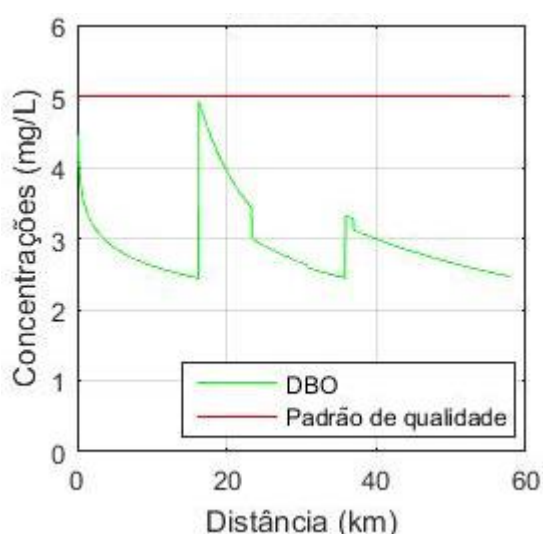


Figura 71 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.

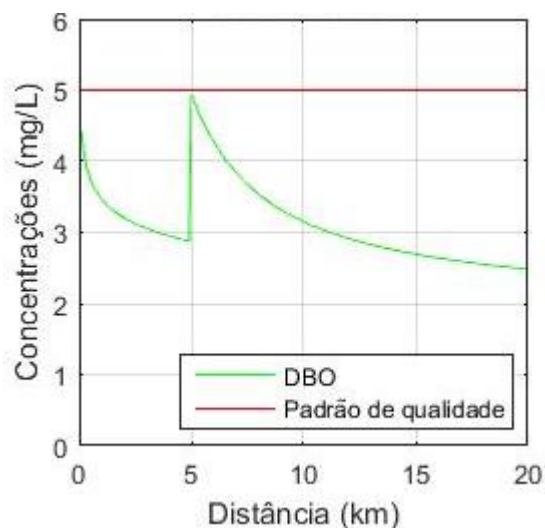


Figura 72 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.

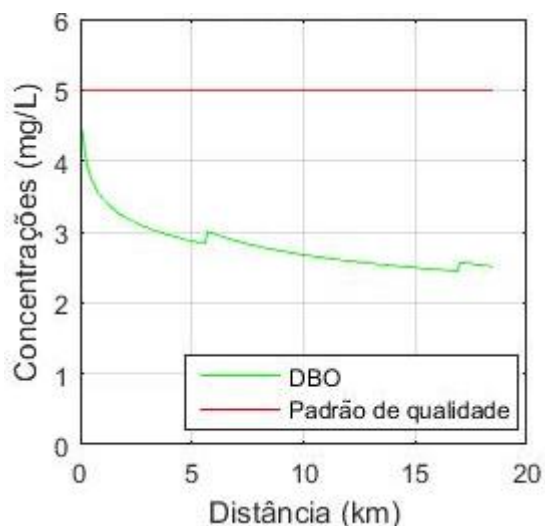


Figura 73 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.

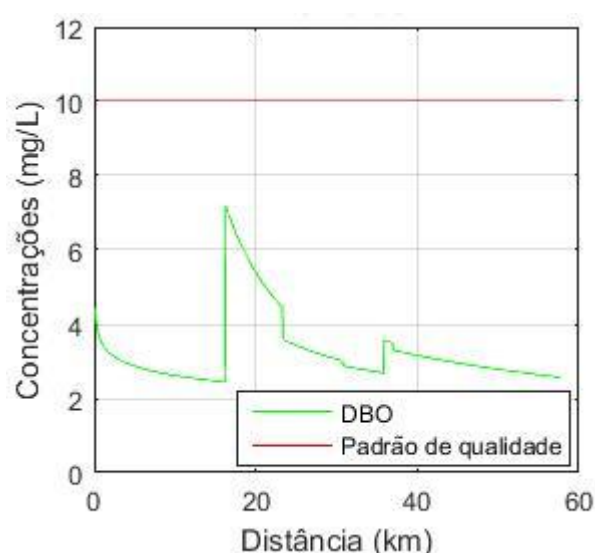


Figura 74 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.

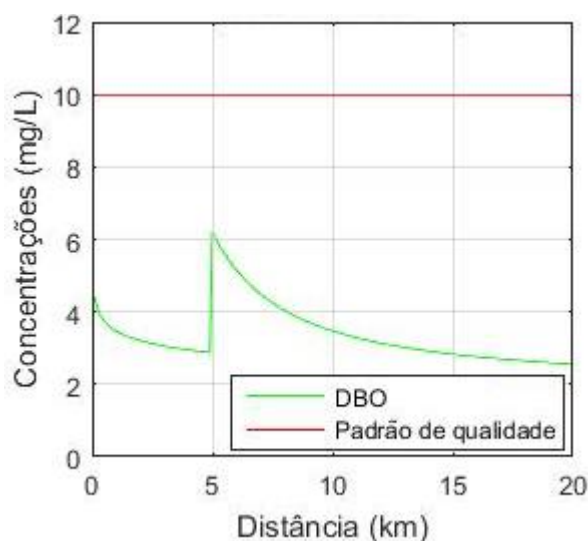
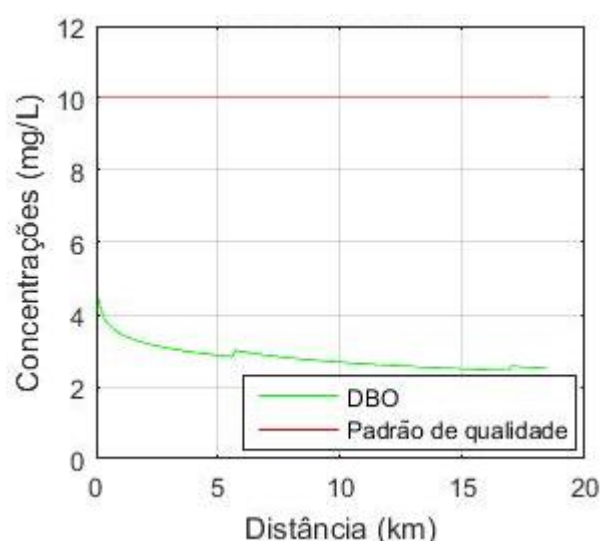


Figura 75 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e DBO máxima no efluente tratado de 120 mg/L.



Os perfis de concentração de amônia elaborados a partir da aplicação das eficiências de remoção estimadas pelo terceiro modelo de otimização (Tabela 14), considerando-se rios classe 2 e classe 3 e restrição associada ao efluente de concentração máxima de DBO 120 mg/L, encontram-se apresentados pelas figuras de 76 a 85.

Figura 76 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.

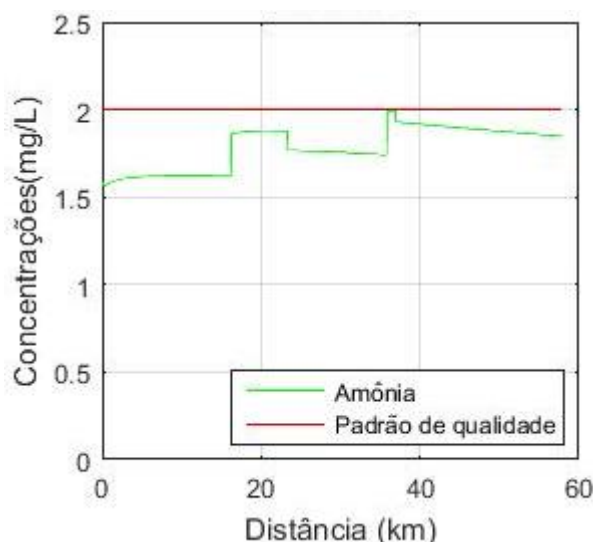


Figura 77 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.

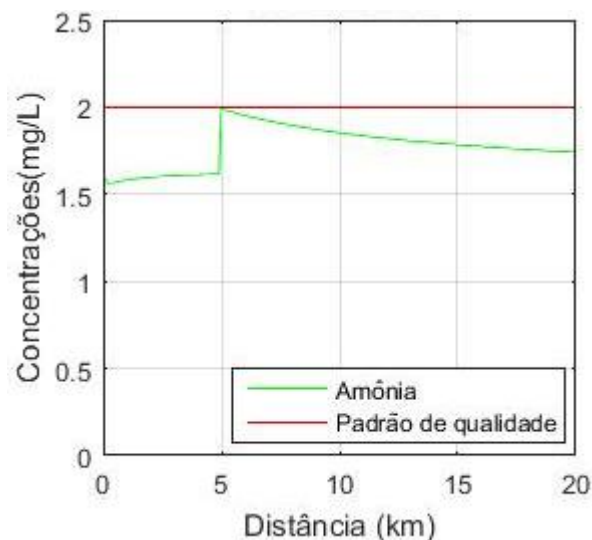


Figura 78 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior a 7,5 e Modelo de Otimização 3.

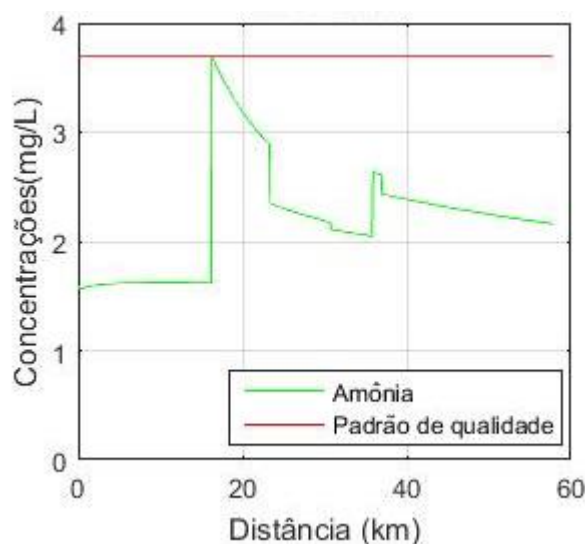


Figura 79 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH inferior a 7,5 e Modelo de Otimização 3.

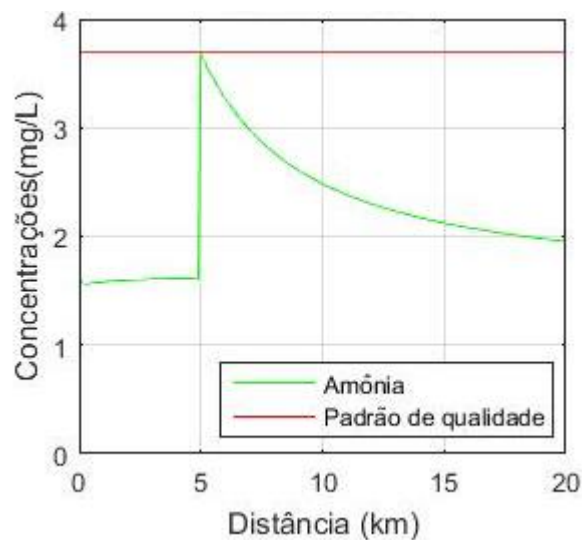


Figura 80 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.

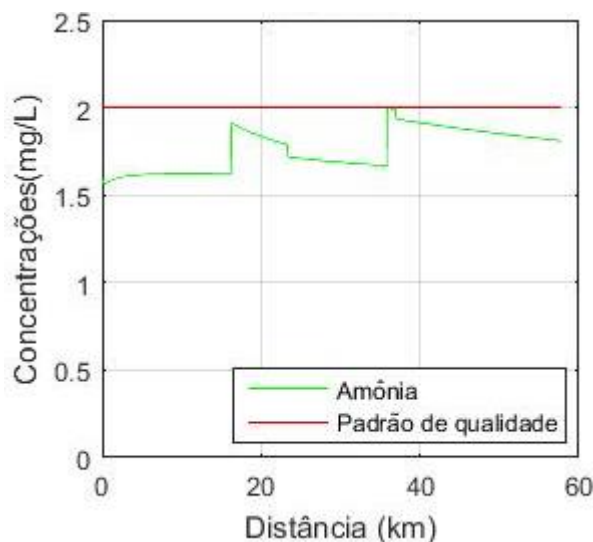


Figura 81 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 7,5 e 8,0 e Modelo de Otimização 3.

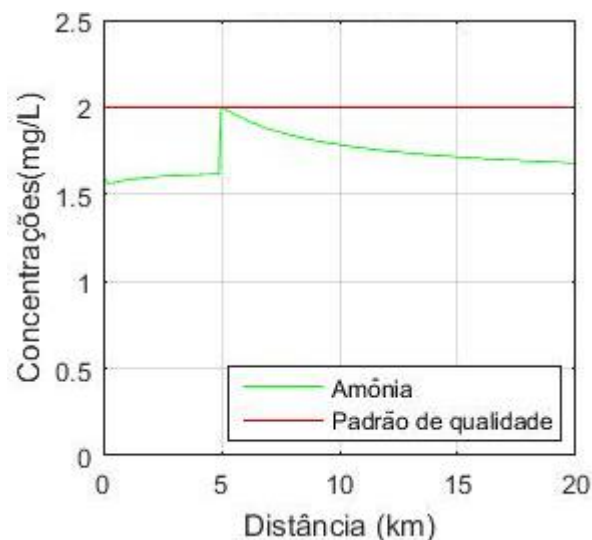


Figura 82 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.

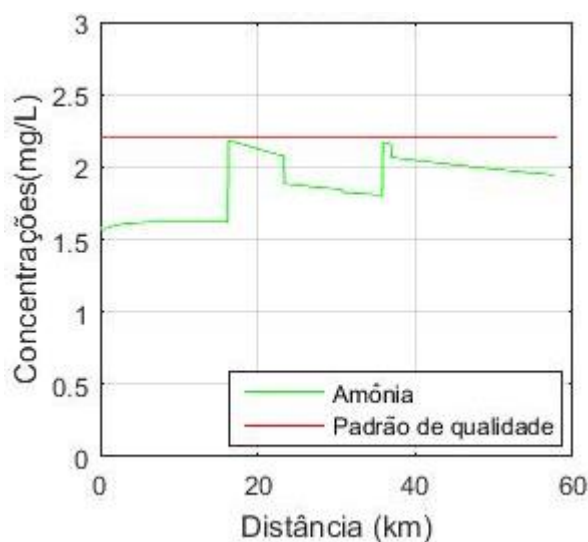


Figura 83 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerado a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.

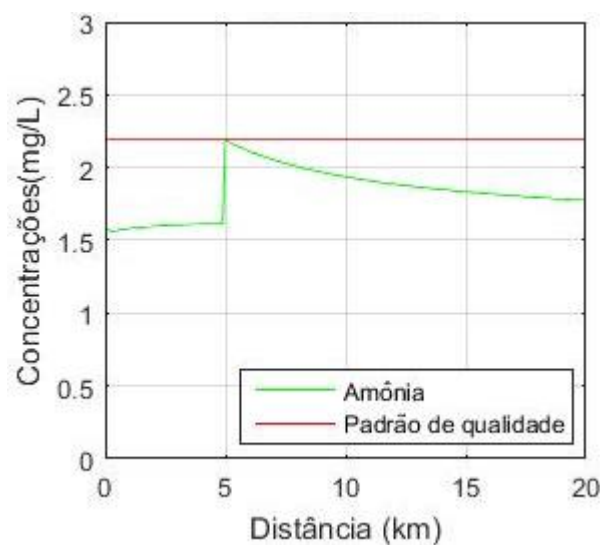


Figura 84 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.

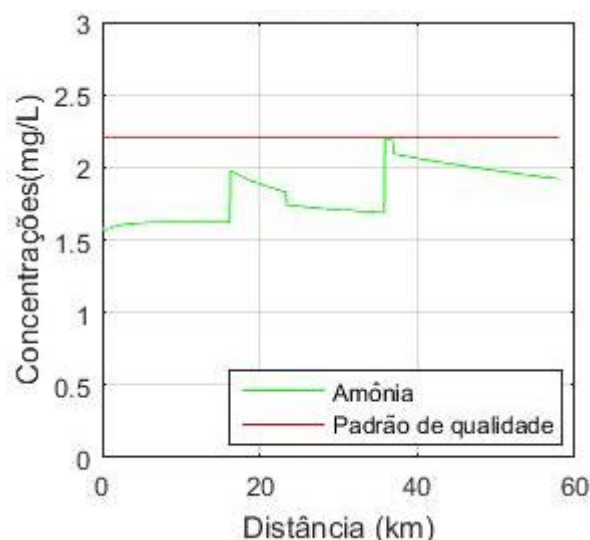
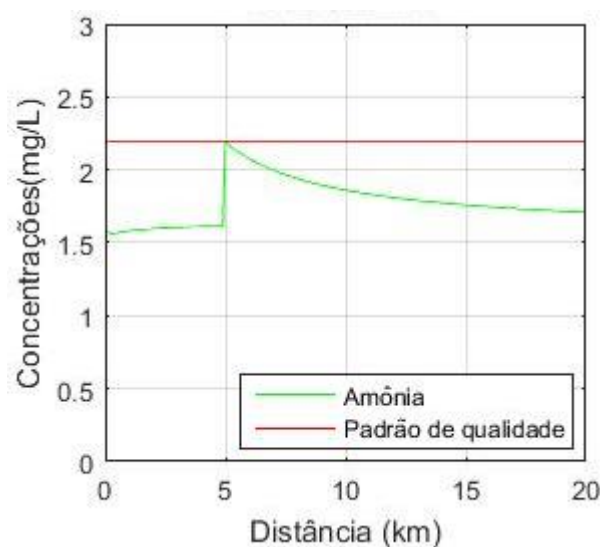


Figura 85 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes e pH entre 8,0 e 8,5 e Modelo de Otimização 3.



#### 6.2.3.2. Considerando as eficiências de remoção de DBO no mínimo 60%

Foi realizada estimativa das eficiências de remoção de amônia a partir dos valores das eficiências de remoção de DBO iguais a, no mínimo, 60%, para os dois cenários de disposição de efluentes assumidos neste trabalho. Os resultados das simulações efetuadas, considerando-se os cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo como classe 2, encontram-se apresentados na Tabela 16 e, como classe 3, na Tabela 17.

Tabela 16 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 2.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 60   | 60                  | 60                             | 345                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 60   | 60                  | 60                             | 529                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 83             | 71    | 30   | 0                   | 0                              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 60   | 60                  | 60                             | 387                      |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                  | 34             | 8     | 0    | 0                   | 00                             |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 5,0                                  | 84             | 81    | 60   | 60                  | 60                             | 559                      |
|         |                             | Amônia    | 2,0                                  | 90             | 82    | 42   | 0                   | 0                              |                          |

Tabela 17 – Eficiências mínimas de remoção de amônia obtidas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e os padrões de qualidade ambiental de rios classe 3.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Eficiência (%) |       |      |                     |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|--------------------------------------|----------------|-------|------|---------------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                      | Ibatiba        | Irupi | Iúna | Santíssima Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 300                      |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 300                      |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 426                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 69             | 57    | 0    | 0                   | 00                             |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 300                      |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                 | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 7,5< pH≤8,0                 | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 300                      |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                  | 0              | 0     | 0    | 0                   | 0                              |                          |
|         | 8,0< pH≤8,5                 | DBO       | 10,0                                 | 60             | 60    | 60   | 60                  | 60                             | 473                      |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                  | 84             | 73    | 16   | 0                   | 0                              |                          |

Ao se examinar as tabelas 16 e 17, observa-se que:

- Os quatro conjuntos de simulações considerando-se as águas dos rios como classe 2 produziram as mesmas eficiências de remoção DBO para os núcleos urbanos da bacia (84% em Ibatiba, 81% em Irupi e 60% para Lúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças). Nos seis conjuntos de simulações em que se assumiu rios classe 3, as eficiências de remoção de DBO foram iguais a 60% para todas as localidades.
- Quanto à amônia, as eficiências de remoção apresentaram valores similares aos obtidos pelos modelos de otimização 2 (Tabelas 10 e 11) e 3 (Tabelas 12 e 13), e pelo Modelo de Otimização 3 considerando a concentração máxima de DBO de 120 mg/L (Tabelas 14 e 15). Desta forma, verifica-se que a incorporação da restrição associada ao efluente de eficiência mínima de remoção de DBO 60% não produziu qualquer efeito diferente sobre as eficiências de remoção de amônia.

As figuras 86 a 91 apresentam os perfis de DBO ao longo dos rios Pardo e Pardinho, e ribeirão da Perdição, considerando-se a imposição de eficiências mínimas 60% para remoção de DBO, perspectivas de enquadramento nas classes 2 e 3 e diferentes cenários assumidos para as concentrações de nitrogênio orgânico e amônia.

Figura 86 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

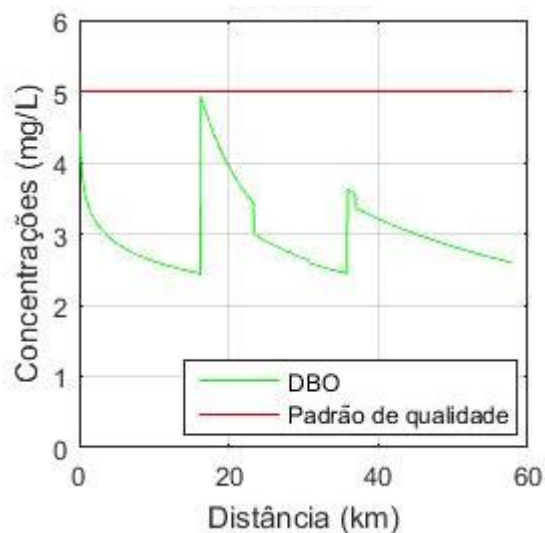


Figura 87 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

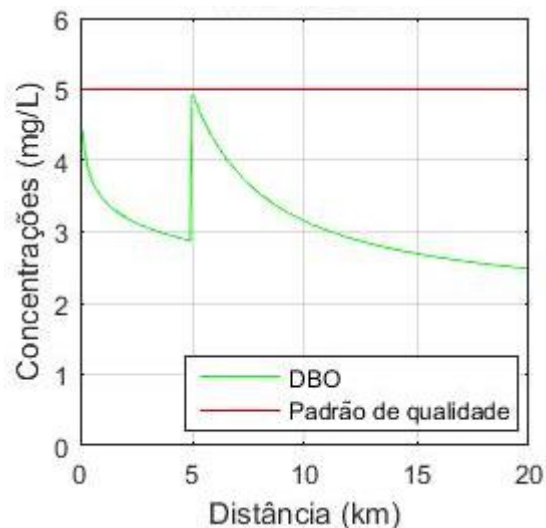


Figura 88 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 2 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

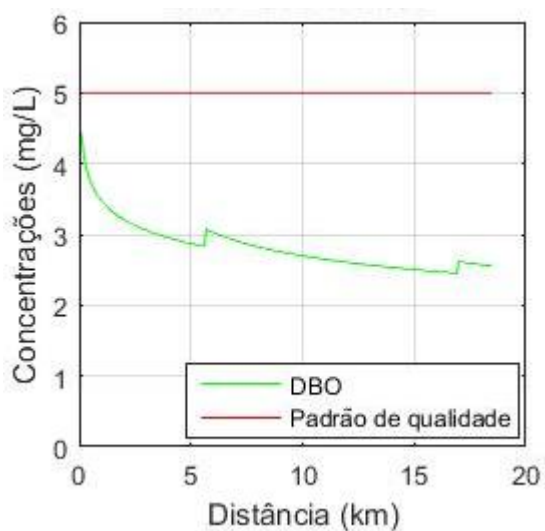


Figura 89 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardo considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

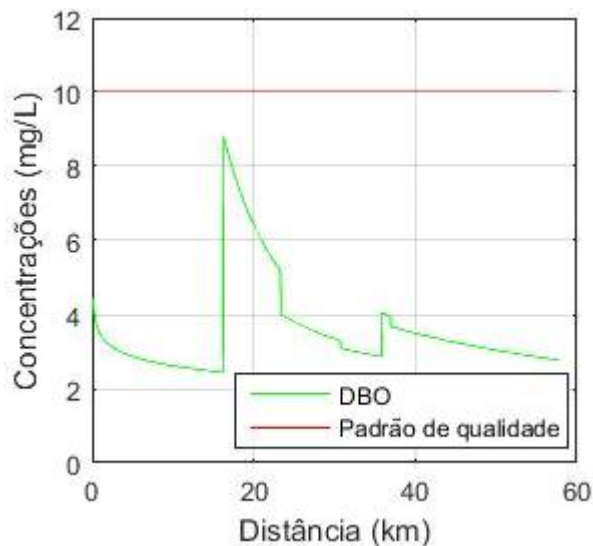


Figura 90 – Perfil de concentração de DBO no rio Pardinho considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.

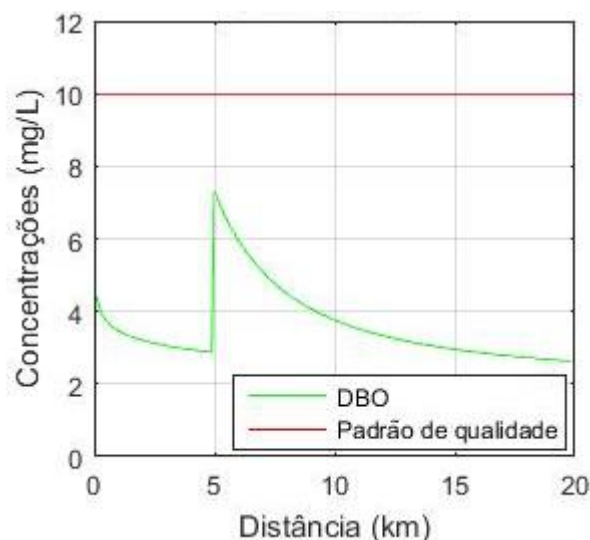
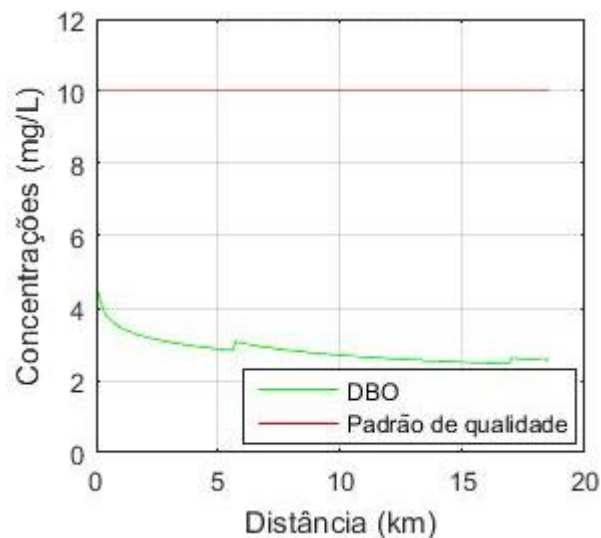


Figura 91 – Perfil de concentração de DBO no ribeirão da Perdição considerada perspectiva de enquadramento na classe 3 e eficiência mínima de remoção de DBO de 60%.



As figuras de 92 a 101 apresentam os perfis de concentração de amônia ao longo dos rios Pardo e Pardinho elaborados a partir da aplicação das eficiências de remoção obtidas pelo terceiro modelo de otimização, considerando-se rios classes 2 e 3, os valores das eficiências de remoção de DBO mínimas de 60% e os dois cenários de disposição analisados.

Figura 92 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

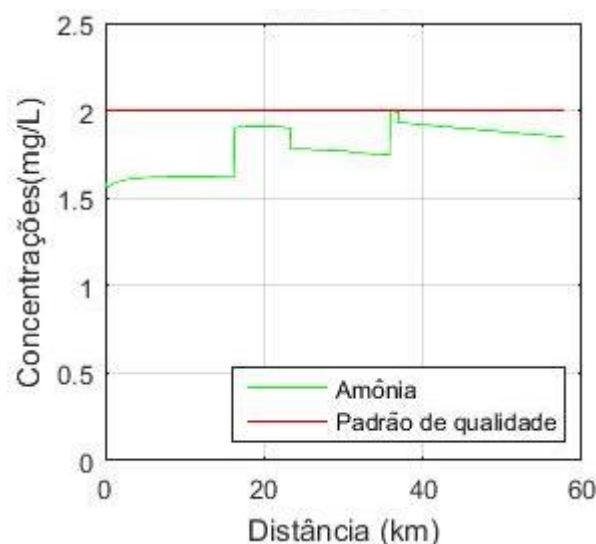


Figura 93 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

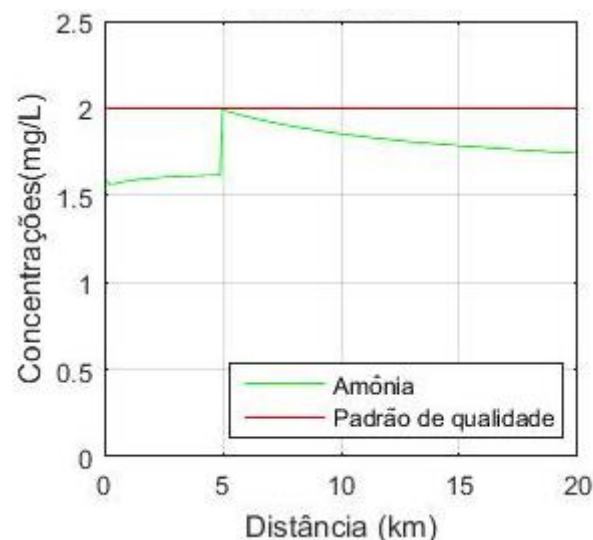


Figura 94 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH inferior ou igual a 7,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

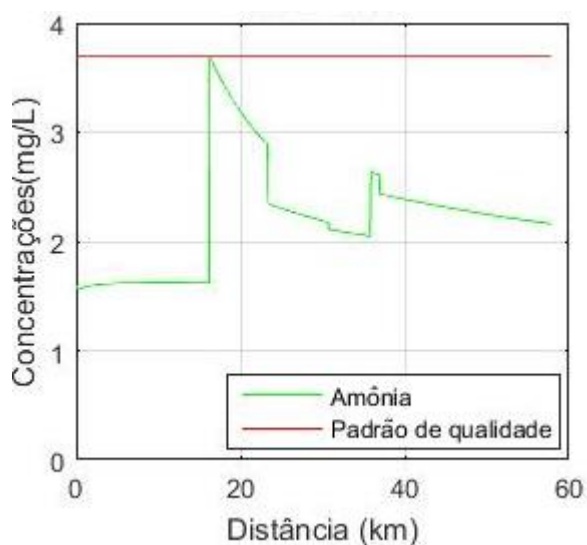


Figura 95 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH inferior ou igual a 7,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

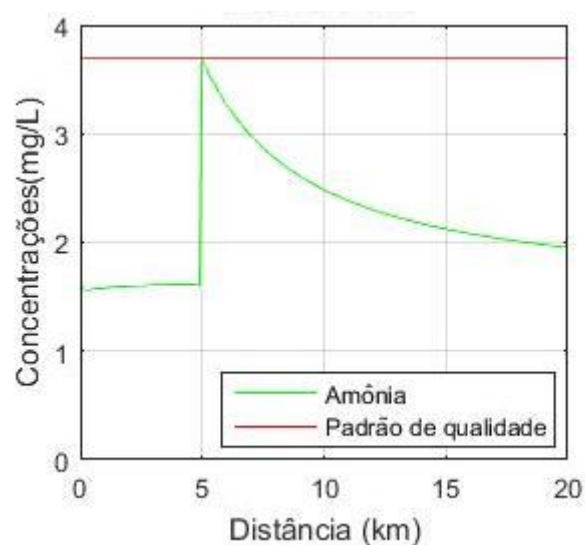


Figura 96 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

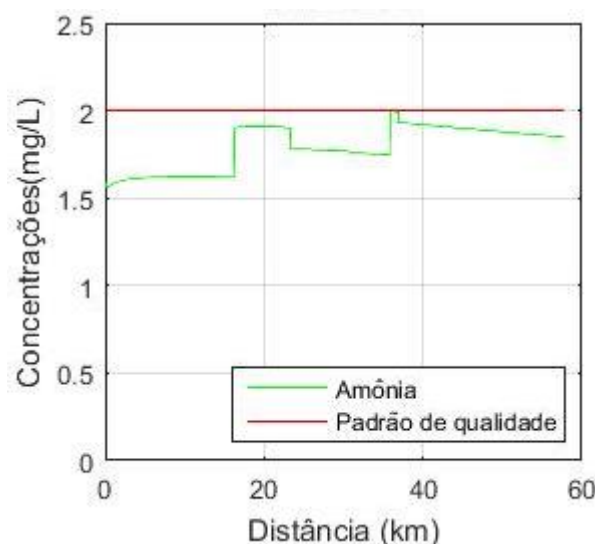


Figura 97 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 2, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 7,5 e 8,0, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

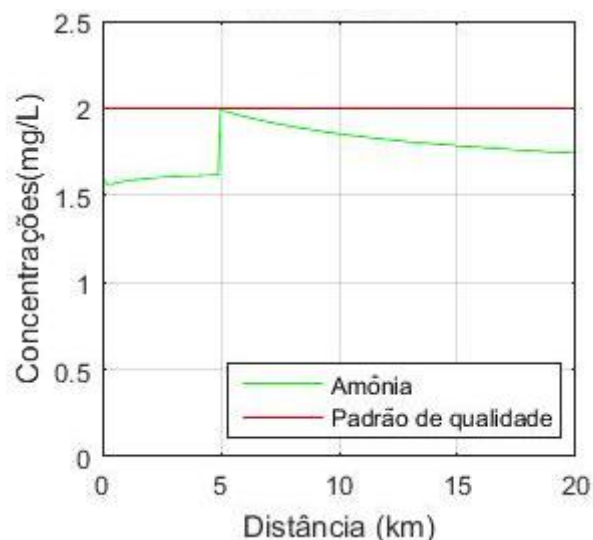


Figura 98 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

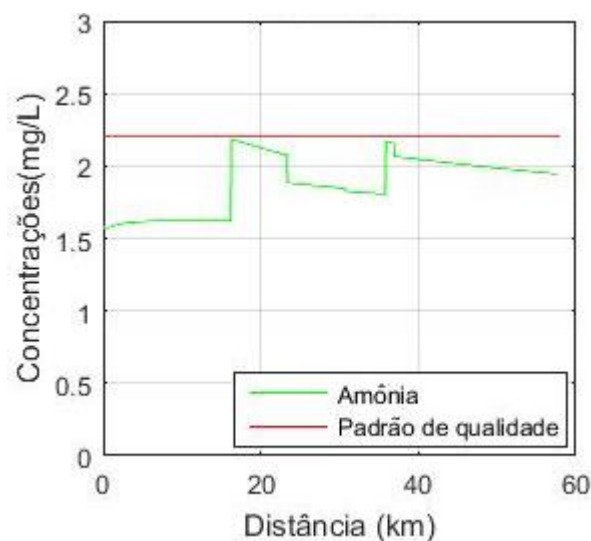


Figura 99 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 1 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

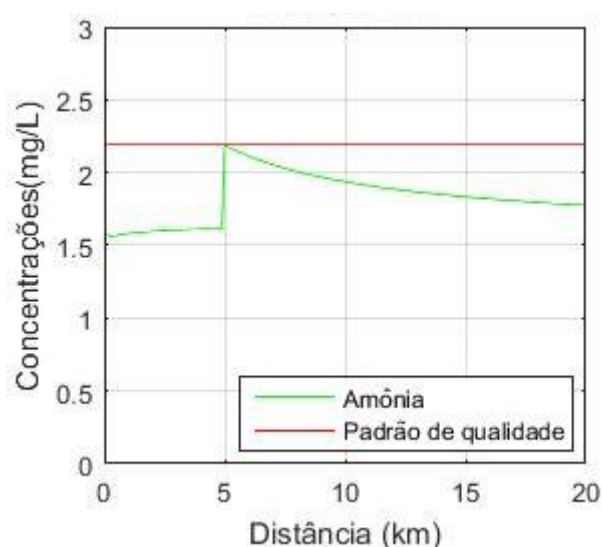


Figura 100 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardo considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.

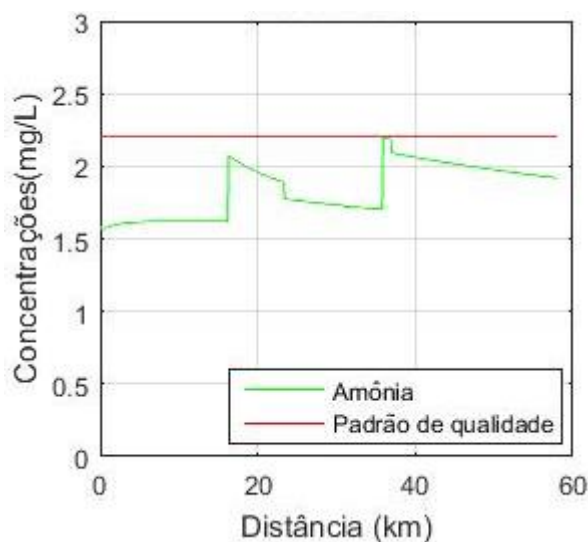
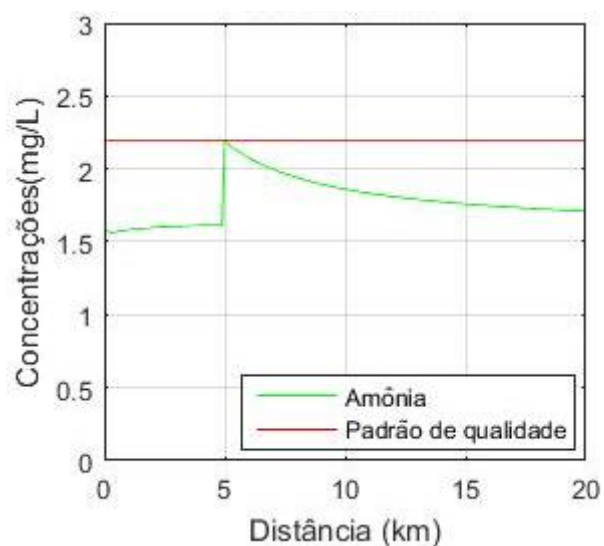


Figura 101 – Perfil de concentração de amônia no rio Pardinho considerada a perspectiva de enquadramento na classe 3, cenário 2 de disposição de efluentes, pH entre 8,0 e 8,5, eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e Modelo de Otimização 3.



#### **6.2.4. Pré-seleção dos Sistemas de Tratamento de Esgotos**

A partir dos conjuntos de eficiências de remoção de DBO e amônia, resultantes do emprego combinado no modelo de qualidade de água e da técnica de otimização, foram pré-selecionados sistemas de tratamento que assegurassem o atendimento destas eficiências.

A pré-seleção dos sistemas de tratamento foi realizada a partir dos resultados dos modelos otimização 3 para as três condições de lançamento: a) emprego da capacidade de autodepuração dos rios para a assimilação dos efluentes (C1); b) concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L (C2); e c) eficiência mínima de remoção de DBO de 60% (C3). No processo de pré-seleção foram considerados os padrões de qualidade ambiental estabelecidos para as classes 2 e 3 de enquadramento dos corpos d'água. Os quadros de 3 a 6 apresentam os resultados da pré-seleção dos sistemas de tratamento considerando os rios como corpos d'água classe 2. Os resultados decorrentes da perspectiva de enquadramento na classe 3 encontram-se reunidos no APÊNDICE B.

Vale reiterar que a pré-seleção das alternativas de tratamento levou em consideração restrições quanto à demanda de potência para aeração e à disposição no solo. Para Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças não foram admitidos sistemas mecanizados que demandem potência para aeração. No entanto, foram permitidos sistemas de tratamento associados à disposição final no solo. Para as sedes municipais de Ibatiba, Irupi e Lúna não foram permitidas alternativas de tratamento associadas à disposição final no solo.

Quadro 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba.

(Continua)

[illegible]

Quadro 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba.

(Conclusão)

| Pré-seleção - ETE 01 -Ibatiba |                                                      |                                                      |                                                      |            |                                                      |            |                                                      |            |                                                      |            |                                                      |            |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|------------|------------------------------------------------------|------------|
| Alternativas                  | Condição de lançamento 1                             |                                                      |                                                      |            | Condição de lançamento 2                             |            |                                                      |            | Condição de lançamento 3                             |            |                                                      |            |
|                               | Cenário 1                                            |                                                      | Cenário 2                                            |            | Cenário 1                                            |            | Cenário 2                                            |            | Cenário 1                                            |            | Cenário 2                                            |            |
|                               | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0 |
| A24                           | -                                                    | -                                                    | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          |
| A25                           | -                                                    | -                                                    | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          |
| A26                           | -                                                    | -                                                    | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          | -                                                    | -          |
| A27                           | Lodos ativados convencional                          | Lodos ativados convencional                          | Lodos ativados convencional                          | -          | Lodos ativados convencional                          | -          | Lodos ativados convencional                          | -          | Lodos ativados convencional                          | -          | Lodos ativados convencional                          | -          |
| A28                           | Lodos ativados aeração prolongada                    | Lodos ativados aeração prolongada                    | Lodos ativados aeração prolongada                    | -          | Lodos ativados aeração prolongada                    | -          | Lodos ativados aeração prolongada                    | -          | Lodos ativados aeração prolongada                    | -          | Lodos ativados aeração prolongada                    | -          |
| A29                           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | -          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | -          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | -          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | -          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)       | -          |
| A30                           | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N   | -          |
| A31                           | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional remoção biológica de N/P | -          |
| A32                           | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária  | -          |
| A33                           | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -                                                    | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga           | -          |
| A34                           | Filtro biológico percolador de alta carga            | -                                                    | Filtro biológico percolador de alta carga            | -          | Filtro biológico percolador de alta carga            | -          | Filtro biológico percolador de alta carga            | -          | Filtro biológico percolador de alta carga            | -          | Filtro biológico percolador de alta carga            | -          |
| A35                           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | -          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | -          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | -          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | -          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação           | -          |
| A36                           | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | -          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | -          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | -          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | -          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N | -          |
| A37                           | Biodisco                                             | -                                                    | Biodisco                                             | -          | Biodisco                                             | -          | Biodisco                                             | -          | Biodisco                                             | -          | Biodisco                                             | -          |
| TOTAL                         | 18                                                   | 8                                                    | 17                                                   | 0          | 18                                                   | 0          | 17                                                   | 0          | 18                                                   | 0          | 17                                                   | 0          |

[illegible]

Quadro 4 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi.

(Conclusão)

| Pré-seleção - ETE 02 -Irupi |                                                          |                                                          |                                                          |            |                                                          |                                                          |                                                          |            |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Alternativas                | Condição de lançamento 1                                 |                                                          |                                                          |            | Condição de lançamento 2                                 |                                                          |                                                          |            | Condição de lançamento 3                                 |                                                          |                                                          |            |
|                             | Cenário 1                                                |                                                          | Cenário 2                                                |            | Cenário 1                                                |                                                          | Cenário 2                                                |            | Cenário 1                                                |                                                          | Cenário 2                                                |            |
|                             | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0 | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0 |
| A23                         | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -                                                        | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -          | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -                                                        | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -          | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -                                                        | UASB+ Lagoa de polimento                                 | -          |
| A24                         | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          |
| A25                         | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          | -                                                        | -                                                        | -                                                        | -          |
| A26                         | UASB+ Escoamento superficial                             | -                                                        | UASB+ Escoamento superficial                             | -          | UASB+ Escoamento superficial                             | -                                                        | UASB+ Escoamento superficial                             | -          | UASB+ Escoamento superficial                             | -                                                        | UASB+ Escoamento superficial                             | -          |
| A27                         | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | -          | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | -          | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | -          |
| A28                         | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | -          | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | -          | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | Lodos ativados aeração prolongada                        | -          |
| A29                         | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | -          | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | -          | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | Lodos ativados batelada (aeração prolongada)             | -          |
| A30                         | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | -          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | -          |
| A31                         | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | -          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | -          |
| A32                         | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | -          | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + Infiltração terciária      | -          |
| A33                         | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | -          | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | -          |
| A34                         | Filtro biológico percolador de alta carga                | -                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                | -          | Filtro biológico percolador de alta carga                | -                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                | -          | Filtro biológico percolador de alta carga                | -                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                | -          |
| A35                         | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | -          | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | -          | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | Biofiltro aeróbio submerso com nitrificação              | -          |
| A36                         | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | -          | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | -          | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | Biofiltro aeróbio submerso com remoção biológica de N    | -          |
| A37                         | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | -          | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | -          | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | -          |
| TOTAL                       | 24                                                       | 11                                                       | 24                                                       | 0          | 24                                                       | 11                                                       | 24                                                       | 0          | 24                                                       | 11                                                       | 24                                                       | 0          |

Quadro 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Lúna.

(Continua)

[illegible]

Quadro 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna.

(Conclusão)

| Pré-seleção - ETE 03 -Iúna |                                                        |                                           |                                                        |                                           |                                                        |                                                        |                                                        |                                            |                                                        |                                                        |                                                        |                                           |
|----------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Alternativas               | Condição de lançamento 1                               |                                           |                                                        |                                           | Condição de lançamento 2                               |                                                        |                                                        |                                            | Condição de lançamento 3                               |                                                        |                                                        |                                           |
|                            | Cenário 1                                              |                                           | Cenário 2                                              |                                           | Cenário 1                                              |                                                        | Cenário 2                                              |                                            | Cenário 1                                              |                                                        | Cenário 2                                              |                                           |
|                            | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                             | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                 | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                             | pH≤7,5                                                 | 7,5<pH≤8,0                                |
| A21                        | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga    | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga    | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga     | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga                 | UASB+ Filtro biol. perc. de alta carga    |
| A22                        | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | -                                         | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | -                                         | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | -                                          | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | UASB+ flot. por ar dissolvido                          | -                                         |
| A23                        | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                   | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                   | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                    | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                                | UASB+ Lag. de polimento                   |
| A24                        | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | -                                         | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | -                                         | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | -                                          | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | UASB+ Lag. aer. facul.                                 | -                                         |
| A25                        | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | -                                         | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | -                                         | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | -                                          | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | UASB+ Lag. aer.mist.comp.+ Lag. decant.                | -                                         |
| A26                        | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                    | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                    | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                     | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                                 | UASB+ Esc. superficial                    |
| A27                        | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativa. convencional                 | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativa. convencional                 | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativa. convencional                  | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativados convencional                            | Lodos ativa. convencional                 |
| A28                        | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativa. aeração prol.                | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativa. aeração prol.                | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativa. aeração prol.                 | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativados aeração prol.                           | Lodos ativa. aeração prol.                |
| A29                        | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativa. - batelada (aeração prol.)   | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativa. - batelada (aeração prol.)   | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativa. - batelada (aeração prol.)    | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativados - batelada (aeração prol.)              | Lodos ativa. - batelada (aeração prol.)   |
| A30                        | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados conv. c. rem. biológ. de N | Lodos ativados convencional c. remoção biológica de N  | Lodos ativados conv. c. rem. biológ. de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados conv. c. remo. biológ. de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N | Lodos ativados conv. c. rem. biológ. de N |
| A31                        | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativa. conv. remo. biológ. de N/P   | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativa. conv. remo. biológ. de N/P   | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativa. conv. remo. biológ. de N/P    | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológ. de N/P | Lodos ativa. conv. remo. biológ. de N/P   |
| A32                        | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativa. conv.+ Infilt. terciária     | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativa. conv.+ Infilt. terciária     | Lodos ativad. convencional+ Infilt. terciária          | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativa. conv.+ Infilt. terciária      | Lodos ativad. convencional+ Infilt. terciária          | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativados convencional+ Infilt. terciária         | Lodos ativa. conv.+ Infilt. terciária     |
| A33                        | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológ. perc. de baixa carga       | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológ. perc. de baixa carga       | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológ. perc. de baixa carga        | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológico perc. de baixa carga                  | Filtro biológ. perc. de baixa carga       |
| A34                        | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológ. perc. de alta carga        | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológ. perc. de alta carga        | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológ. perc. de alta carga         | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológico perc. de alta carga                   | Filtro biológ. perc. de alta carga        |
| A35                        | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aera. subm. nitrific.           | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aera. subm. nitrific.           | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aera. subm. nitrific.            | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aerado subm. nitrific.                       | Biofiltro aera. subm. nitrific.           |
| A36                        | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aera. subm. com rem. biol. N    | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aera. subm. com rem. biol. N    | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aera. subm. com rem. biol. N     | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aerado submerso com rem. biológ. N           | Biofiltro aera. subm. com rem. biol. N    |
| A37                        | Biodisco                                               | Biodisco                                  | Biodisco                                               | Biodisco                                  | Biodisco                                               | Biodisco                                               | Biodisco                                               | Biodisco                                   | Biodisco                                               | Biodisco                                               | Biodisco                                               | Biodisco                                  |
| TOTAL                      | 34                                                     | 26                                        | 34                                                     | 26                                        | 30                                                     | 30                                                     | 30                                                     | 25                                         | 32                                                     | 32                                                     | 32                                                     | 26                                        |

[illegible]

Quadro 6 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as comunidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças.

(Conclusão)

| Pré-seleção – ETEs 04 e 05 – Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Alternativas                                                                | Condição de lançamento 1                        |                                                 |                                                 |                                                 | Condição de lançamento 2                        |                                                 |                                                 |                                                 | Condição de lançamento 3                        |                                                 |                                                 |                                                 |
|                                                                             | Cenário 1                                       |                                                 | Cenário 2                                       |                                                 | Cenário 1                                       |                                                 | Cenário 2                                       |                                                 | Cenário 1                                       |                                                 | Cenário 2                                       |                                                 |
|                                                                             | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      | pH≤7,5                                          | 7,5<pH≤8,0                                      |
| A17                                                                         | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     | Reator UASB                                     |
| A18                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A19                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A20                                                                         | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          | UASB+ Filtro anaeróbio                          |
| A21                                                                         | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga | UASB+ Filtro biológico percolador de alta carga |
| A22                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A23                                                                         | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        | UASB+ Lagoa de polimento                        |
| A24                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A25                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A26                                                                         | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    | UASB+ Escoamento superficial                    |
| A27                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A28                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A29                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A30                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A31                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A32                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A33                                                                         | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      | Filtro biológico percolador de baixa carga      |
| A34                                                                         | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       | Filtro biológico percolador de alta carga       |
| A35                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A36                                                                         | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               | -                                               |
| A37                                                                         | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        | Biodisco                                        |
| TOTAL                                                                       | 21                                              | 21                                              | 21                                              | 21                                              | 17                                              | 17                                              | 17                                              | 17                                              | 19                                              | 19                                              | 19                                              | 19                                              |

A partir da análise dos quadros de 3 a 6, com os resultados da pré-seleção dos sistemas de tratamento considerando-se os rios como classe 2, pôde-se constatar que:

- O emprego combinado do modelo de qualidade de água e da técnica de otimização indicou as maiores eficiências de remoção, tanto de DBO quanto de amônia, para os esgotos gerados nas sedes municipais de Ibatiba e Irupi, independentemente da condição de disposição final de efluentes avaliada. Quanto ao parâmetro DBO, as duas localidades apresentaram eficiências mínimas de remoção superiores a 80%, aspecto que limitou o conjunto inicial de alternativas de tratamento. Para as simulações associadas ao segundo cenário de disposição de efluentes e águas com valores de pH entre 7,5 e 8,0, devido à alta exigência de remoção de amônia, nenhuma alternativa de tratamento foi pré-selecionada para as referidas localidades a partir do conjunto de alternativas de tratamento e faixas de eficiências assumidas para estes sistemas neste trabalho.
- As alternativas de tratamento pré-selecionadas para Ibatiba e Irupi variaram apenas de acordo com a faixa de pH e cenários analisados, independentemente da eventual imposição de um padrão de qualidade para os efluentes tratados.
- O maior conjunto de alternativas de tratamento pré-selecionadas foi estabelecido para a sede municipal de Lúna, ainda que as menores eficiências de remoção de DBO e amônia tenham sido estimadas para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. Isto ocorreu em função da pré-seleção das alternativas para estes povoados não considerar a perspectiva de escolha de sistemas mecanizados que demandem potência para aeração, eliminando assim 16 (dezesesseis) dos 37 (trinta e sete) sistemas de tratamento considerados. Para a localidade de Lúna o critério adotado foi a não seleção de sistemas associados à disposição final no solo, eliminando apenas 3 (três) dos 37 (trinta e sete) sistemas de tratamento.

- Para todas as condições de disposição final de esgotos avaliadas, os conjuntos de alternativas de tratamento pré-selecionados para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças foram idênticos.
- Para as localidades de Iúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, a pré-seleção dos sistemas de tratamento para a primeira condição de disposição final de efluentes foi a que indicou maior quantidade de alternativas, uma vez que ao se considerar a capacidade de autodepuração do rio para a diluição do efluente foram obtidas as menores eficiências de remoção de DBO e, para amônia, eficiências nulas ou muito pequenas. Já as condições de disposição final de efluentes 2 e 3, que estabeleceram o atendimento de concentração de DBO no efluente de 120 mg/L ou eficiência mínima de remoção de DBO de 60%, proporcionaram aumento significativo nas eficiências de remoção de DBO, condição que conduziu à pré-seleção de sistemas de tratamento mais robustos.
- Para as localidades de Ibatiba e Irupí, os conjuntos de sistemas de tratamento pré-selecionados para cada condição de disposição final de efluentes foram idênticos para as três condições analisadas, com a exceção dos sistemas pré-selecionados para Ibatiba, assumindo-se a primeira condição de disposição final de efluentes e águas com valores de pH entre 7,5 e 8,0. Neste contexto, o emprego da capacidade de autodepuração dos corpos d'água ou a imposição de padrões de qualidades para os efluentes tratados (eficiência mínima de remoção de DBO 60% ou concentração máxima de DBO no efluente de 120 mg/L) não influenciou a pré-seleção.
- O cenário que considerou aporte maior de amônia, considerando a amonificação completa antes do lançamento dos esgotos nos corpos d'água, não produziu diferenças nas alternativas de tratamento pré-selecionadas para valores de pH iguais ou menores que 7,5, quando comparado ao cenário que considerou os valores máximos de concentração de nitrogênio orgânico e nitrogênio amoniacal usualmente observados no esgoto bruto.

- Com exceção dos povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, que apresentaram a mesma pré-seleção sistemas de tratamento para diferentes faixas de pH, constatou-se que as demais localidades analisadas apresentaram conjunto de sistemas de tratamento menor para a faixa de pH entre 7,5 e 8,0 do que para a faixa de pH inferior ou igual a 7,5. Este aspecto evidencia o fato de que, com o aumento do pH assumido para os cursos d'água, os sistemas necessitam ser mais eficientes quanto a remoção de amônia, função do comportamento tóxico deste constituinte. Embora a toxicidade dos compostos de amônia em corpos d'água doce sejam influenciados pelos valores de temperatura, salinidade e pH dos corpos d'água (REIS; MENDONÇA, 2009), o presente estudo considerou apenas o efeito do pH, visto que os padrões de qualidade ambiental estabelecidos no Brasil não incorporaram os efeitos da temperatura e/ou da salinidade.

Ao se analisar os quadros de B1 a B12 apresentados no APÊNDICE B deste trabalho, nos quais encontram-se elencados os sistemas de tratamento pré-selecionados considerando-se os rios como classe 3, pode-se observar que:

- Para cada condição de disposição final de efluentes, as cinco localidades apresentaram as mesmas alternativas de tratamento pré-selecionadas para ambos cenários e faixas de pH analisados, com a exceção das localidades de Ibatiba e Irupi para águas com valores de pH entre 8,0 e 8,5.
- Para todas as condições de disposição final de esgotos avaliadas, os sistemas de tratamento pré-selecionados para os povoados de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças foram idênticos.
- Os sistemas de tratamento pré-selecionados por condição de disposição final de efluentes para as localidades de Ibatiba e Irupi são idênticos, com a exceção das alternativas pré-selecionadas para águas com valores de pH entre 8,0 e 8,5. As alternativas de tratamento pré-selecionadas para águas com pH entre 8,0 e 8,5 apresentaram-se em menor número que as selecionadas para águas com valores de pH inferior ou igual a 8,0, função do potencial aumento da toxicidade da amônia com a elevação de pH. Para valores de pH entre 8,0 e

8,5, a diversidade de alternativas pré-selecionadas para o segundo cenário de disposição de efluentes (nitrogênio total exclusivamente sob a forma de amônia) foi menor que a do primeiro cenário.

- Assim como para águas classe 2, a localidade que apresentou maior diversidade de opções de tratamento de esgotos foi Lúna, embora os povoados de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade tenham apresentado as menores eficiências requeridas tanto para DBO quanto para amônia. Este aspecto foi decorrente da não consideração de sistemas mecanizados que demandem potência para aeração para os referidos povoados. Para a localidade de Lúna, o critério de pré-seleção excluiu apenas os sistemas de disposição final no solo.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho proposto empregou modelagem de qualidade de água combinada com uma técnica de otimização, visando determinar eficiências mínimas de tratamento de DBO e nitrogênio de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica. As principais conclusões deste trabalho podem ser assim sumarizadas:

- Ao se considerar que a disposição do esgoto bruto após amonificação completa, com concentração de nitrogênio orgânico nula e concentração de amônia 80 mg/L (cenário 2), quanto ao OD, observou-se que as concentrações de oxigênio dissolvido no rio Pardo não atenderam ao limite mínimo estabelecido para rios classe 2. Os padrões de qualidade ambiental fixados para DBO considerando cursos d'água classe 2 e 3 foram superados em trechos dos rios Pardo e Pardinho. Quanto à amônia, para rios classe 2, os rios Pardo e Pardinho apresentaram trechos com concentrações superiores aos padrões de qualidade ambiental para quaisquer valores de pH; para rios classe 3, a concentração de nitrogênio amoniacal para estes dois rios só superaria o padrão estabelecido para águas com valores de pH superior a 8,0. Para os parâmetros nitrito e nitrato, os padrões de qualidade ambientais fixados foram atendidos, independentemente da classe de uso considerada.
- Considerando a disposição de esgotos brutos com concentração de nitrogênio orgânico no esgoto bruto de 30 mg/L e concentração de amônia no esgoto bruto de 50 mg/L (cenário 1), as concentrações para o OD apresentaram-se de acordo com os padrões de qualidade ambientais estabelecidos para rios classe 2 e 3. Os padrões de qualidade ambiental de DBO fixados para cursos d'água classe 2 e 3 foram superados em trechos dos rios Pardo e Pardinho. Os padrões ambientais para amônia em rios classe 2 foram atendidos quando os valores de pH apresentaram-se iguais ou inferiores a 7,5. Para rios classe 3, os padrões de qualidade ambientais foram respeitados para águas com valores de pH inferiores ou iguais a 8,0. Os padrões de qualidade ambiental dos parâmetros nitrito e nitrato foram atendidos para as diferentes classes de uso.

- O uso combinado do modelo de qualidade de água e uma técnica de otimização permitiu a determinação de eficiências mínimas de remoção de DBO e amônia para os diferentes sistemas de tratamento de efluentes da bacia do rio Pardo. Nas simulações em que a condição de lançamento considerou o emprego da capacidade de autodepuração para a assimilação dos efluentes (condição de lançamento 1), as eficiências de DBO variaram de zero a 87%, enquanto que para as condições de lançamento que adotaram concentrações máximas de DBO ou níveis mínimos de remoção de DBO, conforme valores fixados pela legislação ambiental (condições de lançamento 2 e 3), as eficiências de remoção deste constituinte variaram de 60 a 84%. Neste contexto, subestimar a capacidade de autodepuração dos corpos d'água pode provocar aumento expressivo nas eficiências de remoção de DBO e, conseqüentemente, superestimar as plantas de tratamento, com adoção de sistemas de tratamentos mais robustos e de custos mais elevados, contribuindo para a gestão inadequada dos recursos financeiros destinados à implantação e operação de ETEs, geralmente limitados.
- Em função do potencial aumento da toxicidade da amônia com a elevação de pH, os sistemas de tratamento precisam ser mais eficientes quanto à remoção dos compostos amoniacais. Desta forma, a diversidade dos sistemas de tratamento pré-selecionados foi maior naquelas condições de simulação para as quais foram assumidos valores de pH iguais ou menores que 7,5.
- Ao se comparar as alternativas de tratamento pré-selecionadas para os dois cenários associados à distribuição de nitrogênio orgânico e amônia nos esgotos brutos, observou-se que para águas com valores de pH inferiores ou iguais a 7,5 não foram estabelecidas diferenças significativas quanto aos sistemas de tratamento pré-selecionados; no entanto, para águas com valores de pH entre 7,5 e 8,0, o primeiro cenário apresentou maior diversidade de alternativas de tratamento pré-selecionadas que para o cenário 2, indicando que para este último cenário (função da maior concentração de amônia nos esgotos brutos) os sistemas de tratamento precisam ser mais eficientes quanto a remoção de amônia.

- Considerando-se o emprego da capacidade de autodepuração dos rios sem a imposição de padrões de qualidades para os efluentes, a perspectiva de enquadramento na classe 2 e esgotos brutos que apresentem as diferentes formas de nitrogênio e valores de pH entre 7,5 e 8,0, os sistemas de tratamento pré-selecionados para localidades mais populosas (Ibatiba, por exemplo) foram lodos ativados e suas variações e biofiltro aerado submerso com nitrificação ou com remoção biológica de nitrogênio. Para os povoados Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, nas mesmas condições de análise, foram pré-selecionados sistemas mais simples como tratamento primário com tanques sépticos, variações dos sistemas de lagoas de estabilização, reatores UASB em associação com filtro anaeróbio, filtro biológico percolador de alta carga, lagoa de polimento ou escoamento superficial, filtros biológicos e biodisco.

Consideram-se como recomendações para trabalhos futuros:

- Condução de trabalhos que utilizem a metodologia proposta pelo presente trabalho, considerando a modelagem de outros parâmetros da qualidade de água.
- Condução de trabalhos que utilizem a metodologia proposta pelo presente trabalho, com outras técnicas de otimização ou outros modelos de otimização.
- Condução de trabalhos que utilizem a metodologia proposta pelo presente trabalho, considerando outras distribuições dos compostos de amônia no esgoto bruto.
- Condução de trabalhos que utilizem a metodologia proposta pelo presente trabalho, considerando bacias hidrográficas com diversificadas condições iniciais de qualidade e disponibilidades hídricas.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE JÚNIOR, J. C. **Plano Diretor de Recursos Hídricos das Bacias do Leste**. Belo Horizonte: Fundação Rural Mineira de Colonização e Desenvolvimento Agrário – RURALMINAS, 2000.

ALBERTIN, L. L. **Avaliação da quantidade e qualidade dos recursos hídricos superficiais da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí-Mirim (SP) através do Simulador Computacional MIKE BASIN**. 2004. 160 f. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2004.

ALBERTIN, L. L. **Técnica de gerenciamento da qualidade hídrica superficial baseada na otimização multiobjetivo**. 2008. 191 f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2008.

ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; DANIEL, L. A. Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 209-219, 2006.

ANDRADE, L. N. de.; MAURI, G. R.; MENDONÇA, A. S. F. General Multiobjective Model and Simulated Annealing Algorithm for Waste-Load Allocation. *Journal of Water Resources Planning and Management*, v. 139, n. 3, p. 339-344, 2013.

ARAS, E.; TOGAN, V.; BERKUN, M. River water quality management model using genetic algorithm. **Environmental Fluidic Mechanical**. v. 7.p. 439-450, 2007.

ARAÚJO, R. S.; ALVES, M. G.; MELO, T. C.; CHRISPIM, Z. M. P.; MENDES, M. P.; JUNIOR, G. C. S. Water resource management: A comparative evaluation of Brazil, Rio de Janeiro, the European Union, and Portugal. **Science of the Total Environment**, v. 511, p. 815-828, 2015.

BARBOSA, P. S. F. E. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002, p. 97-163.

BOWIE, G. L.; MILLS, W. B.; PORCELLA, D. B.; CAMPBELL, C. L.; PAGENKOPF, J. R.; RUPP, G. L.; JOHNSON, K. M.; CHAN, P. W. H.; GHERINI, S.A. **Rates, Constants, and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling (Second Edition)**. Technical Report EPA-600/3-85-040, USEPA, 1985.

BRAGA, B; BARBOSA, P. S. F; NAKAYAMA, P.T. Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 3, n. 3, p. 73-95, 1998.

BRASIL. Agência Nacional das Águas. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA. **Atlas esgotos: despolição de bacias hidrográficas**. Brasília: ANA, 2017. 88 p.

\_\_\_\_\_. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 8 jan. de 1997.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2016**. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2018. 220 p.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 17 mar. de 2005.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 13 mai. de 2011.

BRINGER, L. M.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Wastewater treatment systems selection inside watersheds by using multiobjective analysis. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, e22, 2018.

BRINGER, L. M. **Seleção de Sistemas de Tratamento de Esgotos no Âmbito de Bacias Hidrográficas a partir do emprego de Modelagem de Qualidade, Otimização e da Análise Multiobjetivo**. 2017. 209 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2017.

BURN, D. H.; YULIANTI, J. S. Waste-load allocation using genetic algorithms. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 127, n. 2, p. 121-129, 2001.

CALMON, A. P. S.; SOUZA, J. C.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 21, n. 1, p. 118-133, 2016.

CARVALHO, R. C; KAVISKI, E. Modelo de Auxílio à Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 14, n. 4, p. 17-27, 2009.

CHAPRA, S.C. **Surface water quality modeling**. McGraw-Hill, New York, 1997.

CHAPRA, S. C.; PELLETIER, G.; TAO, H. **QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11**: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA, 2008. 109 p.

CHERNICHARO, C. A. L.; van HAANDEL, A. C.; FORESTI, E.; CYBIS, L. F. Introdução. In: CHERNICHARO, C. A. L. (Coord.). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte, MG, 2001, v. 1, p. 19-34.

CHO, J. H., SUNG, K. S., HA, S. R. A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm. **Journal Environment Management**, v. 73, n. 3, p. 229–242, 2004.

EIGER, S. Autodepuração dos cursos d'água. In: MANCUSO, P. C. S., SANTOS, H. F. dos. **Reúso de água**. Faculdade de Saúde Pública – USP. Núcleo de Informações em Saúde Ambiental. Barueri, SP: Manole, 2003. p. 233-259.

ERICKSON, R. J. An evaluation of mathematical models for the effects of pH and temperature on ammonia toxicity to aquatic organisms. **Water Research**, n. 19, p. 1047-1058, 1985.

EPA, United States Environmental Protection Agency. **The enhanced stream water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS. Documentation and user model**. Athens 1987. 189 p.

FANTIN, L. L. D. O.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Proposal of a methodology for pre-selection of sewage treatment systems within watersheds. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e12, 2017.

FEIZI ASHTIANI, E.; NIKSOKHAN, M. H.; ARDESTANI, M. Multi-objective Waste Load Allocation in River System by MOPSO Algorithm. **International Journal of Environmental Research**, v. 9, n. 1, p. 69-76, 2015.

FERNANDES, F.; LOPES, D. D.; ANDREOLI, C. V.; SILVA, S. M. C. P. Avaliação de alternativas e gerenciamento do lodo na ETE. In: ANDREOLI, C.V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. V.6. Lodo de esgotos. Tratamento e disposição final**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. Companhia de Saneamento do Paraná – SANEPAR, 2001. 484 p.

FORMIGA, K. T. M. **Otimização multiobjetivo de projetos de rede de distribuição de água**. 2005, 305 f., Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP.

GASS.; SAATY, T. L. The computational algorithm for the parametric objective function. **Naval Research Logistics Quaterly**, v. 2(1-2), p. 39-45, 1955.

HAUPT, R. L; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. Wiley Inter science Publication, 1998.

HYDROSCIENCE, Inc. **Simplified Mathematical Modeling of Water Quality**, EPA-Water Programs, 1971.

JORDÃO, E. P; PESSOA, C. A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

KAINI, P.; ARTITA, K.; NICKLOW, J. W. Optimizing Structural Best Management Practices Using SWAT and Genetic Algorithm to Improve Water Quality Goals. **Water Resour Manage**, v. 26, n 7, p. 1827-1845, 2012.

KNAPIK, H. G.; FERNANDES, S., C. V.; BASSANESI, K.; PORTO, M. F. do A. Qualidade da Água da Bacia do Rio Iguaçu: Diferenças Conceituais entre os Modelos QUAL2E e QUAL2K. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, n. 2, p. 75-88, 2011.

LACERDA, E. G. M. de; CARVALHO, A. C. P. L. F. de. Introdução aos algoritmos genéticos. In: Galvão, C. de O.; Valença, M.J.S. (Orgs.). **Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre, RS: Ed. Universidade/UFRGS, 1999. p. 99-150.

LANNA, A. E. Introdução. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002, p. 15-41.

LARENTIS, D. G.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Simulação da qualidade de água em grandes bacias: Rio Taquari-Antas, RS. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 05-22, 2008.

LARENTIS, D. G. **Modelagem Matemática da Qualidade da Água em Grandes Bacias: Sistema Taquari-Antas - RS**. 2004. 177 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

LEWIS Jr. W. M.; WURTSBAUGH, W.A.; PAERL, H.W. Rationale for control of anthropogenic nitrogen and phosphorus to reduce eutrophication of Inland Waters. **Environmental Science and Technology**, v. 45, p. 10300-10305, 2011.

LOUATI, M. H.; BENABDALLAH, S.; LEBDI, F.; MILUTIN, D. Application of a Genetic Algorithm for the Optimization of a Complex Reservoir System in Tunisia. **Water Resour Manage**, v. 25, p. 2387-2404, 2011.

LOUZADA, J. P; REIS, J. A. T; MENDONÇA, A. S. F. Uso de otimização e modelagem de qualidade de água no planejamento de implantação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 1, p. 277-286, 2013.

MACHADO, E. S.; PORTO, M. F. A.; KAVISKI, E. Otimização do Planejamento de Sistemas Regionais de Tratamento de Efluentes Através de Simulação Monte Carlo e da Metaheurística do Recozimento Simulado. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p. 29-38, 2012.

MAIER, H. R.; KAPELAN, Z.; KASPRZYK, J.; KOLLAT, J.; MATOTT, L. S.; CUNHA, M. C.; DANDY, G. C.; GIBBS, M. S.; KEEDWELL, E.; MARCHI, A.; OSTFELD, A.; SAVIC, D.; SOLOMATINE, D. P.; VRUGT, J. A.; ZECCHIN, A. C.; MINSKER, B. S.; BARBOUR, E. J.; KUCZERA, G.; PASHA, F.; CASTELLETI, A.; GIULIANI, M.; REED, P. M. Evolutionary algorithms and other metaheuristics in water resources: current status, research challenges and future directions. **Environmental Modelling and Software**, v. 62, p. 271-299, 2014.

MARSH, M. T.; SCHILLING, D. A. Equity measurement in facility location analysis: A review and framework. **European Journal of Operational Research**, v. 74, n. 1, p. 1-17, 1994.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. Tradução: Ivanildo Hespanhol, José Carlos Mierzwa. 5ªed. Porto Alegre: AMGH, 2016. 1980 p.

MULLIGAN, G. F. Equality measures and facility location. **Regional Science**, v. 70, n. 4, p. 345-365, 1991.

NICKLOW, J. W.; REED, P. M.; SAVIC, D.; DESSALEGNE, T.; HARRELL, L.; CHANHILTON, A.; KARAMOUZ, M.; MINSKER, B.; OSTFELD, A.; SINGH, A.; ZECHMAN, E. State of the art for genetic algorithms and beyond in water resources planning and management. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 136, n. 4, p. 412-432, 2010.

NYENJE, P. M.; FOPPEN, J. W.; UHLENBROOK, S.; KULABAKO, R.; MUWANGA, A. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-Saharan Africa – A review. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 447-455, 2010.

PALIWAL, R.; SHARMA, P.; KANSAL, A. Water quality modelling of the river Yamuna (India) using QUAL2E-UNCAS. **Journal of Environmental Management**, v. 83, n. 2, p. 131-144, 2007.

PARK, S. S.; LEE, Y. S. A water quality modeling study of the Nakdong River, Korea. **Ecological Modelling**, v. 152, p. 65-75, 2002.

PERRIN, J. L.; RAJIS, N.; CHAHINIAN, N.; MOULIN, P.; IJJAALI, M. Water quality assessment of highly polluted rivers in a semi-arid Mediterranean zone Oued Fez and Sebou River (Morocco). **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 26-34, 2014.

POPOVIC. T.; KRASLAWSKI, A; AVRAMENKO, Y. Applicability of sustainability indicators to waste- water treatment processes. **Computer Aided Chemical Engineering**, v. 32, p. 931–936, 2013.

PORTO, R. L. L; AZEVEDO, L. G. T. Sistemas de Suporte a Decisões Aplicados a Problemas de Recursos Hídricos. In: PORTO, R. L. L. (Org.). **Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Porto Alegre, RS: Ed. Universidade/UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002, p. 43-95.

REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Análise técnica dos novos padrões brasileiros para amônia em efluentes e corpos d'água. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 353-362, 2009.

REIS, J. A. T.; VALORY, J. L. P.; MENDONÇA, A. S. F. Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da manutenção de equidade entre sistemas de tratamento - uma abordagem para o gerenciamento de bacias hidrográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 862 - 871, 2015.

SAADATPOUR, M. AFSHAR. A. Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation- optimization approach. **Water Resource Management**, v. 21, p. 1207-1224, 2007.

SALLA, M. R.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; DE PAULA, L. M.; PINHEIRO, A. M. Estudo da autodepuração do Rio Jordão, localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 105-114, 2013.

SANTORO, M. C. **Modelos de otimização para determinação de eficiências de sistemas de tratamento de efluentes domésticos no âmbito de uma bacia hidrográfica**. 2016. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2016.

SANTORO, M. C.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Performance evaluation of optimization models in the determination of wastewater treatment efficiencies inside watersheds. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 21, n. 4, p. 694-706, 2016.

SANTOS, V. S. **Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos**. 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2007.

SHARMA, D., KANSAL, A., PELLETIER, G. Water quality modeling for urban reach of Yamuna river, India (1999–2009), using QUAL2Kw. *Applied Water Science*. v. 7, p. 1535-1559, 2017.

SOARES, A. K. **Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão**. 2003. 178 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2003.

STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. A study of the pollution and natural purification of Ohio river, III. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration. **Bulletin 146. Public Health Service**, Washington, DC, USA. 1925.

TEODORO, A.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BROCH, A. O.; DA SILVA, J. B. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 3, p. 275-288, 2013.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. **Principles of surface water quality modeling and control**. New York. Ed. Harper & Row, 1987.

VALORY, J. P. L.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Combining Genetic Algorithms with a Water Quality Model to Determine Efficiencies of Sewage Treatment Systems in Watersheds, **Journal of Environmental Engineering**, v. 142, n. 3, 2016.

VEIGA, L. B. E.; MAGRINI, A. The Brazilian Water Resources Management Policy: Fifteen Years of Success and Challenges. **Water Resources Management**, v. 27, n. 7, p. 2287-2302, 2013.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Introdução à qualidade das águas e ao tratamento dos esgotos**. 4 ed. Belo Horizonte, MG: Ed. DESA/UFMG, 2014a.

\_\_\_\_\_. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 3 ed. Belo Horizonte, MG: Ed. DESA/UFMG. 2014b.

YANDAMURI, S. R. M.; SRINIVASAN, K.; BHALLAMUDI, S. M. Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic 147 algorithm-II. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 132, n. 3, p. 133-143, 2006.

ZANDONADI, L. U.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS, J. A. T. Outorga de lançamento de efluentes em rios - estimativas de vazões de diluição. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 1, p. 179-191, 2016.

ZENG, G.; JIANG, R.; HUANG, G.; XU, M.; LI, J. Optimization of wastewater treatment alternative selection by hierarchy grey relational analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 82, p. 250-259, 2007.

ZUFFEREY, N. Metaheuristics: some principles for an efficient design. **Journal of Computer Science and Technology**, v. 3, n. 6, p. 446-462, 2012.

## APÊNDICE A – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DOS MODELOS DE OTIMIZAÇÃO

### Modelo de Otimização 1

Tabela A 1 – Eficiências de remoção de DBO estimadas pelo Modelo de Otimização 1.

| Classe de enquadramento das águas doces | Padrão de Qualidade Ambiental | Ibatiba | Irupi | Iúna  | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças | Valor da função objetivo |
|-----------------------------------------|-------------------------------|---------|-------|-------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| 2                                       | DBO < 5 e OD > 5              | 0,898   | 0,814 | 0,157 | 0,000               | 0,000              | 1,869                    |
|                                         |                               | 0,897   | 0,813 | 0,157 | 0,000               | 0,000              | 1,867                    |
|                                         |                               | 0,884   | 0,814 | 0,165 | 0,000               | 0,000              | 1,863                    |
|                                         |                               | 0,849   | 0,814 | 0,185 | 0,000               | 0,000              | 1,847                    |
|                                         |                               | 0,895   | 0,814 | 0,159 | 0,000               | 0,000              | 1,868                    |
| 3                                       | DBO < 10 e OD > 4             | 0,525   | 0,401 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,926                    |
|                                         |                               | 0,525   | 0,401 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,926                    |
|                                         |                               | 0,525   | 0,364 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,889                    |
|                                         |                               | 0,526   | 0,364 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,889                    |
|                                         |                               | 0,525   | 0,364 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,888                    |

### Modelo de Otimização 2

Tabela A 2 – Eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para águas classe de enquadramento 2. (Continua)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Ibatiba | Irupi | Iúna  | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|--------------------------------------|---------|-------|-------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| 1       | pH ≤ 7,5                    | Amônia < 3,7                         | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,000                    |
|         | 7,5 < pH ≤ 8,0              | Amônia < 2                           | 0,900   | 0,703 | 0,230 | 0,000               | 0,000              | 1,833                    |
|         |                             |                                      | 0,900   | 0,703 | 0,230 | 0,000               | 0,000              | 1,833                    |
|         |                             |                                      | 0,796   | 0,703 | 0,326 | 0,000               | 0,000              | 1,825                    |
|         |                             |                                      | 0,900   | 0,704 | 0,230 | 0,000               | 0,000              | 1,834                    |
|         |                             |                                      | 0,795   | 0,703 | 0,327 | 0,000               | 0,000              | 1,825                    |
|         | 8,0 < pH ≤ 8,5              | Amônia < 1                           | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |
|         | pH > 8,5                    | Amônia < 0,5                         | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |

Tabela A 2 – Eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para águas classe de enquadramento 2. (Conclusão)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Padrão de Qualidade Ambiental | Ibatiba | Irupi | Iúna  | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-------------------------------|---------|-------|-------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| 2       | pH ≤ 7,5                    | Amônia < 3,7                  | 0,337   | 0,071 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,409                    |
|         |                             |                               | 0,338   | 0,071 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,409                    |
|         |                             |                               | 0,340   | 0,071 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,411                    |
|         |                             |                               | 0,337   | 0,071 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,409                    |
|         |                             |                               | 0,340   | 0,071 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,411                    |
|         | 7,5 < pH ≤ 8,0              | Amônia < 2                    | 0,896   | 0,812 | 0,413 | 0,000               | 0,000              | 2,121                    |
|         |                             |                               | 0,888   | 0,812 | 0,420 | 0,000               | 0,000              | 2,120                    |
|         |                             |                               | 0,874   | 0,812 | 0,433 | 0,000               | 0,000              | 2,119                    |
|         |                             |                               | 0,874   | 0,812 | 0,433 | 0,000               | 0,000              | 2,119                    |
|         |                             |                               | 0,897   | 0,812 | 0,412 | 0,000               | 0,000              | 2,121                    |
|         | 8,0 < pH ≤ 8,5              | Amônia < 1                    | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |
|         | pH > 8,5                    | Amônia < 0,5                  | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |

Tabela A 3 – Eficiências de remoção de amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 2 para águas classe de enquadramento 3.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Padrão de Qualidade Ambiental (mg/L) | Ibatiba | Irupi | Iúna  | Santíssima Trindade | Nª Sra. das Graças | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|--------------------------------------|---------|-------|-------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| 1       | pH ≤ 7,5                    | Amônia < 13,3                        | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,000                    |
|         | 7,5 < pH ≤ 8,0              | Amônia < 5,6                         | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,000                    |
|         | 8,0 < pH ≤ 8,5              | Amônia < 2,2                         | 0,682   | 0,564 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 1,246                    |
|         |                             |                                      | 0,683   | 0,563 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 1,246                    |
|         |                             |                                      | 0,682   | 0,563 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 1,245                    |
|         |                             |                                      | 0,682   | 0,564 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 1,246                    |
|         |                             |                                      | 0,734   | 0,563 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 1,297                    |
|         | pH > 8,5                    | Amônia < 1                           | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |
| 2       | pH ≤ 7,5                    | Amônia < 13,3                        | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,000                    |
|         | 7,5 < pH ≤ 8,0              | Amônia < 5,6                         | 0,000   | 0,000 | 0,000 | 0,000               | 0,000              | 0,000                    |
|         | 8,0 < pH ≤ 8,5              | Amônia < 2,2                         | 0,900   | 0,725 | 0,102 | 0,000               | 0,000              | 1,727                    |
|         |                             |                                      | 0,897   | 0,725 | 0,104 | 0,000               | 0,000              | 1,726                    |
|         |                             |                                      | 0,896   | 0,725 | 0,106 | 0,000               | 0,000              | 1,726                    |
|         |                             |                                      | 0,884   | 0,725 | 0,117 | 0,000               | 0,000              | 1,725                    |
|         |                             |                                      | 0,896   | 0,725 | 0,105 | 0,000               | 0,000              | 1,726                    |
|         | pH > 8,5                    | Amônia < 1                           | -       | -     | -     | -                   | -                  | -                        |

## Modelo de Otimização 3

Tabela A 4 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando a capacidade de autodepuração e os rios classe 2.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                                       | 0,839          | 0,806 | 0,145 | 0,000          | 0,000              | 1,790                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,880          | 0,806 | 0,124 | 0,000          | 0,000              | 1,810                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,861          | 0,806 | 0,134 | 0,000          | 0,000              | 1,801                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,897          | 0,807 | 0,115 | 0,000          | 0,000              | 1,819                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                                       | 0,896          | 0,806 | 0,116 | 0,000          | 0,000              | 1,817                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,885          | 0,805 | 0,121 | 0,000          | 0,000              | 3,644                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,897          | 0,703 | 0,233 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,883          | 0,805 | 0,123 | 0,000          | 0,000              | 3,635                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,804          | 0,703 | 0,319 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,870          | 0,806 | 0,129 | 0,000          | 0,000              | 3,632                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,813          | 0,703 | 0,311 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,881          | 0,806 | 0,123 | 0,000          | 0,000              | 3,643                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,891          | 0,703 | 0,238 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,877          | 0,806 | 0,126 | 0,000          | 0,000              | 3,633                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,794          | 0,703 | 0,328 | 0,000          | 0,000              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                                       | 0,869          | 0,805 | 0,130 | 0,000          | 0,000              | 1,803                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,900          | 0,813 | 0,113 | 0,000          | 0,000              | 1,826                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,875          | 0,806 | 0,127 | 0,000          | 0,000              | 1,807                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,147 | 0,000          | 0,000              | 1,788                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                                       | 0,837          | 0,805 | 0,147 | 0,000          | 0,000              | 1,788                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,847          | 0,807 | 0,142 | 0,000          | 0,000              | 3,932                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,892          | 0,819 | 0,426 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,878          | 0,806 | 0,125 | 0,000          | 0,000              | 3,939                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,898          | 0,812 | 0,419 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,896          | 0,805 | 0,116 | 0,000          | 0,000              | 3,946                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,899          | 0,812 | 0,418 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,884          | 0,806 | 0,122 | 0,000          | 0,000              | 3,940                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,886          | 0,812 | 0,431 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,882          | 0,806 | 0,123 | 0,000          | 0,000              | 3,940                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,897          | 0,812 | 0,420 | 0,000          | 0,000              |                          |

Tabela A 5 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando a capacidade de autodepuração e os rios classe 3. (Continua)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental | Eficiência (%) |       |       |                |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                               | Ibatiba        | Irupi | Lúna  | Sant. Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 10                            | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,527          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,888                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,527          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,891                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,888                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                           | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,527          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                           | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,888                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                           | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 2,135                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                           | 0,682          | 0,563 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 2,187                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                           | 0,734          | 0,564 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 2,135                    |
| Amônia  |                             | 2,2       | 0,682                         | 0,564          | 0,000 | 0,000 | 0,000          |                    |                          |
| DBO     |                             | 10        | 0,526                         | 0,364          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 2,135              |                          |
| Amônia  |                             | 2,2       | 0,682                         | 0,563          | 0,000 | 0,000 | 0,000          |                    |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,888                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000              | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |

Tabela A 5 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 considerando a capacidade de autodepuração e os rios classe 3. (Conclusão)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 2       | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,365 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 2,617                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,885          | 0,726 | 0,115 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,525          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 2,615                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,896          | 0,725 | 0,106 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,890                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,831          | 0,725 | 0,165 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,900          | 0,725 | 0,102 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,526          | 0,364 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 0,889                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,863          | 0,725 | 0,136 | 0,000          | 0,000                          |                          |

Tabela A 6 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 2. (Continua)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,709 | 0,702          | 0,710                          | 3,765                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,001 | 0,000 | 0,002          | 0,002                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,805 | 0,704 | 0,707          | 0,709                          | 3,765                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,001          | 0,000 | 0,001 | 0,000          | 0,001                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,740                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,708 | 0,701          | 0,703                          | 3,752                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,806 | 0,703 | 0,708          | 0,705                          | 3,762                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,004 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |

Tabela A 6 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 2. (Conclusão)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental | Eficiência (%) |       |       |                |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                               | Ibatiba        | Irupi | Lúna  | Sant. Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
|         |                             |           |                               |                |       |       |                |                    |                          |
|         |                             |           | (mg/L)                        |                |       |       |                |                    |                          |
| 1       | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                             | 0,836          | 0,805 | 0,708 | 0,708          | 0,701              | 5,587                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,844          | 0,704 | 0,282 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,836          | 0,805 | 0,708 | 0,701          | 0,711              | 5,594                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,890          | 0,703 | 0,240 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,806 | 0,709 | 0,703          | 0,708              | 5,589                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,820          | 0,703 | 0,304 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,838          | 0,807 | 0,706 | 0,709          | 0,705              | 5,602                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,847          | 0,703 | 0,281 | 0,004          | 0,003              |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,805 | 0,708 | 0,700          | 0,702              | 4,159                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                           | 0,338          | 0,071 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,836          | 0,805 | 0,710 | 0,700          | 0,708              | 4,168                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                           | 0,338          | 0,071 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,841          | 0,814 | 0,708 | 0,731          | 0,715              | 4,246                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                           | 0,341          | 0,076 | 0,015 | 0,002          | 0,003              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,806 | 0,709 | 0,701          | 0,703              | 4,164                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                           | 0,338          | 0,072 | 0,000 | 0,001          | 0,000              |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,805 | 0,700 | 0,705          | 0,708              | 4,162                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                           | 0,338          | 0,071 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,805 | 0,708 | 0,700          | 0,700              | 5,877                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,896          | 0,812 | 0,421 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,835          | 0,805 | 0,708 | 0,706          | 0,700              | 5,883                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,892          | 0,812 | 0,425 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 5                             | 0,838          | 0,808 | 0,712 | 0,708          | 0,711              | 5,913                    |
|         |                             | Amônia    | 2                             | 0,889          | 0,813 | 0,429 | 0,008          | 0,000              |                          |
| DBO     | 5                           | 0,836     | 0,806                         | 0,711          | 0,709 | 0,701 | 5,891          |                    |                          |
| Amônia  | 2                           | 0,884     | 0,813                         | 0,432          | 0,000 | 0,000 |                |                    |                          |
| DBO     | 5                           | 0,835     | 0,807                         | 0,708          | 0,708 | 0,700 | 5,887          |                    |                          |
| Amônia  | 2                           | 0,884     | 0,813                         | 0,432          | 0,000 | 0,000 |                |                    |                          |

Tabela A 7 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 3. (Continua)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental | Eficiência (%) |       |       |                |                    | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                               | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | Nª Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      |           | (mg/L)                        |                |       |       |                |                    |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700              | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700              | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700              | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700              | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                          | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000              |                          |
|         |                             | DBO       | 10                            | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700              | 3,500                    |
| Amônia  | 13,3                        | 0,000     | 0,000                         | 0,000          | 0,000 | 0,000 |                |                    |                          |

Tabela A 7 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para DBO máxima no efluente de 120 mg/L e os rios classe 3. (Conclusão)

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                                      | 0,710          | 0,701 | 0,706 | 0,703          | 0,701                          | 4,777                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,684          | 0,567 | 0,003 | 0,000          | 0,001                          | 4,826                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,720          | 0,704 | 0,716 | 0,710          | 0,715                          | 4,781                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,683          | 0,565 | 0,010 | 0,001          | 0,002                          | 4,761                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,708          | 0,701 | 0,709 | 0,708          | 0,703                          | 4,820                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,684          | 0,566 | 0,001 | 0,000          | 0,001                          | 4,761                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,708 | 0,700 | 0,700          | 0,707                          | 4,820                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,682          | 0,563 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 4,820                    |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,700          | 0,700 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 3,500                    |
|         |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          | 3,500                    |
|         | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                                      | 0,715          | 0,718 | 0,700 | 0,716          | 0,709                          | 5,304                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,891          | 0,725 | 0,121 | 0,005          | 0,003                          | 5,247                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,708          | 0,710 | 0,701 | 0,701          | 0,700                          | 5,235                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,876          | 0,725 | 0,124 | 0,001          | 0,000                          | 5,235                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,708          | 0,703 | 0,700 | 0,700          | 0,700                          | 5,257                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,867          | 0,725 | 0,131 | 0,000          | 0,000                          | 5,257                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,708          | 0,708 | 0,709 | 0,700          | 0,709                          | 5,287                    |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,826          | 0,726 | 0,169 | 0,001          | 0,001                          | 5,287                    |
|         |                             | DBO       | 10                                      | 0,706          | 0,708 | 0,716 | 0,713          | 0,710                          |                          |
|         |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,864          | 0,726 | 0,137 | 0,004          | 0,003                          |                          |

Tabela A 8 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e rios classe 2.

| Cenário | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|---------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|         |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                                       | 0,839          | 0,805 | 0,605 | 0,605          | 0,603                          | 3,466                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,002 | 0,002 | 0,001          | 0,004                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,605 | 0,608          | 0,607                          | 3,460                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,843          | 0,807 | 0,613 | 0,607          | 0,610                          | 3,490                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,003          | 0,000 | 0,002 | 0,000          | 0,007                          |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,607 | 0,601          | 0,601                          | 3,449                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,806 | 0,606 | 0,600          | 0,606                          | 3,454                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,604 | 0,600          | 0,600                          | 5,271                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,830          | 0,703 | 0,295 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,606          | 0,600                          | 5,280                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,828          | 0,703 | 0,297 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,600          | 0,606                          | 5,280                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,827          | 0,703 | 0,298 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,600 | 0,606          | 0,600                          | 5,277                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,871          | 0,703 | 0,257 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,600          | 0,600                          | 5,279                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,899          | 0,703 | 0,232 | 0,000          | 0,000                          |                          |
| 2       | pH≤7,5                      | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,805 | 0,606 | 0,600          | 0,601                          | 3,858                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,338          | 0,072 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,603          | 0,606                          | 3,865                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,338          | 0,072 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,600 | 0,600          | 0,604                          | 3,853                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,337          | 0,071 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,805 | 0,600 | 0,606          | 0,606                          | 3,868                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,339          | 0,073 | 0,002 | 0,000          | 0,002                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,836          | 0,805 | 0,606 | 0,606          | 0,606                          | 3,871                    |
|         |                             | Amônia    | 3,7                                     | 0,338          | 0,072 | 0,001 | 0,000          | 0,001                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,600          | 0,600                          | 5,574                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,888          | 0,812 | 0,428 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,600 | 0,601          | 0,600                          | 5,572                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,896          | 0,812 | 0,421 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,602          | 0,601                          | 5,578                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,888          | 0,813 | 0,429 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,606 | 0,600          | 0,606                          | 5,581                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,895          | 0,812 | 0,422 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|         |                             | DBO       | 5                                       | 0,835          | 0,805 | 0,600 | 0,606          | 0,600                          | 5,576                    |
|         |                             | Amônia    | 2                                       | 0,896          | 0,812 | 0,421 | 0,000          | 0,000                          |                          |

Tabela A 9 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e rios classe 3. (Continua)

| Condição de lançamento | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|                        |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Lúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 1                      | pH≤7,5                      | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                                      | 0,606          | 0,606 | 0,600 | 0,607          | 0,600                          | 4,266                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,682          | 0,564 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,606                          | 4,253                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,682          | 0,563 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,605          | 0,606 | 0,607 | 0,608          | 0,602                          | 4,280                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,686          | 0,565 | 0,000 | 0,002          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,606          | 0,625 | 0,600 | 0,601          | 0,611                          | 4,292                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,683          | 0,563 | 0,001 | 0,001          | 0,000                          |                          |
| 2                      | pH≤7,5                      | DBO       | 10                                      | 0,607          | 0,602 | 0,610 | 0,610          | 0,604                          | 4,289                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,686          | 0,565 | 0,001 | 0,004          | 0,002                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 13,3                                    | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        | 7,5<pH≤8,0                  | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,600 | 0,600          | 0,600                          | 3,000                    |
|                        |                             | Amônia    | 5,6                                     | 0,000          | 0,000 | 0,000 | 0,000          | 0,000                          |                          |

Tabela A 9 – Eficiências de remoção de DBO e amônia estimadas pelo Modelo de Otimização 3 para eficiência mínima de remoção de DBO de 60% e rios classe 3. (Conclusão)

| Condição de lançamento | pH do curso d'água receptor | Parâmetro | Padrão de Qualidade Ambiental<br>(mg/L) | Eficiência (%) |       |       |                |                                | Valor da função objetivo |
|------------------------|-----------------------------|-----------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|----------------|--------------------------------|--------------------------|
|                        |                             |           |                                         | Ibatiba        | Irupi | Iúna  | Sant. Trindade | N <sup>a</sup> Sra. das Graças |                          |
| 2                      | 8,0<pH≤8,5                  | DBO       | 10                                      | 0,604          | 0,600 | 0,601 | 0,607          | 0,601                          | 4,737                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,865          | 0,725 | 0,134 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,606          | 0,601 | 0,602 | 0,606          | 0,601                          | 4,741                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,812          | 0,727 | 0,182 | 0,003          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,600          | 0,600 | 0,606 | 0,606          | 0,601                          | 4,737                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,840          | 0,725 | 0,157 | 0,002          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,607          | 0,606 | 0,600 | 0,607          | 0,606                          | 4,746                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,804          | 0,725 | 0,190 | 0,000          | 0,000                          |                          |
|                        |                             | DBO       | 10                                      | 0,604          | 0,611 | 0,606 | 0,606          | 0,602                          | 4,759                    |
|                        |                             | Amônia    | 2,2                                     | 0,887          | 0,727 | 0,114 | 0,000          | 0,002                          |                          |

## APÊNDICE B – RESULTADOS DA PRÉ-SELEÇÃO DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO PARA ÁGUAS CLASSE 3

Quadro B 1 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|                | Cenário 1                                                                                                |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |            |
|                | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5 |
| A01            | Tratamento primário avançado                                                                             | Tratamento primário avançado                         |                                                      | Tratamento primário avançado                         | Tratamento primário avançado                         |            |
| A02            |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A03            |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A04            | Lagoa facultativa                                                                                        | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |            |
| A05            | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |            |
| A06            | Lagoa aerada facultativa                                                                                 | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |            |
| A07            | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                                                       | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |            |
| A08            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação                                                     | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação |            |
| A09            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                                                     | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |            |
| A10            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                                                       | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |            |
| A11            |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A12            |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A13            |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A14            | Wetlands                                                                                                 | Wetlands                                             |                                                      | Wetlands                                             | Wetlands                                             |            |
| A15            | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                                                        | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |            |
| A16            | Tanque séptico + infiltração                                                                             | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |            |
| A17            | Reator UASB                                                                                              | Reator UASB                                          |                                                      | Reator UASB                                          | Reator UASB                                          |            |
| A18            | UASB + lodos ativados                                                                                    | UASB + lodos ativados                                |                                                      | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |            |
| A19            | UASB + biofiltro aerado submerso                                                                         | UASB + biofiltro aerado submerso                     |                                                      | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |            |
| A20            | UASB + filtro anaeróbio                                                                                  | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |            |
| A21            | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                                                         | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |            |
| A22            | UASB + flotação por ar dissolvido                                                                        | UASB + flotação por ar dissolvido                    |                                                      | UASB + flotação por ar dissolvido                    | UASB + flotação por ar dissolvido                    |            |

Quadro B 1 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|                | Cenário 1                                                                                                |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |            |
|                | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5 |
| A23            | UASB + lagoas de polimento                                                                               | UASB + lagoas de polimento                               |                                                          | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |            |
| A24            | UASB + lagoa aerada facultativa                                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |            |
| A25            | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |            |
| A26            | UASB + escoamento superficial                                                                            | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |            |
| A27            | Lodos ativados convencional                                                                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |            |
| A28            | Lodos ativados - aeração prolongada                                                                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |            |
| A29            | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                                           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |            |
| A30            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                                                   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |            |
| A31            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                                                 | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |            |
| A32            | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                                      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |            |
| A33            | Filtro biológico percolador de baixa carga                                                               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |            |
| A34            | Filtro biológico percolador de alta carga                                                                | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |            |
| A35            | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                                               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |            |
| A36            | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                                                     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |            |
| A37            | Biodisco                                                                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |            |
| TOTAL          | 32                                                                                                       | 32                                                       | 11                                                       | 32                                                       | 32                                                       | 0          |

Quadro B 2 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|                | Cenário 1                                                                          |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |            |
|                | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5 |
| A01            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A02            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A03            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A04            | Lagoa facultativa                                                                  | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |            |
| A05            | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                                | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |            |
| A06            | Lagoa aerada facultativa                                                           | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |            |
| A07            | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                                 | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |            |
| A08            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação                               | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de maturação |            |
| A09            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                               | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |            |
| A10            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                                 | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |            |
| A11            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A12            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A13            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A14            | Wetlands                                                                           | Wetlands                                             |                                                      | Wetlands                                             | Wetlands                                             |            |
| A15            | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                                  | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |            |
| A16            | Tanque séptico + infiltração                                                       | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |            |
| A17            |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A18            | UASB + lodos ativados                                                              | UASB + lodos ativados                                |                                                      | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |            |
| A19            | UASB + biofiltro aerado submerso                                                   | UASB + biofiltro aerado submerso                     |                                                      | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |            |
| A20            | UASB + filtro anaeróbio                                                            | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |            |
| A21            | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                                   | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |            |
| A22            | UASB + flotação por ar dissolvido                                                  | UASB + flotação por ar dissolvido                    |                                                      | UASB + flotação por ar dissolvido                    | UASB + flotação por ar dissolvido                    |            |

Quadro B 2 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                                    |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|----------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|                | Cenário 1                                                                          |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |            |
|                | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5 |
| A23            | UASB + lagoas de polimento                                                         | UASB + lagoas de polimento                               |                                                          | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |            |
| A24            | UASB + lagoa aerada facultativa                                                    | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |            |
| A25            | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                    | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |            |
| A26            | UASB + escoamento superficial                                                      | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |            |
| A27            | Lodos ativados convencional                                                        | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |            |
| A28            | Lodos ativados - aeração prolongada                                                | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |            |
| A29            | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                     | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |            |
| A30            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |            |
| A31            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |            |
| A32            | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |            |
| A33            | Filtro biológico percolador de baixa carga                                         | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |            |
| A34            | Filtro biológico percolador de alta carga                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |            |
| A35            | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                         | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |            |
| A36            | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                               | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |            |
| A37            | Biodisco                                                                           | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |            |
| TOTAL          | 30                                                                                 | 30                                                       | 11                                                       | 30                                                       | 30                                                       | 0          |

Quadro B 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 3: eficiência mínima de remoção de DBO de 60% |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
|                | Cenário 1                                                            |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |            |
|                | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5 |
| A01            |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A02            |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A03            | Tratamento primário avançado                                         | Tratamento primário avançado                         |                                                      | Tratamento primário avançado                         | Tratamento primário avançado                         |            |
| A04            | Lagoa facultativa                                                    | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |            |
| A05            | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |            |
| A06            | Lagoa aerada facultativa                                             | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |            |
| A07            | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |            |
| A08            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  |            |
| A09            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                 | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |            |
| A10            | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |            |
| A11            |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A12            |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A13            |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |            |
| A14            | <i>Wetlands</i>                                                      | <i>Wetlands</i>                                      |                                                      | <i>Wetlands</i>                                      | <i>Wetlands</i>                                      |            |
| A15            | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |            |
| A16            | Tanque séptico + infiltração                                         | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |            |
| A17            | Reator UASB                                                          | Reator UASB                                          |                                                      | Reator UASB                                          | Reator UASB                                          |            |
| A18            | UASB + lodos ativados                                                | UASB + lodos ativados                                |                                                      | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |            |
| A19            | UASB + biofiltro aerado submerso                                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |                                                      | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |            |
| A20            | UASB + filtro anaeróbio                                              | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |            |
| A21            | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |            |
| A22            | UASB + flotação por ar dissolvido                                    | UASB + flotação por ar dissolvido                    |                                                      | UASB + flotação por ar dissolvido                    | UASB + flotação por ar dissolvido                    |            |

Quadro B 3 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Ibatiba, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 1- Ibatiba |                                                                      |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|----------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|------------|
| Alternativa    | Condição de lançamento 3: eficiência mínima de remoção de DBO de 60% |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |            |
|                | Cenário 1                                                            |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |            |
|                | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5 |
| A23            | UASB + lagoas de polimento                                           | UASB + lagoas de polimento                               |                                                          | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |            |
| A24            | UASB + lagoa aerada facultativa                                      | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |            |
| A25            | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                      | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |            |
| A26            | UASB + escoamento superficial                                        | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |            |
| A27            | Lodos ativados convencional                                          | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |            |
| A28            | Lodos ativados - aeração prolongada                                  | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |            |
| A29            | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                       | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |            |
| A30            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N               | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |            |
| A31            | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |            |
| A32            | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                  | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |            |
| A33            | Filtro biológico percolador de baixa carga                           | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |            |
| A34            | Filtro biológico percolador de alta carga                            | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |            |
| A35            | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |            |
| A36            | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                 | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |            |
| A37            | Biodisco                                                             | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |            |
| TOTAL          | 32                                                                   | 32                                                       | 11                                                       | 32                                                       | 32                                                       | 0          |

Quadro B 4 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 2 - Irupi |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|               | Cenário 1                                                                                                |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |                                                      |
|               | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           |
| A01           |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A02           |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A03           | Tratamento primário avançado                                                                             | Tratamento primário avançado                         |                                                      | Tratamento primário avançado                         | Tratamento primário avançado                         |                                                      |
| A04           | Lagoa facultativa                                                                                        | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |                                                      |
| A05           | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      |
| A06           | Lagoa aerada facultativa                                                                                 | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      |
| A07           | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                                                       | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      |
| A08           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  |                                                      |
| A09           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                                                     | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |
| A10           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                                                       | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      |
| A11           |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A12           |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A13           |                                                                                                          |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A14           | Wetlands                                                                                                 | Wetlands                                             |                                                      | Wetlands                                             | Wetlands                                             |                                                      |
| A15           | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                                                        | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      |
| A16           | Tanque séptico + infiltração                                                                             | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      |
| A17           | Reator UASB                                                                                              | Reator UASB                                          |                                                      | Reator UASB                                          | Reator UASB                                          |                                                      |
| A18           | UASB + lodos ativados                                                                                    | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |                                                      |
| A19           | UASB + biofiltro aerado submerso                                                                         | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |                                                      |
| A20           | UASB + filtro anaeróbio                                                                                  | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      |
| A21           | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                                                         | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      |

Quadro B 4 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 2 - Irupi |                                                                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|               | Cenário 1                                                                                                |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|               | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A22           | UASB + flotação por ar dissolvido                                                                        | UASB + flotação por ar dissolvido                        |                                                          | UASB + flotação por ar dissolvido                        | UASB + flotação por ar dissolvido                        |                                                          |
| A23           | UASB + lagoas de polimento                                                                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |                                                          |
| A24           | UASB + lagoa aerada facultativa                                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          |
| A25           | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          |
| A26           | UASB + escoamento superficial                                                                            | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |                                                          |
| A27           | Lodos ativados convencional                                                                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28           | Lodos ativados - aeração prolongada                                                                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                                           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                                                   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                                                 | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32           | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                                      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33           | Filtro biológico percolador de baixa carga                                                               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34           | Filtro biológico percolador de alta carga                                                                | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          |
| A35           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                                               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36           | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                                                     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37           | Biodisco                                                                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL         | 32                                                                                                       | 32                                                       | 15                                                       | 32                                                       | 33                                                       | 11                                                       |

Quadro B 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 2 - Irupi |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|               | Cenário 1                                                                          |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |                                                      |
|               | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           |
| A01           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A02           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A03           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A04           | Lagoa facultativa                                                                  | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |                                                      |
| A05           | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                                | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      |
| A06           | Lagoa aerada facultativa                                                           | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      |
| A07           | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                                 | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      |
| A08           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                                | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  |                                                      |
| A09           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                               | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |
| A10           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                                 | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      |
| A11           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A12           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A13           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A14           | Wetlands                                                                           | Wetlands                                             |                                                      | Wetlands                                             | Wetlands                                             |                                                      |
| A15           | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                                  | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      |
| A16           | Tanque séptico + infiltração                                                       | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |                                                      |
| A17           |                                                                                    |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A18           | UASB + lodos ativados                                                              | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |                                                      |
| A19           | UASB + biofiltro aerado submerso                                                   | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |                                                      |
| A20           | UASB + filtro anaeróbio                                                            | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      |
| A21           | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                                   | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      |
| A22           | UASB + flotação por ar dissolvido                                                  | UASB + flotação por ar dissolvido                    |                                                      | UASB + flotação por ar dissolvido                    | UASB + flotação por ar dissolvido                    |                                                      |

Quadro B 5 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 2 - Irupi |                                                                                    |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|---------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|               | Cenário 1                                                                          |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|               | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A23           | UASB + lagoas de polimento                                                         | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |                                                          |
| A24           | UASB + lagoa aerada facultativa                                                    | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          |
| A25           | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                    | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          |
| A26           | UASB + escoamento superficial                                                      | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |                                                          |
| A27           | Lodos ativados convencional                                                        | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28           | Lodos ativados - aeração prolongada                                                | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                     | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32           | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33           | Filtro biológico percolador de baixa carga                                         | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34           | Filtro biológico percolador de alta carga                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          |
| A35           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                         | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36           | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                               | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37           | Biodisco                                                                           | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL         | 30                                                                                 | 30                                                       | 16                                                       | 30                                                       | 30                                                       | 11                                                       |

Quadro B 6 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 2 - Irupi |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 3: eficiência mínima de remoção de DBO de 60% |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
|               | Cenário 1                                                            |                                                      |                                                      | Cenário 2                                            |                                                      |                                                      |
|               | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           | pH≤7,5                                               | 7,5<pH≤8,0                                           | 8,0<pH≤8,5                                           |
| A01           |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A02           |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A03           | Tratamento primário avançado                                         | Tratamento primário avançado                         |                                                      | Tratamento primário avançado                         | Tratamento primário avançado                         |                                                      |
| A04           | Lagoa facultativa                                                    | Lagoa facultativa                                    |                                                      | Lagoa facultativa                                    | Lagoa facultativa                                    |                                                      |
| A05           | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                  |                                                      |
| A06           | Lagoa aerada facultativa                                             | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      | Lagoa aerada facultativa                             | Lagoa aerada facultativa                             |                                                      |
| A07           | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação                   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   | Lagoa aerada mistura completa - lagoa sedimentação   |                                                      |
| A08           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação  |
| A09           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa                 | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + lagoa de alta taxa |
| A10           | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas   |                                                      |
| A11           |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A12           |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A13           |                                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |                                                      |
| A14           | Wetlands                                                             | Wetlands                                             |                                                      | Wetlands                                             | Wetlands                                             |                                                      |
| A15           | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                    |                                                      |
| A16           | Tanque séptico + infiltração                                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         | Tanque séptico + infiltração                         |
| A17           | Reator UASB                                                          | Reator UASB                                          |                                                      | Reator UASB                                          | Reator UASB                                          |                                                      |
| A18           | UASB + lodos ativados                                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                | UASB + lodos ativados                                |
| A19           | UASB + biofiltro aerado submerso                                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     | UASB + biofiltro aerado submerso                     |
| A20           | UASB + filtro anaeróbio                                              | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      | UASB + filtro anaeróbio                              | UASB + filtro anaeróbio                              |                                                      |
| A21           | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga     |                                                      |

Quadro B 6 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Irupi, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 2 - Irupi |                                                                      |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|---------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa   | Condição de lançamento 3: eficiência mínima de remoção de DBO de 60% |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|               | Cenário 1                                                            |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|               | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A22           | UASB + flotação por ar dissolvido                                    | UASB + flotação por ar dissolvido                        |                                                          | UASB + flotação por ar dissolvido                        | UASB + flotação por ar dissolvido                        |                                                          |
| A23           | UASB + lagoas de polimento                                           | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |
| A24           | UASB + lagoa aerada facultativa                                      | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |                                                          |
| A25           | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                      | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |                                                          |
| A26           | UASB + escoamento superficial                                        | UASB + escoamento superficial                            |                                                          | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |                                                          |
| A27           | Lodos ativados convencional                                          | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28           | Lodos ativados - aeração prolongada                                  | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                       | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N               | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32           | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                  | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33           | Filtro biológico percolador de baixa carga                           | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34           | Filtro biológico percolador de alta carga                            | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |                                                          |
| A35           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36           | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                 | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37           | Biodisco                                                             | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL         | 32                                                                   | 32                                                       | 16                                                       | 32                                                       | 32                                                       | 16                                                       |



Quadro B 7 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Iúna, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 3 - Iúna |                                                                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|--------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa  | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|              | Cenário 1                                                                                                |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|              | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A23          | UASB + lagoas de polimento                                                                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |
| A24          | UASB + lagoa aerada facultativa                                                                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |
| A25          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                                          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |
| A26          | UASB + escoamento superficial                                                                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |
| A27          | Lodos ativados convencional                                                                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28          | Lodos ativados - aeração prolongada                                                                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                                           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                                                   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                                                 | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32          | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                                      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33          | Filtro biológico percolador de baixa carga                                                               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34          | Filtro biológico percolador de alta carga                                                                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |
| A35          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                                               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                                                     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37          | Biodisco                                                                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL        | 34                                                                                                       | 34                                                       | 34                                                       | 34                                                       | 34                                                       | 34                                                       |



Quadro B 8 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Lúna, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 3 - Lúna |                                                                                    |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|--------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa  | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|              | Cenário 1                                                                          |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|              | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A24          | UASB + lagoa aerada facultativa                                                    | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |
| A25          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                                    | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |
| A26          | UASB + escoamento superficial                                                      | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |
| A27          | Lodos ativados convencional                                                        | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28          | Lodos ativados - aeração prolongada                                                | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                                     | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N                             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P                           | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32          | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                                | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33          | Filtro biológico percolador de baixa carga                                         | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34          | Filtro biológico percolador de alta carga                                          | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |
| A35          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                                         | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                               | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37          | Biodisco                                                                           | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL        | 30                                                                                 | 30                                                       | 30                                                       | 30                                                       | 30                                                       | 30                                                       |

Quadro B 9 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Lúna, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

[illegible]

Quadro B 9 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para a sede municipal de Lúna, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 3 - Lúna |                                                                      |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|--------------|----------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|
| Alternativa  | Condição de lançamento 3: eficiência de remoção mínima de DBO de 60% |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |                                                          |
|              | Cenário 1                                                            |                                                          |                                                          | Cenário 2                                                |                                                          |                                                          |
|              | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               | pH≤7,5                                                   | 7,5<pH≤8,0                                               | 8,0<pH≤8,5                                               |
| A23          | UASB + lagoas de polimento                                           | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               | UASB + lagoas de polimento                               |
| A24          | UASB + lagoa aerada facultativa                                      | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          | UASB + lagoa aerada facultativa                          |
| A25          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.                      | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          | UASB + lagoa aerada mist. Comp. + lagoa decant.          |
| A26          | UASB + escoamento superficial                                        | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            | UASB + escoamento superficial                            |
| A27          | Lodos ativados convencional                                          | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              | Lodos ativados convencional                              |
| A28          | Lodos ativados - aeração prolongada                                  | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      | Lodos ativados - aeração prolongada                      |
| A29          | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)                       | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           | Lodos ativados - batelada (aeração prolongada)           |
| A30          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N               | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N   |
| A31          | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P             | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P | Lodos ativados convencional com remoção biológica de N/P |
| A32          | Lodos ativados convencional + infiltração terciária                  | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      | Lodos ativados convencional + infiltração terciária      |
| A33          | Filtro biológico percolador de baixa carga                           | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               | Filtro biológico percolador de baixa carga               |
| A34          | Filtro biológico percolador de alta carga                            | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                | Filtro biológico percolador de alta carga                |
| A35          | Biofiltro aerado submerso com nitrificação                           | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               | Biofiltro aerado submerso com nitrificação               |
| A36          | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N                 | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     | Biofiltro aerado submerso com remoção biológica de N     |
| A37          | Biodisco                                                             | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 | Biodisco                                                 |
| TOTAL        | 32                                                                   | 32                                                       | 32                                                       | 32                                                       | 32                                                       | 32                                                       |

Quadro B 10 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 4 e 5 - Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Alternativa                                                | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
|                                                            | Cenário 1                                                                                                |                                                     |                                                     | Cenário 2                                           |                                                     |                                                     |
|                                                            | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                          | 8,0<pH≤8,5                                          | pH≤7,5                                              | 7,5<pH≤8,0                                          | 8,0<pH≤8,5                                          |
| A01                                                        | Tratamento primário (tanques sépticos)                                                                   | Tratamento primário (tanques sépticos)              | Tratamento primário (tanques sépticos)              | Tratamento primário (tanques sépticos)              | Tratamento primário (tanques sépticos)              | Tratamento primário (tanques sépticos)              |
| A02                                                        | Tratamento primário convencional                                                                         | Tratamento primário convencional                    | Tratamento primário convencional                    | Tratamento primário convencional                    | Tratamento primário convencional                    | Tratamento primário convencional                    |
| A03                                                        | Tratamento primário avançado                                                                             | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        |
| A04                                                        | Lagoa facultativa                                                                                        | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   |
| A05                                                        | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                                                      | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 |
| A06                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A07                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A08                                                        | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                                                      | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação |
| A09                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A10                                                        | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                                                       | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  |
| A11                                                        | Infiltração lenta                                                                                        | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   |
| A12                                                        | Infiltração rápida                                                                                       | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  |
| A13                                                        | Escoamento superficial                                                                                   | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              |
| A14                                                        | <i>Wetlands</i>                                                                                          | <i>Wetlands</i>                                     | <i>Wetlands</i>                                     | <i>Wetlands</i>                                     | <i>Wetlands</i>                                     | <i>Wetlands</i>                                     |
| A15                                                        | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                                                        | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   |
| A16                                                        | Tanque séptico + infiltração                                                                             | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        |
| A17                                                        | Reator UASB                                                                                              | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         |
| A18                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A19                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A20                                                        | UASB + filtro anaeróbio                                                                                  | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             |
| A21                                                        | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                                                         | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    |
| A22                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A23                                                        | UASB + lagoas de polimento                                                                               | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          |
| A24                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A25                                                        |                                                                                                          |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |

Quadro B 10 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a capacidade de autodepuração, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 4 e 5 - Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Alternativa                                                | Condição de lançamento 1: emprego da capacidade de autodepuração dos rios para assimilação dos efluentes |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|                                                            | Cenário 1                                                                                                |                                            |                                            | Cenário 2                                  |                                            |                                            |
|                                                            | pH≤7,5                                                                                                   | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 | pH≤7,5                                     | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 |
| A26                                                        | UASB + escoamento superficial                                                                            | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              |
| A27                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A28                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A29                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A30                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A31                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A32                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A33                                                        | Filtro biológico percolador de baixa carga                                                               | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga |
| A34                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                                                                | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  |
| A35                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A36                                                        |                                                                                                          |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A37                                                        | Biodisco                                                                                                 | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   |
| TOTAL                                                      | 21                                                                                                       | 21                                         | 21                                         | 21                                         | 21                                         | 21                                         |



Quadro B 11 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a DBO máxima no efluente de 120 mg/L, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 4 e 5 - Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Alternativa                                                | Condição de lançamento 2: concentração máxima de DBO no esgoto tratado de 120 mg/L |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|                                                            | Cenário 1                                                                          |                                            |                                            | Cenário 2                                  |                                            |                                            |
|                                                            | pH≤7,5                                                                             | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 | pH≤7,5                                     | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 |
| A27                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A28                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A29                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A30                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A31                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A32                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A33                                                        | Filtro biológico percolador de baixa carga                                         | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga |
| A34                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                                          | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  |
| A35                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A36                                                        |                                                                                    |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A37                                                        | Biodisco                                                                           | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   |
| TOTAL                                                      | 17                                                                                 | 17                                         | 17                                         | 17                                         | 17                                         | 17                                         |

Quadro B 12 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Continua)

| ETE 4 e 5 - Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| Alternativa                                                | Condição de lançamento 3: eficiência de remoção mínima de DBO de 60% |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
|                                                            | Cenário 1                                                            |                                                     |                                                     | Cenário 2                                           |                                                     |                                                     |
|                                                            | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                          | 8,0<pH≤8,5                                          | pH≤7,5                                              | 7,5<pH≤8,0                                          | 8,0<pH≤8,5                                          |
| A01                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A02                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A03                                                        | Tratamento primário avançado                                         | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        | Tratamento primário avançado                        |
| A04                                                        | Lagoa facultativa                                                    | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   | Lagoa facultativa                                   |
| A05                                                        | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                                  | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 | Lagoa anaeróbia - lagoa facultativa                 |
| A06                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A07                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A08                                                        | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação                  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. +lagoa de maturação |
| A09                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A10                                                        | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas                   | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  | Lagoa anaeróbia + lagoa facult. + remoção de algas  |
| A11                                                        | Infiltração lenta                                                    | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   | Infiltração lenta                                   |
| A12                                                        | Infiltração rápida                                                   | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  | Infiltração rápida                                  |
| A13                                                        | Escoamento superficial                                               | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              | Escoamento superficial                              |
| A14                                                        | Wetlands                                                             | Wetlands                                            | Wetlands                                            | Wetlands                                            | Wetlands                                            | Wetlands                                            |
| A15                                                        | Tanque séptico + filtro anaeróbio                                    | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   | Tanque séptico + filtro anaeróbio                   |
| A16                                                        | Tanque séptico + infiltração                                         | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        | Tanque séptico + infiltração                        |
| A17                                                        | Reator UASB                                                          | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         | Reator UASB                                         |
| A18                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A19                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A20                                                        | UASB + filtro anaeróbio                                              | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             | UASB + filtro anaeróbio                             |
| A21                                                        | UASB + filtro biológico percolador de alta carga                     | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    | UASB + filtro biológico percolador de alta carga    |
| A22                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |
| A23                                                        | UASB + lagoas de polimento                                           | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          | UASB + lagoas de polimento                          |
| A24                                                        |                                                                      |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |                                                     |

Quadro B 12 – Alternativas de tratamento pré-selecionadas para as localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças, considerando a eficiência de remoção de DBO de 60%, para padrões de qualidade ambiental de rios classe 3. (Conclusão)

| ETE 4 e 5 - Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Alternativa                                                | Condição de lançamento 3: eficiência de remoção mínima de DBO de 60% |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
|                                                            | Cenário 1                                                            |                                            |                                            | Cenário 2                                  |                                            |                                            |
|                                                            | pH≤7,5                                                               | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 | pH≤7,5                                     | 7,5<pH≤8,0                                 | 8,0<pH≤8,5                                 |
| A25                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A26                                                        | UASB + escoamento superficial                                        | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              | UASB + escoamento superficial              |
| A27                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A28                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A29                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A30                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A31                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A32                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A33                                                        | Filtro biológico percolador de baixa carga                           | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga | Filtro biológico percolador de baixa carga |
| A34                                                        | Filtro biológico percolador de alta carga                            | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  | Filtro biológico percolador de alta carga  |
| A35                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A36                                                        |                                                                      |                                            |                                            |                                            |                                            |                                            |
| A37                                                        | Biodisco                                                             | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   | Biodisco                                   |
| TOTAL                                                      | 19                                                                   | 19                                         | 19                                         | 19                                         | 19                                         | 19                                         |