

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, RECURSOS HÍDRICOS E DO
MEIO AMBIENTE - TER

**ESTUDO DE AUTODEPURAÇÃO NA BACIA DO RIO GRANDE:
APLICAÇÃO DO MODELO STREETER-PHELPS AO LANÇAMENTO DE
EFLUENTES NO CÓRREGO DO BARRAÇÃO DOS MENDES – NOVA
FRIBURGO/RJ**

LUIZ EDUARDO CAVALLO PFEIL

Matrícula: 10856026



NITERÓI – RJ

2014

LUIZ EDUARDO CAVALLO PFEIL

**ESTUDO DE AUTODEPURAÇÃO NA BACIA DO RIO GRANDE:
APLICAÇÃO DO MODELO STREETER-PHELPS AO LANÇAMENTO DE
EFLUENTES NO CÓRREGO DO BARRAÇÃO DOS MENDES – NOVA
FRIBURGO/RJ**

**Trabalho de conclusão de curso,
apresentado ao curso de Engenharia de
Recursos Hídricos e do Meio Ambiente
da Universidade Federal Fluminense
como requisito parcial para obtenção do
grau de Engenheiro Ambiental.**

Orientador: Prof. Dario de Andrade Prata Filho.

NITERÓI-RJ

2014

LUIZ EDUARDO CAVALLO PFEIL

**ESTUDO DE AUTODEPURAÇÃO NA BACIA DO RIO GRANDE:
APLICAÇÃO DO MODELO STREETER-PHELPS AO LANÇAMENTO DE
EFLUENTES NO CÓRREGO DO BARRAÇÃO DOS MENDES – NOVA
FRIBURGO/RJ**

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao curso de Engenharia de
Recursos Hídricos e do Meio Ambiente
da Universidade Federal Fluminense
como requisito parcial para obtenção do
grau de Engenheiro Ambiental.**

Aprovado em dezembro de 2014

BANCA EXAMINADORA

**Prof. M. Sc. Dario de Andrade Prata Filho, orientador.
Universidade Federal Fluminense**

**Prof. D. Sc. Mônica de Aquino Galeano Massera da Hora.
Universidade Federal Fluminense**

**Prof. D. Sc. Márcio Cataldi.
Universidade Federal Fluminense**

Niterói - RJ

2014

A minha avó, Yonne R M Pfeil, agradeço pelo carinho que me dedicou todos esses anos e pelos conhecimentos passados a mim, ainda no início da minha jornada, quando nas primeiras séries do ensino fundamental estudava comigo para minhas provas. Aqueles conhecimentos alicerçaram o acadêmico que eu me torno agora, com a conclusão desse curso de engenharia ambiental.

A minha família, tios e tias, primos e primas, agregados e agregadas, e todos os outros parentescos, muito obrigado. A família sempre foi a “viga mestra” da minha vida, o suporte dado a mim por vocês é fundamental para que eu consiga seguir adiante. Sei que, durante a jornada da minha graduação, estive ausente da vida de vocês em diversos momentos em que normalmente eu estaria presente, compartilhando de suas alegrias. Agradeço muito a vocês pela compreensão.

A minha irmã, Flávia Maria C. Pfeil, e ao novo irmão que ela escolheu para me dar, seu marido, Lucas Roratto, agradeço por muitas coisas: pelas conversas e debates sobre o mundo; pelas belas paisagens que curtimos juntos e ainda curtiremos; pelos churrascos e pelas cervejas que deixavam tudo mais divertido; pelas rodas de violão e etc.. À minha irmã caberiam agradecimentos de uma vida inteira, mas prefiro agradecer a vocês juntos, principalmente agora, que o filho de vocês chegou, Martín, de quem eu sou o orgulhoso padrinho. Muito obrigado, meus irmãos.

A todos do Rio Rural, em especial ao coordenador do meu estágio, Marcelo Costa, e ao coordenador do projeto de saneamento que originou este trabalho, Jarbas Saraiva, agradeço de coração. Meu estágio ao lado de vocês no Rio Rural foi muito importante em termos profissionais e muito agradável em termos pessoais. Trabalhar com todos vocês foi uma grande oportunidade que a vida me deu.

Agradeço a meu orientador, Dario de A. Prata Filho, pelos conhecimentos passados a mim, pela liberdade com que me permitiu trabalhar neste projeto e pela solicitude com que me atendeu sempre que eu precisei.

Agradeço aos integrantes do projeto INTECRAL pela oportunidade de trabalhar em um projeto em que pessoas do mundo inteiro debatem e trocam conhecimentos em prol de soluções sustentáveis. Em especial, agradeço ao coordenador do projeto de saneamento, Jaime A. Cardona, que acompanhou de perto este trabalho. Agradeço também a oportunidade de conhecer todas as pessoas excelentes com quem tive o prazer neste projeto.

Ao meu amor, Monica D. Sherer, um agradecimento pela paciência de aguentar por tempos tão longos a distância imposta pelo meu objetivo de me formar. Também por me inspirar e incentivar. Mesmo longe você assistiu de perto cada passo dessa jornada e caminhou ao meu lado, como será daqui para frente. Enfim, agradeço por seu amor e retribuo com o meu. Não sei onde estaria agora se não tivesse te encontrado no meu caminho. Muito obrigado.

Ao meu falecido pai, Carlos Eduardo de M. Pfeil, não há palavras suficientes para agradecer a você. Muitas das coisas que eu sei e muito do que sou eu devo a você, o amor pela natureza que me fez escolher essa profissão com certeza foi instigado por você. Você foi um dos maiores professores que eu possuí e com certeza o mais rigoroso. “Nós temos que usar nossa inteligência para tudo, mesmo nas pequenas coisas”, você sempre me dizia isso para que eu me concentrasse e entendesse as coisas ao meu redor, para que eu soubesse como encontrar soluções para os meus problemas. De tanto aprender a solucionar problemas, decidi me tornar engenheiro. Muito obrigado, meu pai.

Ao meu irmão, André Jorge C. Pfeil, eu agradeço pela força, pelas vezes em que tocamos violão pra amenizar o stress, pela amizade, pelas conversas sobre a vida, sobre os planos de cada um, até mesmo pelas músicas (de gosto duvidoso) bradadas pela manhã, enfim, por ser presente, ainda que nesse momento não possa estar aqui, compartilhando a alegria da minha formatura. Seria necessário mais do que algumas linhas para agradecer por uma vida inteira. Muito obrigado por ser meu irmão.

Aos meus amigos, colegas de UFF, muito obrigado por todo o auxílio, pelas noites sem dormir para entregar trabalhos a tempo, pelos cadernos completos para tirar cópia, pelos grupos de estudos às pressas antes de entrar na sala para fazer as provas, pelas aulas sábado que tínhamos que encarar juntos. Agradeço a todos.

Muito obrigado a minha mãe, Eliane G. Cavallo, por basicamente tudo. Por ter me dado amor, carinho, afeto. Por ter me dado condições de permanecer estudando e pelo incentivo até que eu chegasse à conclusão deste curso. Por ser um exemplo como pessoa e como profissional. Por ser uma mãe por completo. Muito obrigado.

Um agradecimento especial a todos os mestres e professores que passaram por minha vida, desde o jardim de infância até agora, aqueles de quem eu me lembro bem e também aqueles de quem eu já não me lembro mais. Cada um de vocês deixou comigo um pedacinho de saber, e com esses pequenos pedaços fui edificando o conhecimento que possuo hoje e pelo qual recebo agora o título engenheiro ambiental.

Resumo

Barracão dos Mendes é uma comunidade de Nova Friburgo/RJ que não dispõe de uma forma adequada de disposição de esgotos domésticos. O programa Rio Rural juntamente com o projeto INTECRAL estão desenvolvendo um projeto de saneamento na região, que inclui uma estação de tratamento de esgotos (ETE). Devido ao exposto, faz-se necessário um estudo de autodepuração do córrego do Barracão dos Mendes, que corta a comunidade, e do Rio Grande, que recebe as águas do referido córrego.

Para que se estime se o curso d'água possui capacidade de receber os efluentes sem violar os níveis mínimos de oxigênio dissolvido (OD) da classe 1 de águas doces (CONAMA 357/2005), foram determinados os parâmetros de entrada do modelo Streeter-Phelps de acordo com as características dos cursos d'água envolvidos. Devido à importância de se conhecer as vazões de referência, este trabalho realizou um estudo de regionalização das vazões características da bacia do Rio Grande. Além dos dados de vazão usados na regionalização também foram coletados dados de estações de medição da Agência Nacional de Águas (ANA) relativos à temperatura da água e OD. As declividades, áreas, comprimento das calhas dos rios, delimitação de bacias e demais dados geográficos foram determinados por geoprocessamento.

O estudo mostrou que o córrego terá condições de receber os efluentes do tratamento sem que os níveis de OD sejam violados, em parte devido a curta distância até seu desague no rio Grande, o que não havendo tempo de percurso o suficiente no córrego para que o OD chegue a ficar abaixo da referência. Com relação ao Rio Grande, apenas as piores parametrizações foram capazes de violar a referência de OD, mostrando uma boa capacidade de depuração da carga orgânica. Para que seja assegurada a qualidade das águas, os piores cenários geraram a necessidade de tratamento mínimo secundário, que deve ser adotado por segurança.

Entretanto o modelo se mostrou muito sensível ao coeficiente K_2 do Rio Grande, que também foi o parâmetro encontrado com maior faixa de valores, o que demanda um estudo mais aprofundado acerca do K_2 para que o modelo se ajuste ainda mais às características locais.

PALAVRAS-CHAVE: Autodepuração; modelo Streeter-Phelps; Oxigênio Dissolvido (OD).

Abstract

Barracão dos Mendes is a community in Nova Friburgo/RJ that does not have an adequate domestic sewage disposal. The Rio Rural program together with the INTECRAL project is developing a sanitation project in the region, which includes a sewage treatment station. Due to exposure, it is necessary a study of self-depuration of the Barracão dos Mendes' stream, that runs along the community, and of the Rio Grande, that receives the waters of the aforementioned stream.

To estimate if the course of the water has the capacity to receive the effluents without violating the minimum levels of sweet waters class 1 dissolved oxygen (DO), the entry parameters of the Streeter-Phelps model were determined according with the characteristics of the waterways involved. Due to the importance of knowing the reference flows, this paper did a study of the regionalization of flows of the Rio Grande basin. Besides the data of flows used in the regionalization, there were also data collected from the measurement stations of the Agência Nacional de Águas (ANA) related to the temperature of the water and the DO. The declivities, areas, size of the river channels, delimitation of the basins and other geographical data were determined by geoprocessing.

The study showed that the stream will be able to take the treatment effluents without violating the DO levels, in part because of the short distance until its drainage in the Rio Grande, which leaves not enough flow time in the stream for the DO to get below the reference. Regarding the Rio Grande, only the worst parametrizations were capable of violating the DO reference, showing a good depuration capacity of the organic load. To secure the quality of the waters, the worst scenarios generated the need of minimum secondary treatment, which should be adopted for safety.

Nevertheless, the model was very sensitive to the K_2 coefficient of the Rio Grande, That was also the parameter found with greater value strips, which demands a deeper study around the K_2 so that the model can adjust itself even more to the local characteristics.

KEYWORDS: self-depuration; Streeter-Phelps model; dissolved oxygen (DO).

Lista de Figuras

Figura 1: Limites geográficos de Nova Friburgo e dos municípios da Região Serrana no estado do Rio de Janeiro.....	17
Figura 2: Importantes Unidades de Conservação em Nova Friburgo.....	18
Figura 3: Delimitação geográfica dos distritos de Nova Friburgo.	19
Figura 4: MBH de Barracão dos Mendes.....	20
Figura 5: Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios.	20
Figura 6: Vazões médias da estação fluviométrica Fazenda Mendes (ANA).	25
Figura 7: Delimitação das bacias hidrográficas.....	40
Figura 8: Medição da ponte e do córrego em fotografia.	41
Figura 9: Medida da ponte no Google Earth.	42
Figura 10: Medidas da largura do Rio Grande imediatamente a jusante do encontro com o Córrego do Barracão dos Mendes.....	42
Figura 11: Cenário 1.a.....	47
Figura 12: Cenário 1.b.....	48
Figura 13: Cenário 1.c.....	48
Figura 14: Cenário 1.d.....	48
Figura 15: Cenário 2.a.....	50
Figura 16: Cenário 2.b.....	50
Figura 17: Cenário 2.c.....	50
Figura 18: Cenário 2.d.....	51

Lista de Tabelas

Tabela 1: Dados populacionais.....	24
Tabela 2: Valores de OD e temperatura da série histórica da estação São Loureço (ANA)	25
Tabela 3: Valores de DBO presente no rio de acordo com as características do curso d'água.	26
Tabela 4: Valores de K2 sugeridos por Fair <i>et al</i> (1973) e Arceivala (1981). (extraído de Von Sperling, 2007).....	29
Tabela 5: Valores mínimos de OD (extraído da CONAMA 357/2005).	38
Tabela 6: Vazões de Referência.	41
Tabela 7: Cálculo da largura dos cursos d'água.....	43
Tabela 8: Cálculo das declividades.....	43
Tabela 9: Profundidades calculadas (fórmula de Chézy com $n=0,050$).	44
Tabela 10: Velocidades médias calculadas a partir da equação de continuidade.....	44
Tabela 11: Vazões médias de esgoto e DBO do esgoto (mg/L).....	44
Tabela 12: Coeficientes encontrados para o córrego segundo autores citados por Von Sperling (2007).	45
Tabela 13: Coeficientes encontrados para o rio segundo autores citados por Von Sperling (2007).....	45
Tabela 14: Valores da concentração de saturação e respectivas temperaturas.....	46
Tabela 15: Parametrizações do Cenário 1.	47
Tabela 16: Dados resultantes da aplicação do modelo para o Cenário 1.	49
Tabela 17: Parametrização criada para o Cenário 2.....	49
Tabela 18: Dados resultantes da aplicação do modelo para o Cenário 2.	51
Tabela 19: Parâmetros para a análise de sensibilidade.	51
Tabela 20: Dados da análise de sensibilidade.	52
Tabela 21: Classificação da sensibilidade do modelo às variáveis.....	53

Lista de Siglas

APA – Área de Proteção Ambiental.

BIRD – Banco Mundial.

COGEM – Comitê Gestor de Microbacias Hidrográficas.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente.

ETE – Estação de Tratamento de Esgotos.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde.

MBH – Microbacia Hidrográfica.

MDE – Modelo Digital de Elevação.

PE – Parque Estadual.

SDS – Superintendência de Desenvolvimento Sustentável.

SEAPEC – Secretaria do Estado de Agricultura e Pecuária.

UC – Unidades de Conservação.

Sumário

Resumo	6
Abstract	7
Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas	9
Lista de Siglas.....	10
1. Introdução	13
1.1. Objetivos	15
1.1.1. Objetivo Principal.....	15
1.1.2. Objetivos Específicos	15
2. Conceitos e Definições.....	16
3. Materiais e Métodos.....	17
3.1. Descrição da Área de Estudo	17
3.2. Equações do Modelo Streeter-Phelps	21
3.3. Vazão Média de Esgoto (Q_e)	24
3.4. Oxigênio Dissolvido no Rio a Montante do Lançamento (OD_r) e Temperatura da água (T).....	24
3.5. Oxigênio Dissolvido no Esgoto (OD_e)	26
3.6. DBO no Rio a Montante do Lançamento (DBO_r).....	26
3.7. DBO no Esgoto bruto (DBO_{eb}) DBO no Esgoto Tratado (DBO_{et}).....	27
3.8. Coeficientes	28
3.8.1. Coeficiente de Desoxigenação (K_1) e de Decomposição (K_d).....	28
3.8.2. Coeficiente de Reaeração (K_2)	29
3.8.3. A Influência da Temperatura	30
3.9. Características Hidráulicas dos Cursos D'Água	30
3.9.1. Vazões de Referência.	31
3.9.2. Largura	32
3.9.3. Declividade	33
3.9.4. Profundidade.....	33
3.9.5. Velocidade	35
3.10. Obtenção das Áreas de Drenagem	35
3.11. Tempo de Percurso.....	37
3.12. Concentração de Saturação de OD (C_s)	37
3.13. Oxigênio Dissolvido Mínimo	38

3.14.	Criação dos Cenários	38
3.15.	Análise de Sensibilidade	39
4.	Resultados	40
4.1.	Obtenção das Áreas de Drenagem	40
4.2.	Características Hidráulicas do Curso D'Água	41
4.2.1.	Vazão de Referência	41
4.2.2.	Largura	41
4.2.3.	Declividade	43
4.2.4.	Profundidade.....	43
4.2.5.	Velocidade	44
4.3.	Vazão Média de Esgoto (Q_e) e DBO no Esgoto (DBO_e)	44
4.4.	Coefficientes	45
4.5.	Tempo de Percurso no Córrego.....	45
4.6.	Concentração de Saturação de OD (C_s).....	46
4.7.	Cenários	46
4.7.1.	Cenário 1	46
4.7.2.	Cenário 2	49
4.8.	Análise de Sensibilidade dos Parâmetros	51
5.	Considerações Finais.....	54
	Referências Bibliográficas	56

1. Introdução

A qualidade da água para consumo humano é de suma importância para toda a população, pois esta pode servir de veículo para doenças infectocontagiosas. Além do contágio pelo consumo direto, doenças também podem ser veiculadas indiretamente pela água a partir de alimentos consumidos crus e irrigados com água de má qualidade. Este motivo expõe a necessidade de uma maior atenção ao saneamento do meio rural, onde esses alimentos são produzidos.

Neste contexto, o Estado do Rio de Janeiro vem desenvolvendo o Programa de Desenvolvimento Rural Sustentável em Microbacias Hidrográficas (Rio Rural) através da Superintendência de Desenvolvimento Sustentável (SDS), vinculado à Secretaria do Estado de Agricultura e Pecuária (SEAPEC) que atualmente recebe o apoio do Banco Mundial (BIRD). O Rio Rural fornece incentivos aos trabalhadores de comunidades rurais para que adotem práticas consoantes com a sustentabilidade e a ecologia locais, entre essas práticas está a melhoria das condições sanitárias para populações rurais.

A unidade territorial utilizada para organizar espacialmente as comunidades assistidas pelo Rio Rural é a Microbacia Hidrográfica (MBH)

O conceito de MBH está caracterizado por três requisitos:

- Delimitação geográfica de pequenas bacias de drenagem por divisores topográficos;
- Divisão política do estado (limites municipais);
- Integração entre as comunidades, sendo este mais abstrato.

Desta forma, em um município qualquer atendido pelo Rio Rural, as comunidades rurais que possuem relações mais estreitas (sejam elas culturais, de produção, comércio ou outras relações quaisquer) se localizarão dentro de uma mesma MBH, delimitada preferencialmente por divisores topográficos desde que esses não ultrapassem os limites municipais.

Com relação ao desenvolvimento rural, outro ator entra em cena no Estado do Rio de Janeiro: o *Integrated Eco Technologies and Services for a Sustainable Rural Rio de Janeiro* (INTECRAL), uma parceria entre a Alemanha (empresas e universidades através do Ministério Alemão de Educação e Pesquisa) com o Governo do Estado do Rio de Janeiro.

Acadêmicos de todas as partes do mundo vêm desenvolver trabalhos em áreas rurais do Rio de Janeiro por intermédio do INTECRAL, legando ao estado estudos e projetos que podem ser de grande valia para a tomada de decisão e a melhoria da vida das populações rurais. O INTECRAL vem atuando em parceria com o programa Rio Rural seguindo a priorização definida para as MBHs, desenvolvendo trabalhos com diversas temáticas.

Para o tema “Saneamento Rural”, destacam-se como principais parceiros na cooperação com a Alemanha as empresas *Bildungs- und Demonstrationszentrum für dezentrale Abwasserbehandlung* (BDZ) e *Tilia Umwelt GmbH* (Tilia). A BDZ trabalha com a produção de soluções descentralizadas para o tratamento ecologicamente correto de efluentes em assentamentos humanos rurais e/ou de baixa renda. A Tilia atua na área de energia e meio ambiente, com foco em água potável, fornecimento de energia e disposição de esgotos. Ambas possuem trabalhos em diversas partes do mundo, podendo ser citados como grandes êxitos os projetos realizados na Jordânia e na Mongólia.

A parceria Rio Rural-INTECRAL está atualmente trabalhando para sanear a comunidade central de Barracão dos Mendes, localizada na zona rural de Nova Friburgo/RJ e que será mais bem caracterizada posteriormente neste trabalho.

Dentre diversas outras necessidades que um trabalho de saneamento demanda, está o estudo de autodepuração do corpo hídrico receptor, que modela o comportamento de determinados parâmetros de qualidade da água ao longo do rio. Usualmente, utiliza-se o Oxigênio Dissolvido (OD) como indicador da qualidade das águas, por causa disto, este é um parâmetro amplamente utilizado nos estudos de autodepuração.

Este trabalho se justifica uma vez que à solução de saneamento proposta para a comunidade de Barracão dos Mendes incluirá a instalação de uma estação de tratamento de esgotos (ETE) com posterior lançamento dos efluentes tratados no Córrego do Barracão dos Mendes. É imperativo que se determine se o referido córrego e posteriormente o Rio Grande, serão capazes de diluir o efluente da ETE sem que sejam violados os valores mínimos de OD estipulados pelas normas vigentes.

O presente trabalho se configura como um dos resultados decorrentes da soma de esforços entre Rio Rural e INTECRAL, integrando o conjunto de produções científicas sobre as quais se apoiará o primeiro projeto de saneamento rural da parceria.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Principal

Este trabalho pretende determinar os valores mínimos de eficiência em redução de carga orgânica que a ETE de Barracão dos Mendes deverá possuir para que seus efluentes estejam aptos a serem lançados no Córrego do Barracão dos Mendes, o que será analisado por meio da aplicação do modelo Streeter-Phelps a cenários criados pela variação de alguns parâmetros dentro de intervalos estipulados.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Definir os valores para os parâmetros do modelo, seja pela utilização valores médios tabelados ou por fórmulas empíricas e conceituais.
- Determinar os conjuntos de parâmetros (cenários) considerados plausíveis, os quais serão abordados neste trabalho, e avaliar os resultados.

2. Conceitos e Definições

Define-se para este trabalho:

- “Série histórica” como o conjunto de dados coletados por uma estação de medição qualquer, ordenados por data e hora.
- “Tempo de Recorrência” como o tempo estimado para que um evento seja igualado ou superado.
- “ $Q_{7,10}$ ” como a vazão mínima média de sete dias consecutivos e com tempo de recorrência de 10 anos, em m^3/s (HORA, 2010).
- “ $Q_{95\%}$ ” como a vazão cujo valor é igualado ou superado em 95% do tempo, se analisada a série histórica da estação.
- “Vazão média de longo termo” (MLT) como a média das vazões médias anuais da série histórica.
- “DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio” como a demanda bioquímica de oxigênio, medida em laboratório, após 5 dias a 20 °C, também conhecida como DBO_5 ou $DBO_{5,20}$.
- “Ottobacias” como a área de drenagem que contribui diretamente para um trecho específico de rio, no qual não haja o encontro com águas de outro tributário. A ottobacia desconsidera a bacia de drenagem à montante do trecho. Em termos práticos, uma bacia hidrográfica será o agrupamento das ottobacias de todos os trechos dos rios desta bacia.
- “MDE – Modelo Digital de Elevação” como um arquivo raster (matricial) que divide o território em pixels. Cada pixel corresponde a uma área quadrada, georreferenciada, que é relacionada a um valor de altitude.
- “Shapefile” arquivo do software de geoprocessamento ArcGIS contendo formas geográficas georreferenciadas. Podem ser do tipo ponto, linha ou polígono. Este arquivo possui uma tabela intrínseca, a tabela de atributos, que contém os dados relacionados às formas geográficas, como nomes, áreas, comprimento, codificação, etc..

3. Materiais e Métodos

3.1. Descrição da Área de Estudo

O município de Nova Friburgo localiza-se na região serrana do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1). Possui área de 938,5 Km² (site da Prefeitura Municipal de Nova Friburgo, 2014) e população de 182.082 habitantes, sendo 159.372 vivendo em meio urbano e 22.710 em meio rural (Censo IBGE, 2010).

Possui clima tropical de altitude, com as quatro estações bem definidas. Seu relevo é montanhoso, com picos acima de 2.300 metros e cerca de 60% do município está acima dos 1.000 metros (site da Prefeitura Municipal de Nova Friburgo).

Assim como todo o estado do Rio de Janeiro, o município de Nova Friburgo está inteiramente contido no bioma Mata Atlântica e abriga em seu território parte de seus remanescentes, sendo alguns dos quais na forma de Unidades de Conservação (UC), como mostra a Figura 2. Estas características conferem ao município fama em relação ao ecoturismo, com cachoeiras, áreas verdes, escaladas, trilhas, *camping* e etc.

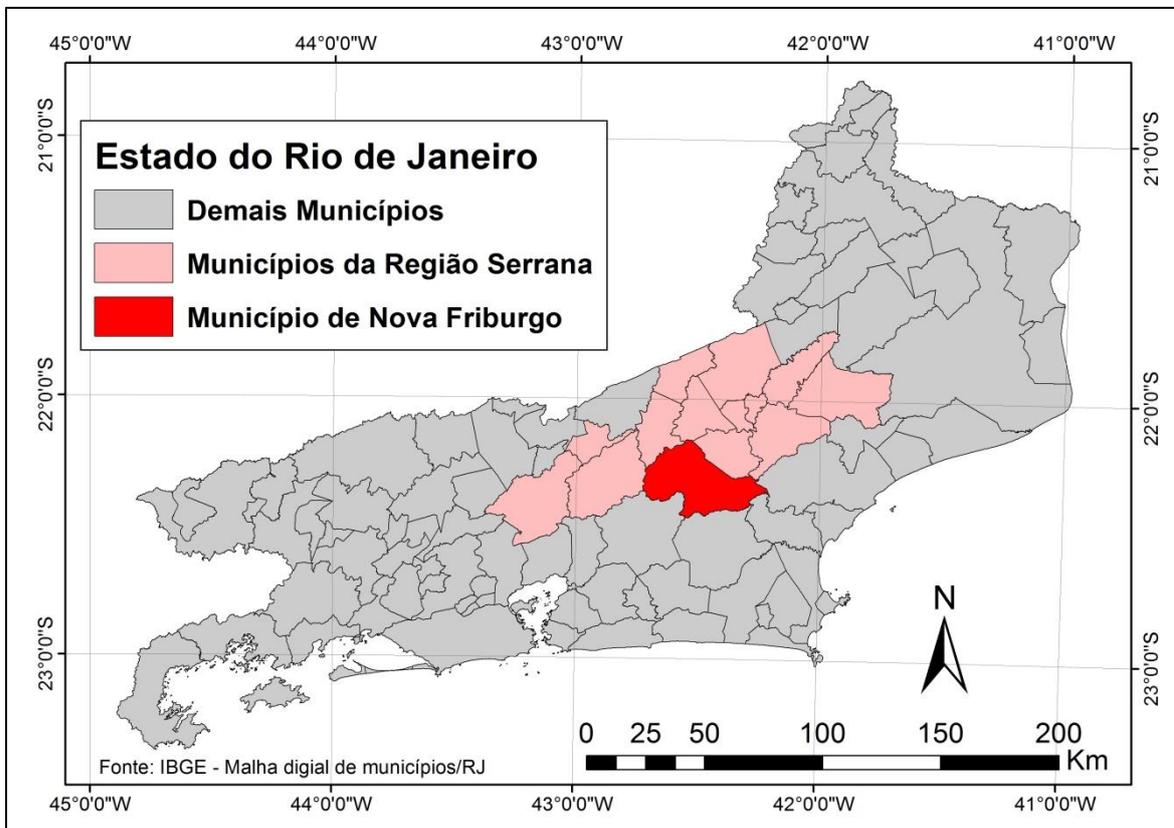


Figura 1: Limites geográficos de Nova Friburgo e dos municípios da Região Serrana no estado do Rio de Janeiro.

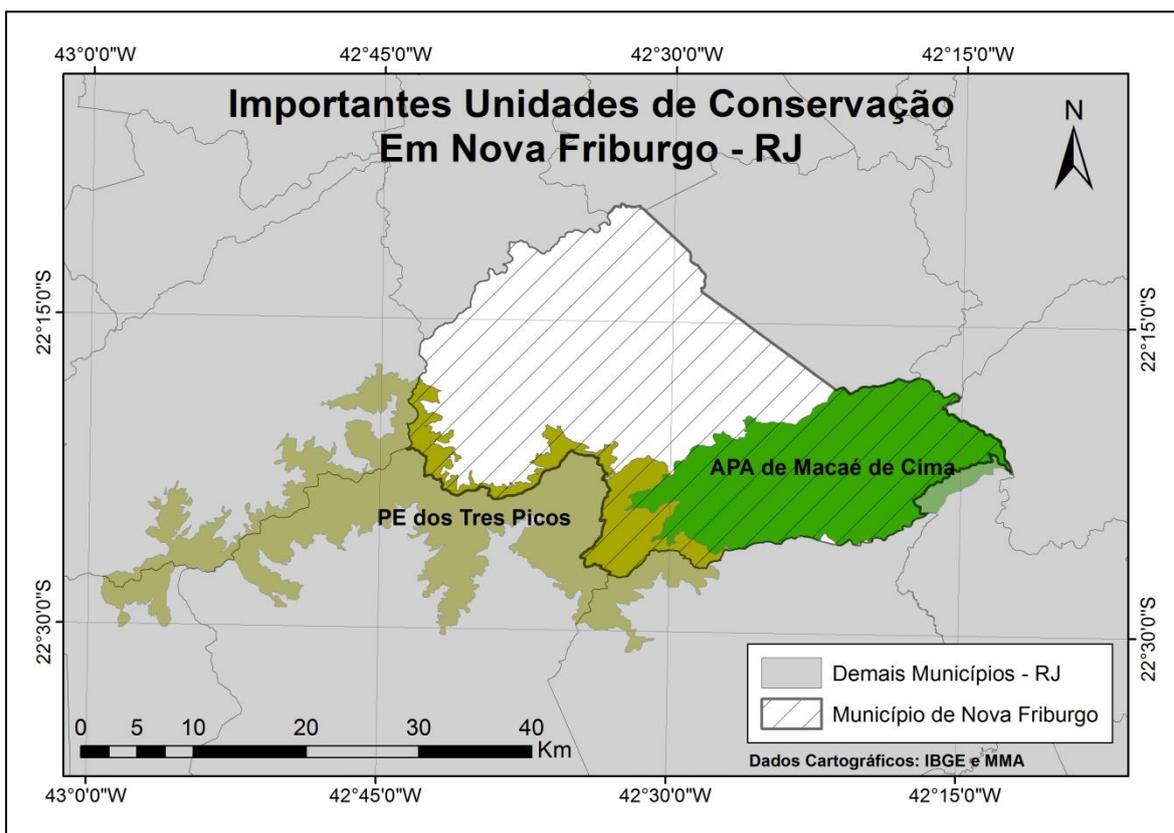


Figura 2: Importantes Unidades de Conservação em Nova Friburgo.

Nova Friburgo está politicamente dividida em oito distritos:

- 1° Distrito - Nova Friburgo
- 2° Distrito - Riograndina
- 3° Distrito - Campo do Coelho
- 4° Distrito - Amparo
- 5° Distrito - Lumiar
- 6° Distrito - Conselheiro Paulino
- 7° Distrito - São Pedro da Serra
- 8° Distrito - Muri

A Figura 3 mostra a delimitação geográfica dos distritos de Nova Friburgo.

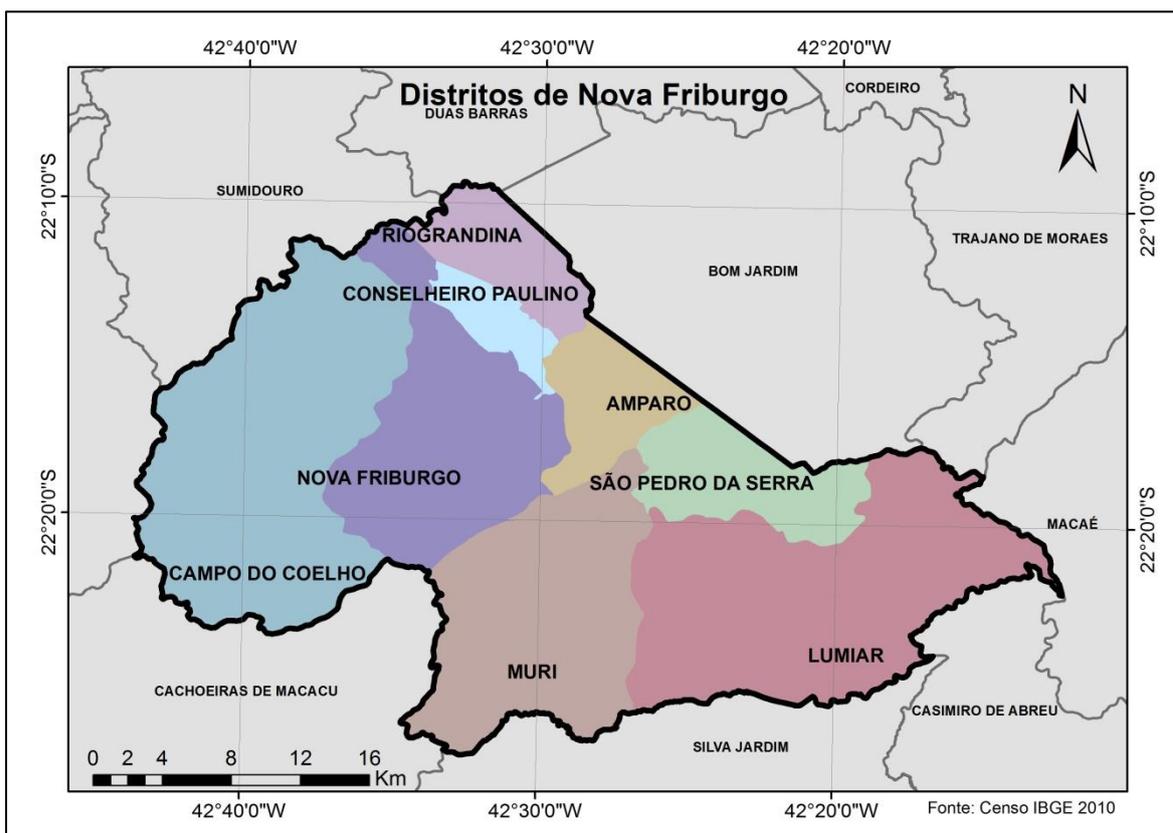


Figura 3: Delimitação geográfica dos distritos de Nova Friburgo.

A MBH de Barracão dos Mendes (Figura 4) se localiza no 3º Distrito, denominado Campo do Coelho. Esse distrito possui população de 10.067 habitantes, sendo 7.253 vivendo em meio rural (Censo IBGE, 2010).

Essa MBH abriga pequenos produtores familiares com foco produtivo na olericultura. A comunidade foco se localiza as margens do córrego do Barracão dos Mendes, um pequeno afluente do Rio Grande em suas cabeceiras. O Rio Grande por sua vez é um dos rios mais importantes da bacia hidrográfica do Rio Dois Rios, como mostra a Figura 5.

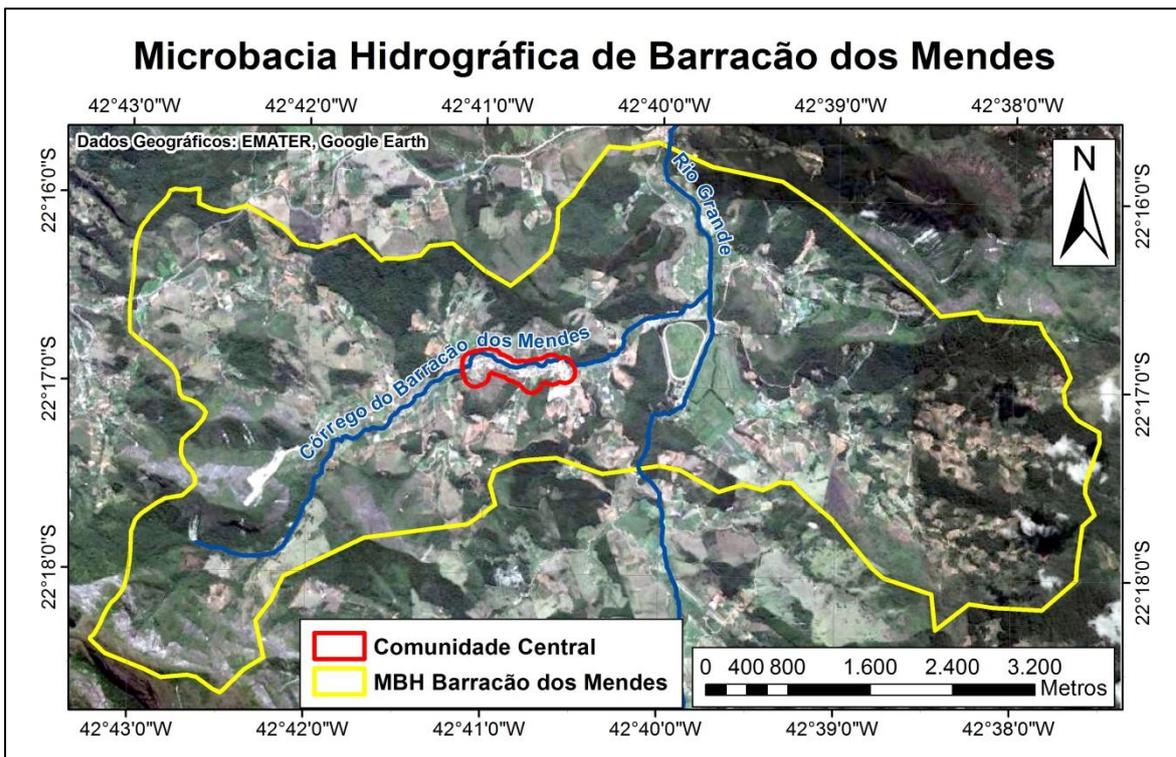


Figura 4: MBH de Barracão dos Mendes.

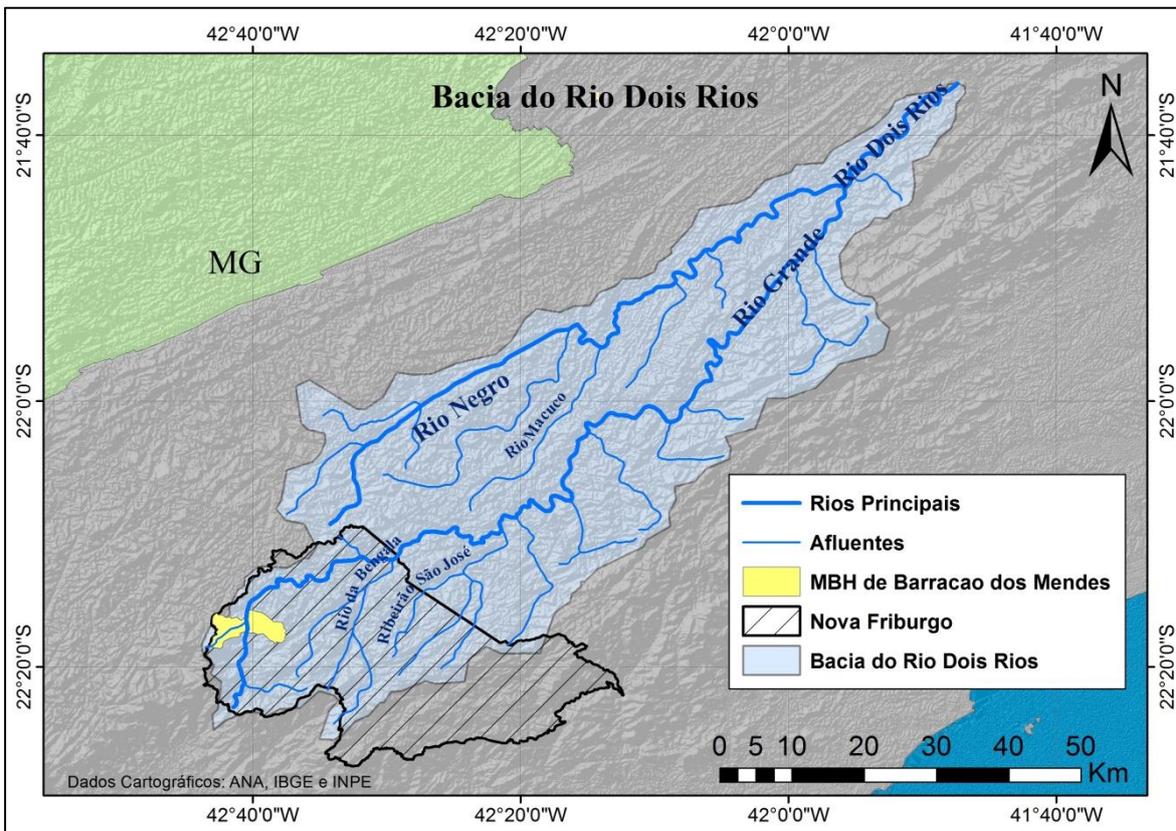


Figura 5: Bacia Hidrográfica do Rio Dois Rios.

A produção de hortícolas é irrigada a partir dos córregos e nascentes. Como esses vegetais podem ser consumidos crus, deve-se ter maior cautela em relação à qualidade da água utilizada para irrigação. O saneamento se torna imperativo quando pensamos na qualidade dos recursos hídricos, por outro lado, as comunidades rurais dificilmente possuem redes coletoras de esgoto devido à dispersão geográfica dos habitantes, o que não é diferente para a MBH de Barracão dos Mendes. Entretanto, a comunidade de Barracão dos Mendes começa a possuir um núcleo um pouco mais adensado em relação às demais áreas da MBH. Uma rede coletora de esgotos pode ser indicada nesse caso.

Nesse contexto, se torna contundente a necessidade de um estudo sobre o comportamento de parâmetros chave do rio após o lançamento dos efluentes.

3.2. Equações do Modelo Streeter-Phelps

Considerando DBO remanescente como mostrado na Equação 1 e a DBO última como mostrado na Equação 2. O déficit de OD em qualquer tempo como descrito na Equação 3 e o déficit inicial como na Equação 4. As expressões para mistura de DBO de OD como mostradas na Equação 5 e na Equação 6. O modelo Streeter-Phelps determina a concentração de oxigênio dissolvido (OD) em um curso d'água em qualquer tempo através da resolução da equação diferencial de primeira ordem mostrada na Equação 7. Tal equação nos mostra que a taxa de variação do déficit de oxigênio é igual à diferença entre o consumo e a produção de OD. Na Equação 8 pode ser vista a solução da equação diferencial evidenciando a concentração de OD a qualquer tempo, levando em consideração as variáveis mostradas nas outras equações. O tempo crítico, referente ao momento de menor concentração de OD pode ser encontrado pela Equação 9. A distância percorrida pela mistura água-esgoto na calha do rio dada pela Equação 10. (VON SPERLING, 2007)

$$L_t = L_0 \cdot e^{-K_1 t} \quad (\text{Equação 1})$$

$$L_0 = DBO_0 \cdot \left(\frac{1}{1 - e^{-5 \cdot K_1}} \right) \quad (\text{Equação 2})$$

$$D_t = C_s - C_t \quad (\text{Equação 3})$$

$$D_0 = C_s - C_0 \quad (\text{Equação 4})$$

$$DBO_0 = \frac{(Q_r \cdot DBO_r + Q_e \cdot DBO_e)}{Q_r + Q_e} \quad (\text{Equação 5})$$

$$C_0 = \frac{(Q_r \cdot OD_r + Q_e \cdot OD_e)}{Q_r + Q_e} \quad (\text{Equação 6})$$

$$\frac{dD_t}{dt} = K_d \cdot L_t - K_2 \cdot D_t \quad (\text{Equação 7})$$

$$C_t = C_s - \left\{ \frac{K_d \cdot L_0}{K_2 - K_d} \cdot (e^{-K_d t} - e^{-K_2 t}) + (C_s - C_0) \cdot e^{-K_2 t} \right\} \quad (\text{Equação 8})$$

$$t_c = \frac{1}{K_2 - K_d} \cdot \ln \left\{ \frac{K_2}{K_d} \left[1 - \frac{(C_s - C_0) \cdot (K_2 - K_d)}{L_0 \cdot K_d} \right] \right\} \quad (\text{Equação 9})$$

$$d = v \cdot t \cdot 86400 \quad (\text{Equação 10})$$

Onde:

C_t é a concentração (em mg/L) de OD em um tempo t qualquer (em dias).

C_s é a concentração de saturação de OD em mg/L.

C_0 é a concentração inicial de OD em mg/L.

K_1 é o coeficiente de desoxigenação em dia⁻¹.

K_d é o coeficiente de remoção de DBO efetiva do rio em dia⁻¹.

K_2 é o coeficiente de reaeração em dia⁻¹.

L_0 é a DBO última da mistura em mg/L.

L_t é a DBO (em mg/L) em um tempo t qualquer (em dias).

d é a distância percorrida na calha do rio em m.

v é a velocidade média do rio em m/s.

t_c é a tempo crítico em dias.

D_t é o déficit de oxigênio (em mg/L) em um tempo t qualquer (em dias).

D_0 é o déficit de OD inicial em mg/L.

A concentração crítica (C_c) é dada pela utilização do tempo crítico na Equação 8. Distância crítica (d_c) é a distância percorrida pela mistura água-esgoto na calha do rio durante o tempo crítico, ou seja, dada pela utilização do valor de tempo crítico na Equação 10. O déficit crítico é obtido pela utilização do valor da concentração crítica na Equação 3.

As equações de mistura também foram utilizadas para a mistura entre as águas do córrego e do rio, substituindo os dados do esgoto pelos dados de saída do modelo para o trecho do córrego do Barracão dos Mendes.

Para obter todos os parâmetros do modelo, foram necessários os seguintes dados:

- Áreas de Drenagem das bacias do Córrego do Barracão dos Mendes e do Rio Grande.
- Características Hidráulicas dos Cursos D'Água
 - Vazão de Referência.
 - Regionalização de vazões características
 - Largura
 - Declividade
 - Profundidade
 - Velocidade
- Vazão Média de Esgotos (Q_e)
- Oxigênio Dissolvido no Rio a Montante do Lançamento (ODr)
- Oxigênio Dissolvido no Esgoto (ODE)
- DBO do Rio a Montante do Lançamento (DBOr)
- DBO do Esgoto (DBOe)
- Coeficientes
 - Coeficiente de Desoxigenação (K_1)
 - Coeficiente de Decomposição (K_d)
 - Coeficiente de Reaeração (K_2)
 - A Influência da Temperatura nos Coeficientes
- Temperatura do Líquido
- Concentração de Saturação de OD
 - Correção pela Altitude

3.3. Vazão Média de Esgoto (Q_e)

Em estudo anterior, Pfeil (2014) estimou as vazões médias de esgoto afluente à ETE para três cenários populacionais:

- População atual de 528 habitantes e em 20 anos população de 457 habitantes. (decréscimo populacional proporcional ao sofrido pelas áreas rurais do distrito de Campo do Coelho). (PFEIL, 2014)
- População atual de 528 habitantes e em 20 anos população de 583 habitantes. (crescimento populacional proporcional ao sofrido pelas áreas rurais do município de Nova Friburgo) (PFEIL, 2014).
- População atual de 927 habitantes e em 20 anos população de 1022 habitantes. (SÁNCHEZ, 2014)

Os resultados encontrados por Pfeil (2014) podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1: Dados populacionais.

Fonte	(PFEIL, 2014)			(SÁNCHEZ, 2014)		Unidades
	Ano	2014	2034	2014	2034	
População	528	457*	583**	927	1022	hab
Vazão Média Diária de Esgotos	108,7	94,3	120,4	191,3	210,9	m ³ /dia
Vazão Média Horária de Esgotos	1,26	1,09	1,39	2,21	2,44	L/s

3.4. Oxigênio Dissolvido no Rio a Montante do Lançamento (OD_r) e Temperatura da água (T)

A ANA possui uma estação de medição para parâmetros de qualidade da água na região estudada. Ela se localiza no Córrego São Lourenço, um afluente do Rio Grande a montante do encontro com o Córrego do Barracão dos Mendes. Esta estação possui dados de OD no rio e de temperatura da água.

É importante lembrar que medições fora do período seco tem menos probabilidade de representar fidedignamente a realidade em situações de $Q_{7,10}$. Para determinar os meses

* Considerando um decréscimo populacional de 3,59 hab/ano. (PFEIL, 2014)

** Considerando um crescimento populacional de 2,84 hab/ano. (PFEIL, 2014)

secos, elaborou-se um gráfico com as vazões médias mensais da estação fluviométrica Fazenda Mendes, que se localiza um pouco a jusante do ponto de encontro do Córrego do Barracão dos Mendes com o Rio Grande. Tal gráfico pode ser visto na Figura 6.

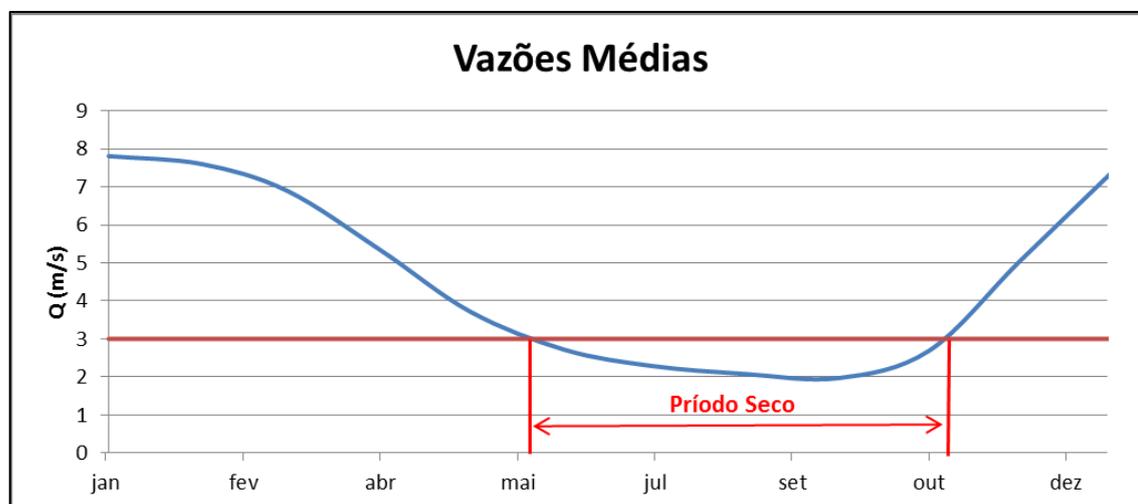


Figura 6: Vazões médias da estação fluviométrica Fazenda Mendes (ANA).

A série histórica com medições de OD e temperatura disponibilizada pela ANA possuem apenas 12 valores, alguns deles não correspondem ao período seco, e não poderão ser utilizados. A série com os valores de OD e temperatura utilizados neste estudo podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Valores de OD e temperatura da série histórica da estação São Loureço (ANA)

Data	T (°C)	OD (mg/L)
29/06/2011	15	9,12
11/10/2011	18	8,12
17/07/2012	15	8,33
10/10/2012	19	8,11
18/07/2013	17	8,33
Máximo	19	9,12
Média	16,8	8,4
Mínimo	15	8,11

3.5. Oxigênio Dissolvido no Esgoto (OD_e)

Nos esgotos tratados, o nível de oxigênio dissolvido dependerá do tipo de tratamento sofrido pelo esgoto. Von Sperling (2007) sugere os seguintes valores de acordo com o tipo de tratamento:

- Esgoto Bruto – pode ser admitido OD_e igual à zero.
- Tratamento primário – pode ser admitido OD_e igual à zero.
- Tratamento anaeróbio – o OD_e será igual à zero.
- Lodos ativados, filtros biológicos percoladores e sistemas aeróbios similares – os efluentes destes tipos de tratamento sofrem certa oxigenação em vertedores, podendo o OD_e subir a 2 mg/L ou até mais. Em emissários longos este oxigênio poderá ser consumido pela DBO do efluente e, neste caso, o OD_e voltará a ser zero.
- Lagoas facultativas – podem apresentar efluentes com grandes quantidades de oxigênio devido às algas. Para fins de cálculo podem ser adotados os valores médios entre 4 e 6 mg/L.

Este estudo considerou que o esgoto possui OD igual à zero.

3.6. DBO no Rio a Montante do Lançamento (DBO_r)

Klein (1962) *apud* Von Sperling (2007) indica alguns valores de DBO no rio de acordo com as características do curso d'água, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3: Valores de DBO presente no rio de acordo com as características do curso d'água.

Condição do Rio	Concentração de DBO (mg/L)
Bastante limpo	1
Limpo	2
Razoavelmente limpo	3
Duvidoso	5
Ruim	>10

Como os cursos d'água estudados se encontram nas cabeceiras da bacia do Rio Grande e inexistindo áreas densamente povoadas que justifiquem a adoção de valores maiores, as DBOs consideradas se limitarão a faixa entre 1 e 2 mg/L.

3.7. DBO no Esgoto bruto (DBO_{eb}) DBO no Esgoto Tratado (DBO_{et})

A NBR 12209/1992 preconiza em seu item 5.2 que os valores de DBO devem ser obtidos por investigação. Entretanto, caso inexistir estudo sobre este parâmetro, essa NBR indica o valor de 54 g/hab/dia (54000 mg/hab/dia) de DBO.

Dessa forma, sabendo a população e o volume de esgotos produzidos, é possível determinar a concentração de DBO no esgoto bruto através da Equação 11.

O esgoto doméstico tratado é dependente da eficiência do tratamento, e terá sua DBO dada pela Equação 12. (VON SPERLING, 2007)

$$DBO_{eb} = \frac{54000 \cdot Pop}{Q_e} \quad (\text{Equação 11})$$

$$DBO_{et} = \left(1 - \frac{E}{100}\right) \cdot DBO_{eb} \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

DBO_{et} é a DBO do esgoto tratado em mg/L.

Pop é a população em habitantes (hab).

E é a eficiência percentual da remoção de DBO no tratamento.

DBO_{eb} é a DBO do esgoto bruto em mg/L.

Q_e é a vazão média de esgotos em L/dia.

3.8. Coeficientes

3.8.1. Coeficiente de Desoxigenação (K_1) e de Decomposição (K_d)

O coeficiente K_1 depende das características da matéria orgânica e é obtido por regressão não linear de dados de laboratório. De acordo com Von Sperling (2007), esse valor varia de 0,12 a 0,24 em efluentes de tratamento secundário.

O coeficiente K_d será similar ao coeficiente K_1 em rios profundos e lentos, entretanto, na maioria dos casos, os valores encontrados no laboratório (K_1) são menores que os valores efetivos do curso d'água (K_d). (VON SPERLING, 2007)

De acordo com EPA (1985)/Thomann e Mueller (1987) *apud* Von Sperling (2007), o valor de K_d pode ser obtido pela Equação 13, que o relaciona à profundidade média do canal, sendo válida para profundidades menores que 2,5 m, ou pode ser obtido pela Equação 14 que é válida para vazões entre 0,15 e 250 m³/s e profundidades entre 0,3 e 10 m.

$$K_d = 0,3 \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{-0,434} \quad \text{(Equação 13)}$$

$$K_d = 1,80 \cdot Q^{-0,49} \quad \text{(Equação 14)}$$

Onde:

K_d é o coeficiente de decomposição do rio

H é a profundidade média do curso d'água no trecho.

Q é a vazão da mistura água-esgoto.

3.8.2. Coeficiente de Reaeração (K_2)

Para o cálculo deste coeficiente foram utilizadas as equações de Tsivoglou e Wallace *apud* Thomman e Muller (1987) e Owens *et al* (*apud* Branco, 1978; Chapra, 1997) como descrito em Von Sperling (2007). Essas equações deduzem K_2 a partir das características hidráulicas do curso d'água, como mostra a Equação 15, a Equação 16 e a Equação 17.

$$K_2 = 31,6 \cdot v \cdot I \quad (\text{Equação 15})$$

Para Q entre 0,03 e 0,3 m³/s.

$$K_2 = 15,4 \cdot v \cdot I \quad (\text{Equação 16})$$

Para Q entre 0,3 e 8,5 m³/s.

$$K_2 = 5,3 \cdot v^{0,67} \cdot H^{-1,85} \quad (\text{Equação 17})$$

Para v entre 0,05 e 1,5 m/s, H entre 0,1 e 0,6 m.

Onde:

K_2 é o coeficiente de reaeração em dia⁻¹.

v é a velocidade do curso d'água em m/s.

I é a declividade em m/km.

H é a profundidade em m.

Também existem valores médios como os da Tabela 4, que são sugeridos por Fair *et al* (1973) e Arceivala (1981) *apud* Von Sperling (2007).

Tabela 4: Valores de K_2 sugeridos por Fair *et al* (1973) e Arceivala (1981). (extraído de Von Sperling, 2007)

Corpo d'água	K_2 (dia ⁻¹)	
	Profundos	Rasos
Pequenas lagoas	0,12	0,23
Rios vagarosos, Grandes lagos	0,23	0,37
Grandes rios com baixa velocidade	0,37	0,46
Grandes rios com velocidade normal	0,46	0,69
Rios rápidos	0,69	1,15
Corredeiras e quedas d'água	>1,15	>1,61

3.8.3. A Influência da Temperatura

Os coeficientes supracitados foram estimados para a condição de 20 °C de temperatura. Entretanto a temperatura afeta muito o metabolismo microbiano, e com isso, as taxas de conversão da matéria orgânica. A Equação 18 mostra a relação empírica entre os coeficientes K com a temperatura do líquido.

$$K_{(1, 2 \text{ ou } d)_T} = K_{(1, 2 \text{ ou } d)_{20}} \cdot \theta^{(T-20)} \quad (\text{Equação 18})$$

Onde:

$K_{(1, 2 \text{ ou } d)_T}$ é um dos coeficientes corrigidos por uma temperatura T .

$K_{(1, 2 \text{ ou } d)_{20}}$ é um dos coeficientes, para $T = 20$ °C.

θ é o coeficiente de temperatura.

O referido coeficiente de temperatura é sugerido como 1,047 para K_1 e K_d enquanto para K_2 é sugerido o valor 1,024 (EPA, 1987 *apud* VON SPERLING, 2007).

3.9. Características Hidráulicas dos Cursos D'Água

Algumas considerações precisam ser feitas para que se tente matematizar um canal natural, uma vez que, as características que nos permitem fazer cálculos hidráulicos variam ao longo do rio. No presente estudo será adotada uma seção transversal retangular para os cursos d'água. Essa suposição baseia-se no fato de o córrego estudado ter profundidade bastante inferior à largura e, devido às irregularidades de fundo em um canal muito raso, qualquer outra forma de seção transversal apenas aumentaria a quantidade de variáveis envolvidas sem de fato contribuir para uma maior precisão dos dados.

3.9.1. Vazões de Referência.

Essa variável é de suma importância para que se determine se o rio possui capacidade de diluir o efluente lançado e permitir a estabilização da matéria orgânica do lançamento, sem que os valores mínimos de OD no rio sejam violados.

A vazão de referência é uma vazão característica mínima do rio e são comumente adotadas as vazões $Q_{95\%}$ e $Q_{7,10}$, ficando a critério do órgão responsável pela outorga do direito de uso a adoção destas ou de outras vazões de referência para as águas do corpo hídrico. Uma vez que o córrego e o rio em questão são de domínio do estado, a vazão de referência utilizada é a estipulada pelo Instituto Estadual do Ambiente (INEA), que adota a $Q_{7,10}$.

Em estudo hidrológico anterior nesta mesma bacia, o autor deste trabalho estimou a vazão característica $Q_{7,10}$ para o ponto a jusante do encontro entre o córrego e o Rio Grande com valores próximos a 0,800 m³/s. A vazão de referência encontrada para a área de drenagem imediatamente a montante do encontro das águas será dada pela proporção das áreas. A vazão de referência do córrego será obtida pela diferença entre estimativas de vazão para o ponto imediatamente a jusante e a montante do encontro das águas, o que garante a continuidade topológica. A Equação 19 e a Equação 20 mostram expressões matemáticas deste raciocínio.

$$Q(A_{RM}) = Q(A_{RJ}) \cdot \frac{A_{RM}}{A_{RJ}} \quad (\text{Equação 19})$$

$$Q(A_c) = Q(A_{RJ}) - Q(A_{RM}) \quad (\text{Equação 20})$$

Onde:

$Q(A)$ é a vazão característica referente a uma das áreas de drenagem em m³/s.

A_{RJ} é a área de drenagem do Rio Grande a jusante do encontro com o córrego.

A_{RM} é a área de drenagem do Rio Grande a montante do encontro com o córrego.

A_c é a área de drenagem do Córrego do Barracão dos Mendes.

3.9.2. Largura

A largura do córrego deve ser obtida através da média das larguras medidas em campo para vários pontos do rio, dessa forma o dado ganha mais robustez. A variabilidade da largura do canal também dependerá da vazão. A vazão de referência para o presente estudo é a $Q_{7,10}$. Sendo essa uma vazão mínima, as medições devem ser feitas no período seco. Entretanto, este trabalho não contou com visitas a campo específicas para a obtenção dos valores de largura.

Em visita anterior à comunidade para a realização de outro estudo, um dos membros da equipe do Rio Rural fotografou o córrego em questão passando abaixo de uma ponte. A ponte e a largura do córrego imediatamente abaixo dela serão medidas na fotografia (em cm). O comprimento real da ponte será medido no Google Earth (em m), o valor real da largura do rio abaixo da ponte citada poderá ser encontrado por regra de três.

Tendo em vista que este é o único ponto em que se possui a largura do rio, este valor será adotado como a largura média.

A referida fotografia foi tirada em janeiro de 2014, durante um verão quente e extremamente seco. Por este motivo, assume-se que a vazão do rio se assemelhava as vazões de tempo seco, logo, foi considerado que a largura do córrego durante uma situação de vazão $Q_{7,10}$ se aproximará do valor encontrado por este método.

Para as larguras do Rio Grande, foram realizadas medições no Google Earth de sete pontos do rio a jusante do ponto de encontro com o córrego do Barracão dos Mendes em uma imagem de 29/07/2010 (período seco). O valor utilizado na modelagem foi a média aritmética destes valores.

3.9.3. Declividade

A declividade média pode ser entendida como a razão entre a variação da altitude e a distância percorrida, como mostra a Equação 21.

$$I = \frac{(h_2 - h_1)}{L} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

I é a declividade em m/m.

h_1 e h_2 são respectivamente a menor e a maior altitude do trecho de rio considerado.

L é o comprimento do trecho de rio.

Esses dados serão encontrados por geoprocessamento. Os valores de altitude serão obtidos do MDE e o comprimento do trecho de rio será calculado pela ferramenta “*Calculate Geometry*”. O trecho do córrego utilizado para o cálculo da declividade está compreendido entre um ponto do curso d’água a oeste da comunidade central de Barracão dos Mendes e o ponto de encontro de suas águas com as do Rio Grande.

3.9.4. Profundidade

O presente subitem é baseado em Azevedo Netto (1998), que apresenta toda a formulação elencada.

A profundidade será encontrada a partir da fórmula de Chézy com coeficiente de Manning. Esta fórmula relaciona a área molhada do canal, sua rugosidade, o raio hidráulico, a declividade e a vazão. Isolando a variável da vazão, tem-se a Equação 22.

$$Q = \frac{1}{n} \cdot A \cdot R_H^{2/3} \cdot I^{1/2} \quad (\text{Equação 22})$$

Onde:

Q é a vazão em m³/s.

n é o coeficiente de rugosidade.

R_H é o raio hidráulico.

I é a declividade em m/m.

A é a área molhada da seção em m².

O valor do coeficiente de Manning adotado foi 0,050 (sugerido pelo NRC-EUA *apud* Azevedo Netto, 1998).

De acordo com a suposição de um canal retangular, o raio hidráulico será dado pela Equação 23 e a área da seção molhada pode ser obtida pela Equação 24.

$$R_H = \frac{b \cdot H}{b + 2H} \quad (\text{Equação 23})$$

$$A = b \cdot H \quad (\text{Equação 24})$$

Onde:

b é a largura do canal em m.

H é a profundidade em m.

A é a área molhada da seção em m².

R_H é o raio hidráulico.

Uma tabela dinâmica foi programada no Excel com a formulação citada. A vazão da Equação 22 foi igualada à soma da vazão $Q_{7,10}$ do córrego com a vazão de esgotos (no caso do Rio Grande, sua vazão foi somada às outras duas), através da utilização da ferramenta “Atingir Metas” (Solver), com a variação do parâmetro H . O valor de H encontrado será tomado como a profundidade média em situações de vazão $Q_{7,10}$.

3.9.5. Velocidade

Segundo Azevedo Netto (1998), a velocidade pode ser obtida a partir da equação da continuidade. Com a variável da velocidade isolada, tem-se a Equação 25.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (\text{Equação 25})$$

Onde:

v é a velocidade média do canal em m/s

Q é a vazão em m³/s.

A é a área molhada da seção em m².

Deve-se lembrar de que a vazão a ser utilizada é a $Q_{7,10}$ e de que a área molhada deverá considerar a profundidade durante esta vazão.

3.10. Obtenção das Áreas de Drenagem

Em bacias de maior porte a área de drenagem poderia ser facilmente estimada através do shapefile de otobacias disponibilizado pela ANA. Entretanto, para bacias muito pequenas, como a estudada neste trabalho, existe um problema de escala.

O shapefile de otobacias foi criado para todos os trechos da hidrografia do Brasil, incluindo os trechos dos rios brasileiros que se encontram fora do território nacional, como rios com nascentes em território estrangeiro ou que tenham sua foz além das nossas fronteiras. Este fato é suficiente para que se suponha que o referido shapefile não possua a

precisão necessária à determinação da área de drenagem de um pequeno córrego. O mesmo é válido para o shapefile com a hidrografia integrada, também disponibilizado pela ANA.

Para o presente estudo foram delimitadas as bacias hidrográficas do córrego do Barracão dos Mendes e do Rio Grande (a montante do ponto de encontro com o referido córrego). Tal delimitação foi realizada utilizando técnicas de geoprocessamento no software ArcGIS 10.1, a partir de um MDE disponibilizado pela equipe INTECRAL.

É necessário que a hidrografia esteja corretamente representada, por isso foram traçados os caminhos exatos percorridos pelos cursos d'água estudados na paisagem para criar um shapefile preciso da hidrografia estudada. Esses percursos foram traçados diretamente com o cursor sobre imagens de satélite no Google Earth, foram salvos como KMZ (arquivo do Google Earth) e depois importados para o ArcGIS como um shapefile.

Com relação ao MDE, este possui resolução espacial de 30 m, ou seja, cada pixel quadrado possui 30 m de lado. Torna-se necessário diminuir este valor para que as ferramentas do ArcGIS sejam capazes de localizar os divisores topográficos com qualidade suficiente para a delimitação da bacia hidrográfica. Para este fim, partindo do MDE, gerou-se um shapefile contendo as curvas de nível da área de estudo a intervalos de 1 m. Tais curvas de nível, juntamente com o shapefile contendo a hidrografia local (gerado neste trabalho como citado anteriormente) foram interpoladas pela ferramenta “*Topo To Raster*” que gerou um MDE hidrológicamente correto, esta ferramenta permite que se arbitre a resolução espacial do MDE de saída, no caso em questão, o MDE gerado possui 15 m de resolução espacial. É importante lembrar que embora possua a resolução espacial muito melhor que a do MDE original, o novo MDE ainda está ligado à escala dos dados originais que o geraram, por tanto, não houve um ganho significativo na precisão dos dados, mas sim, uma suavização destes para que o software fosse capaz trabalhá-los corretamente.

Partindo do MDE criado, foi usada a ferramenta “*Flow Direction*”, que gera uma imagem com a direção preferencial do escoamento superficial sobre cada pixel, classificando os pixels pela atribuição de valores codificados. Tal raster é utilizado como *input* para a ferramenta “*Basin*”, que divide a superfície em diversas pequenas áreas de drenagem. A bacia de drenagem de um rio é dada pela união de todas as pequenas áreas de drenagem cujas águas do escoamento superficial sejam direcionadas ao rio. As referidas áreas foram agrupadas usando a ferramenta “*Dissolve*”, que as uniu em um único polígono. Este polígono será a delimitação final da bacia hidrográfica do córrego do Barracão dos Mendes.

Uma vez delimitada, a área da bacia hidrográfica foi então calculada com a ferramenta “*Calculate Geometry*”, utilizando o sistema de coordenadas SAD69_UTM23K e será dada em quilômetros quadrados.

3.11. Tempo de Percurso

O tempo de percurso no Córrego do Barracão dos Mendes é fundamental para a modelagem, pois os parâmetros de saída deste primeiro trecho serão obtidos a partir dele. Tais parâmetros servirão como dados de entrada no segundo trecho estudado, no Rio Grande.

O tempo de percurso pode ser obtido pela Equação 10 isolando a variável t , como mostra a Equação 26.

$$t = \frac{d}{v \cdot 86400} \quad (\text{Equação 26})$$

Onde:

v é a velocidade média do rio em m/s.

d é a distância percorrida na calha do rio em m.

t é o tempo em dias.

3.12. Concentração de Saturação de OD (C_s)

A concentração de saturação de OD é dependente da temperatura e obtida pela Equação 27 (Pöpel, 1979, *apud* Von Sperling, 2007). A C_s sofre influencia da altitude segundo a Equação 28 (Qasim, 1985 *apud* Von Sperling, 2007).

$$C_s = 14,652 - 4,1022 \cdot 10^{-1} \cdot T + 7,9910 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 7,7774 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (\text{Equação 27})$$

$$C'_s = C_s \cdot \left(1 - \frac{Alt}{9450}\right) \quad (\text{Equação 28})$$

Onde:

C'_s é a concentração de saturação corrigida pela altitude em mg/L.

C_s é a concentração de saturação de OD em mg/L.

T é a temperatura em °C.

Alt é a altitude.

3.13. Oxigênio Dissolvido Mínimo

O OD mínimo é dado pela CONAMA 357/2005, que arbitra os valores mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Valores mínimos de OD (extraído da CONAMA 357/2005).

Classe	OD mínimo (mg/L)
Especial	Não são permitidos lançamentos
1	6
2	5
3	4
4	2

Para este trabalho os cursos d'água serão considerados Classe 1 devido à produção de hortícolas na região. Na CONAMA 357/2005 a irrigação de hortaliças que podem ser consumidas cruas é citada como uso benéfico característico das águas desta classe.

3.14. Criação dos Cenários

Este trabalho criou dois cenários básicos subdivididos em quatro outros cenários cada um. Os cenários básicos foram criados com as duas vazões de esgoto evidenciadas anteriormente, o primeiro cenário (Cenário 1) para a população estimada por Pfeil (2014), o segundo (Cenário 2) para a população encontrada por Sánchez (2014). Em cada um dos cenários básicos foram criados as seguintes subdivisões:

- a) Valores de referência dos parâmetros variáveis, escolhidos de forma a se situarem afastados das extremidades do intervalo de variação (médias, medianas, ou valores sugeridos que não tenham sido usados como extremos do intervalo).
- b) Valores mínimos de cada parâmetro variável.
- c) Valores máximos de cada parâmetro variável.
- d) A parametrização que causar a maior degradação do rio, excetuando aquelas em que, mesmo sem o lançamento de esgotos, seja capaz de produzir valores para a concentração de OD que violem a Classe 1 de águas (CONAMA 357/2005).

3.15. Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade tomou como parâmetro um dos cenários criados, onde o rio não sofresse impacto a ponto de violar a classe 1 de águas, mesmo com o esgoto bruto. Fez-se variar os parâmetros um a um dentro dos limites considerados (mostrados nos resultados deste trabalho como as situações b e c dos cenários). A classificação das variáveis será dada segundo os seguintes critérios:

- Pouco Sensível: Quando as alterações nos dados de saída do modelo demonstrarem variação total menor que 10% em todos os dados de saída.
- Sensível: Quando as alterações nos dados de saída do modelo demonstrarem variação total maior do que 20% e menor do que 50% em pelo menos um dos dados de saída.
- Quando as alterações nos dados de saída do modelo demonstrarem variação total maior do que 50% em pelo menos um dos dados de saída.

4. Resultados

4.1. Obtenção das Áreas de Drenagem

As áreas de drenagem obtidas por geoprocessamento podem ser vistas na Figura 7.

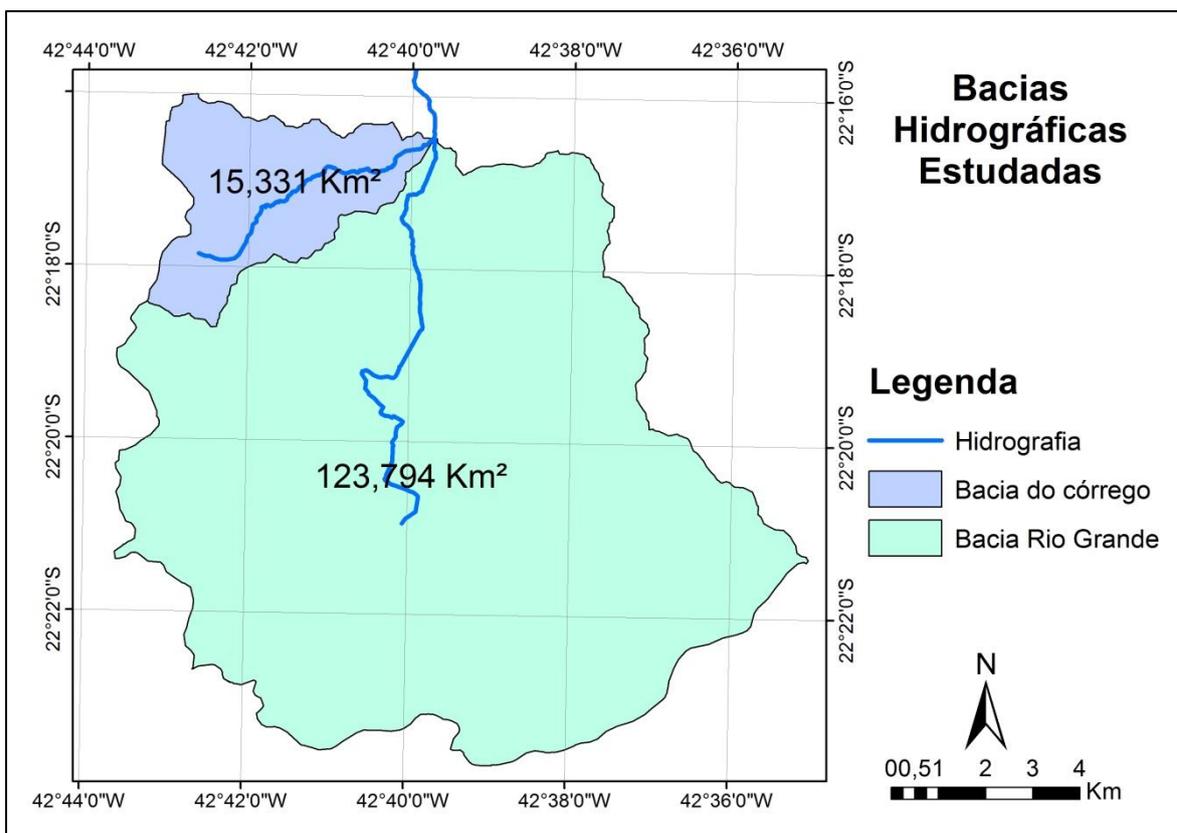


Figura 7: Delimitação das bacias hidrográficas estudadas e respectivas áreas de drenagem.

4.2. Características Hidráulicas do Curso D'Água

4.2.1. Vazão de Referência

As vazões de referência encontradas para este trabalho se encontram na Tabela 6. Vele destacar que a vazão do córrego foi obtida pela subtração das vazões estimadas para as bacias imediatamente a montante e a jusante do desague do córrego no Rio Grande.

Tabela 6: Vazões de Referência.

Curso d'Água	Área (Km ²)	Vazão (m ³ /s)	Ponto de Referência
Rio Grande	139	0,800	Imediatamente a jusante do encontro das águas
Rio Grande	124	0,714	Imediatamente a montante do encontro das águas
Córrego do Barracão dos Mendes	15	0,086	Até o encontro das águas

4.2.2. Largura

A Figura 8 mostra a medição do córrego e da ponte sobre fotografia, a Figura 9 mostra a medidas do comprimento da ponte e a Figura 10 mostra as medidas de várias seções do Rio Grande. Os dados obtidos são mostrados na Tabela 7.



Figura 8: Medição da ponte e do córrego em fotografia.



Figura 9: Medida da ponte no Google Earth.



Figura 10: Medidas da largura do Rio Grande imediatamente a jusante do encontro com o Córrego do Barracão dos Mendes.

Tabela 7: Cálculo da largura dos cursos d'água.

Córrego do Barracão dos Mendes		
Comprimento da Ponte (Foto)	9	cm
Largura do córrego (Foto)	1,25	cm
Comprimento da Ponte (Google Earth)	10,31	m
Largura do córrego	1,43	m
Rio Grande		
Medida 1	4,8	m
Medida 2	4,2	m
Medida 3	3,9	m
Medida 4	4,3	m
Medida 5	7,9	m
Medida 6	3,9	m
Medida 7	5,6	m
Largura média do rio	4,9	m

4.2.3. Declividade

Os valores encontrados para as declividades médias nos dois trechos são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Cálculo das declividades.

	Córrego	Rio	Unidades
Cota mais alta do trecho (a partir do MDE)	1029	1026	m
Cota mais baixa do trecho (a partir do MDE)	1026	910	m
Comprimento do curso d'água no trecho	1660	27308	m
Declividade média do trecho	0,0018	0,0042	m/m

4.2.4. Profundidade

Os valores encontrados para as profundidades médias nos dois trechos podem ser vistas na Tabela 9.

Tabela 9: Profundidades calculadas (fórmula de Chézy com $n=0,050$).

Profundidade Média (m)	
Córrego	0,23
Rio	0,30

4.2.5. Velocidade

Os valores encontrados para as velocidades médias nos dois trechos estão na Tabela 10.

Tabela 10: Velocidades médias calculadas a partir da equação de continuidade.

Velocidade Média (m/s)	
Córrego	0,26
Rio	0,55

4.3. Vazão Média de Esgoto (Q_e) e DBO no Esgoto (DBO_e)

Foram adotados na modelagem os maiores valores de vazão média horária de esgotos (em m^3/s) obtidos segundo os dados populacionais dos dois autores supracitados. Os valores de vazão média diária (em L/dia) foram usados para determinar a DBO bruta do esgoto. Os valores da DBO bruta foram muito próximos, por isso foi decidida a adoção do maior valor, considerando a pior situação para a modelagem. Os valores mencionados se encontram destacados em azul na Tabela 11.

Tabela 11: Vazões médias de esgoto e DBO do esgoto (mg/L).

Fonte	(PFEIL, 2014)			(SÁNCHEZ, 2014)		Unidades
	2014	2034	2034	2014	2034	
Ano	2014	2034	2034	2014	2034	---
População	528	457	583	927	1022	hab
Vazão Média Diária de Esgotos	108,7	94,3	120,4	191,3	210,9	m^3/dia
Vazão Média Horária de Esgotos	1,26	1,09	1,39	2,21	2,44	L/s
Vazão Média Diária de Esgotos	108700	94300	120400	191300	210900	L/dia
Vazão Média Horária de Esgotos	0,00126	0,00109	0,00139	0,00221	0,00244	m^3/s
DBO bruta	54	54	54	54	54	g/hab/dia
DBO bruta	262,30	261,70	261,48	261,67	261,68	mg/L

4.4. Coeficientes

Os valores encontrados para os coeficientes do córrego são mostrados na Tabela 12 e os encontrados para o rio estão na Tabela 13.

Tabela 12: Coeficientes encontrados para o córrego segundo autores citados por Von Sperling (2007).

K_1	0,12-0,18	dia ⁻¹	Von Sperling (2007)
K_d	0,85	dia ⁻¹	EPA (1985) e Thomann Mueller (1987)
K_2	14,57	dia ⁻¹	Equação de Tsivoglou e Wallace <i>apud</i> Thomman e Muller (1987)
	32,90	dia ⁻¹	Equação de Owens <i>et al</i> (<i>apud</i> Branco, 1978; Chapra , 1997)
	0,37	dia ⁻¹	Para rios lentos segundo Fair et al (1973) e Aceivala (1981)
	5,62	dia ⁻¹	Média geométrica (VON SPERLING, 2007)

Tabela 13: Coeficientes encontrados para o rio segundo autores citados por Von Sperling (2007)

K_1	0,12-0,24	dia ⁻¹	Von Sperling (2007)
K_d	0,85	dia ⁻¹	Em função da profundidade segundo EPA (1985) e Thomann Mueller (1987)
	1,99	dia ⁻¹	Em função da vazão segundo EPA (1985) e Thomann Mueller (1987)
	1,36	dia ⁻¹	Média aritmética
K_2	35,41	dia ⁻¹	Equação de Tsivoglou e Wallace <i>apud</i> Thomman e Muller (1987)
	33,07	dia ⁻¹	Equação de Owens <i>et al</i> (<i>apud</i> Branco, 1978; Chapra , 1997)
	1,15	dia ⁻¹	Para rios rápidos segundo Fair et al (1973) e Aceivala (1981)
	0,37	dia ⁻¹	Para rios lentos segundo Fair et al (1973) e Aceivala (1981)
	4,71	dia ⁻¹	Média geométrica (VON SPERLING, 2007)

Devido à grande variabilidade do coeficiente K_2 , aliado ao fato de que os valores mais elevados levavam o modelo a situações em que o esgoto não causaria, virtualmente, nenhuma depleção do OD, ou ainda, levaria a impossibilidades matemáticas, uma faixa de variação foi escolhida indo do valor mínimo encontrado (0,37) ao valor da média geométrica para o rio neste este parâmetro.

4.5. Tempo de Percurso no Córrego

A curta distância do ponto de lançamento ao encontro com o Rio Grande (1.660 m) é percorrida em 0,075 dias, de acordo com a v , utilizando a velocidade estabelecida para o córrego.

4.6. Concentração de Saturação de OD (Cs)

A concentração de saturação é dependente da temperatura, por este motivo também variara entre valores máximo e mínimo, de acordo com as temperaturas máxima e mínima. Os valores encontrados podem ser vistos na Tabela 14. É importante lembrar que este parâmetro é obtido automaticamente pela programação do Excel, dessa forma as variações sofridas por ele não serão arbitradas, mas sim calculadas a partir da escolha dos valores de temperatura. Os valores centrais correspondem à situação de temperaturas médias.

Tabela 14: Valores da concentração de saturação e respectivas temperaturas.

Temperatura	15	16,8	19	°C
Concentração de saturação	8,94	8,6	8,21	mg/L

4.7. Cenários

4.7.1. Cenário 1

Este cenário utilizou a vazão média de esgotos de 0,00139 m³/s.

A parametrização utilizada nas quatro situações criadas pode ser vista na Tabela 15. Os dados resultantes da aplicação do modelo para este cenário estão na Tabela 16. Os gráficos de depleção de oxigênio podem ser vistos da Figura 11 a Figura 14.

Tabela 15: Parametrizações do Cenário 1.

Situação	a	b	c	d
Córrego do Barracão dos Mendes				
DBO (mg/L)	1,5	1,0	2,0	2,0
OD (mg/L)	8,4	8,11	9,12	8,11
Temperatura (°C)	16,8	15	19	19
K_1	0,18	0,12	0,24	0,12
K_d	0,85	0,85	0,85	0,85
K_2	2,41	0,37	5,62	0,37
Rio Grande				
DBO (mg/L)	1,5	1,0	2,0	2,0
OD (mg/L)	8,4	8,11	9,12	8,11
Temperatura (°C)	16,8	15	19	19
K_1	0,18	0,12	0,24	0,12
K_d	1,36	0,75	1,99	1,36
K_2	1,15	0,37	4,70	1,15

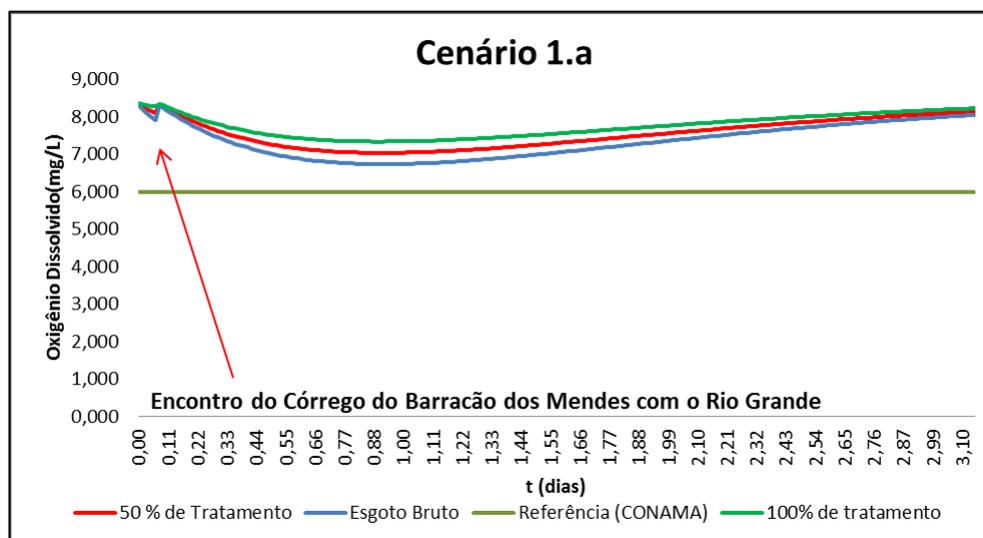


Figura 11: Cenário 1.a.

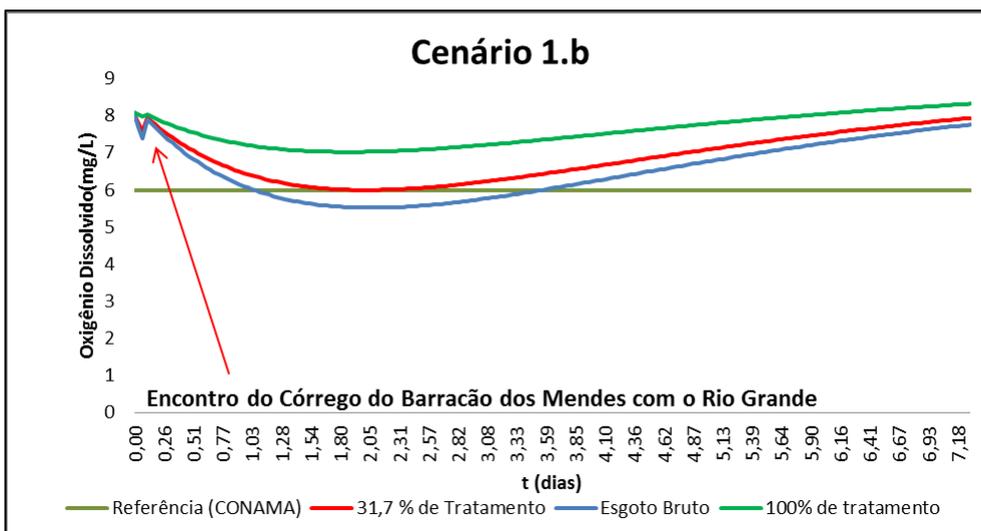


Figura 12: Cenário 1.b.

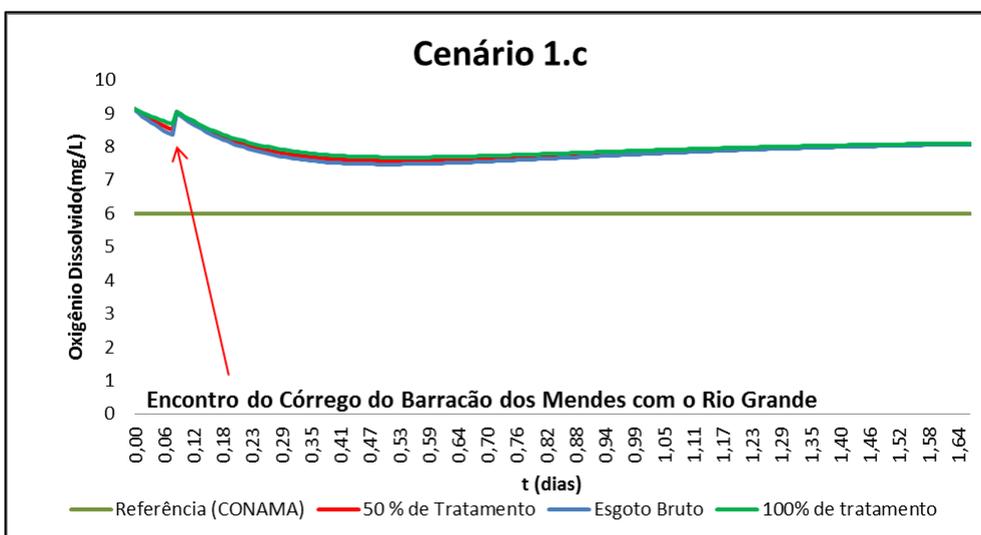


Figura 13: Cenário 1.c.

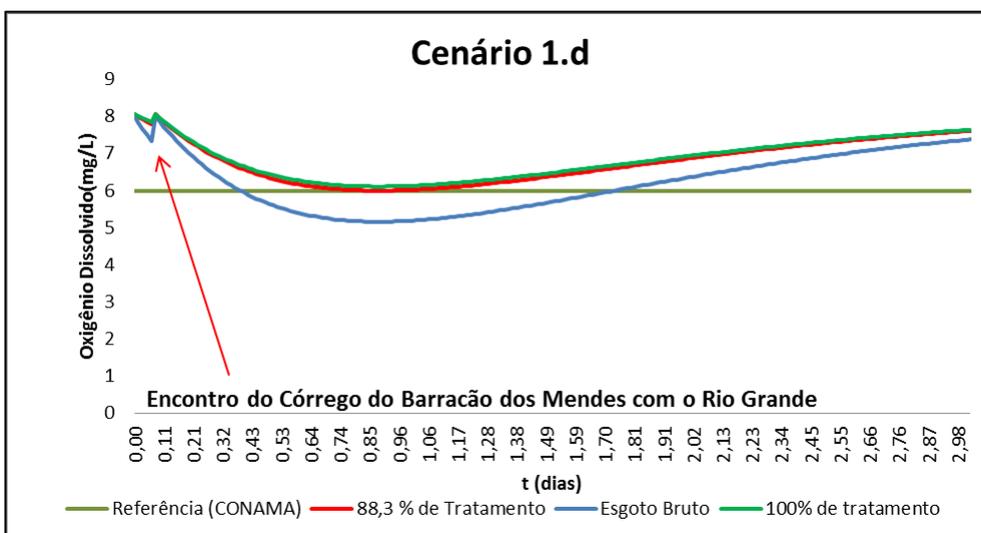


Figura 14: Cenário 1.d.

Tabela 16: Dados resultantes da aplicação do modelo para o Cenário 1.

Cenário	1.a	1.b		1.c	1.d		Unidades
Tempo Crítico	0,92	2,06	2,02	0,51	0,88	0,88	dias
Distância Crítica	41,23	94,69	92,88	21,84	39,48	39,47	km
Déficit Crítico	1,85	3,42	2,94	0,73	3,04	2,21	mg/L
OD crítico	6,75	5,52	6,00	7,48	5,16	6,00	mg/L
Tratamento Mínimo	---	---	31,7	---	---	88,3	%

4.7.2. Cenário 2

Este cenário utilizou a vazão média de esgotos de 0,00244 m³/s.

A parametrização utilizada nas quatro situações criadas pode ser vista na Tabela 17. Os dados resultantes da aplicação do modelo para este cenário estão na Tabela 18. Os gráficos de depleção de oxigênio podem ser vistos da Figura 15 a Figura 18.

Tabela 17: Parametrização criada para o Cenário 2.

Situação	a	b	c	d
Córrego do Barracão dos Mendes				
DBO (mg/L)	1,5	1	2,0	2,0
OD (mg/L)	8,4	8,11	9,12	8,11
Temperatura (°C)	16,8	15	19	19
K_1	0,18	0,12	0,24	0,16
K_d	0,85	0,85	0,85	0,85
K_2	2,41	0,37	5,62	0,37
Rio Grande				
DBO (mg/L)	1,5	1,0	2,0	2,0
OD (mg/L)	8,4	8,11	9,12	8,11
Temperatura (°C)	16,8	15	19	19
K_1	0,18	0,12	0,24	0,16
K_d	1,36	0,75	1,99	1,99
K_2	1,15	0,37	4,70	1,15

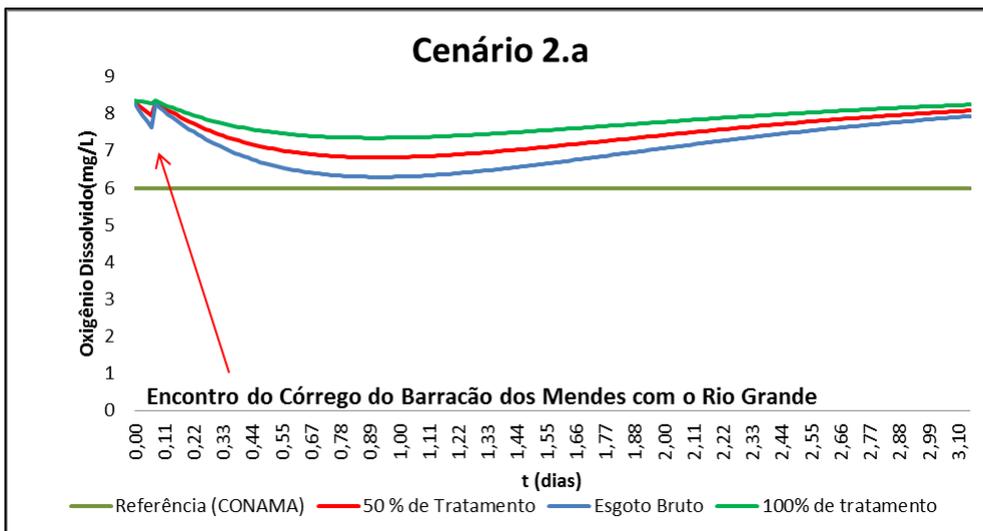


Figura 15: Cenário 2.a.

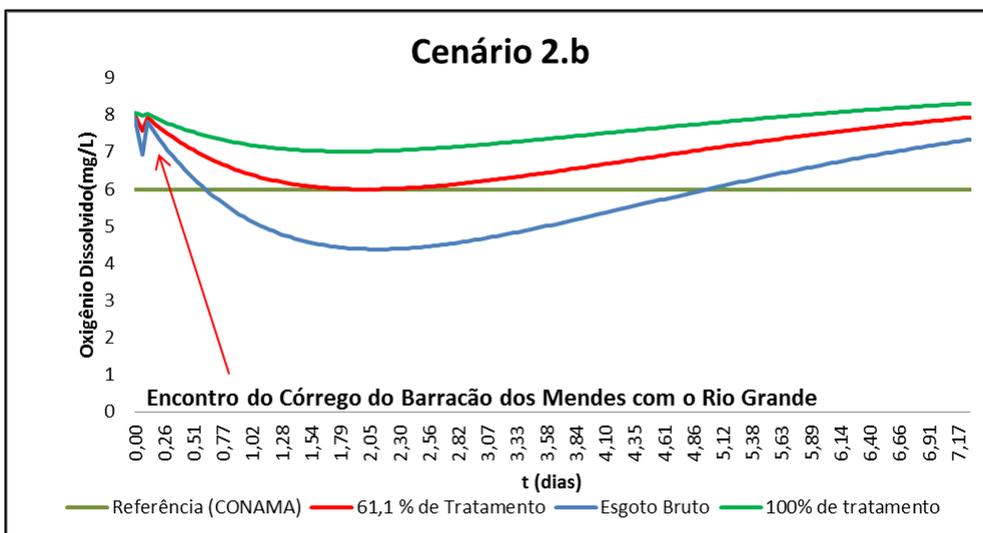


Figura 16: Cenário 2.b.

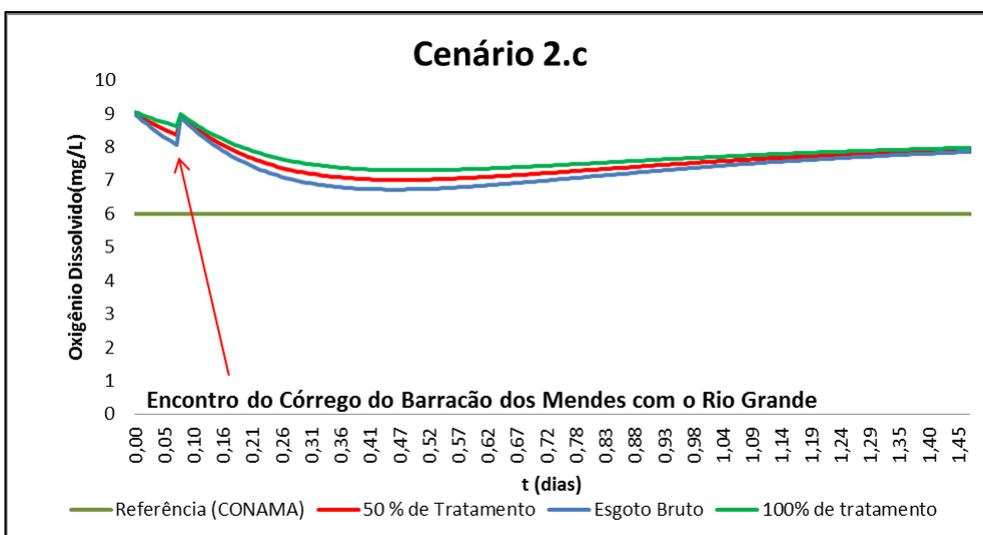


Figura 17: Cenário 2.c.

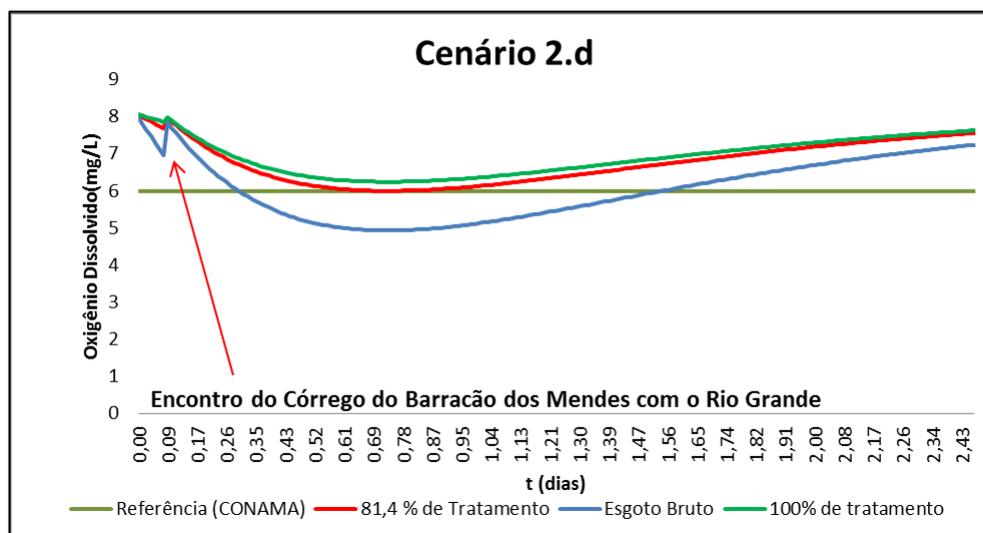


Figura 18: Cenário 2.d.

Tabela 18: Dados resultantes da aplicação do modelo para o Cenário 2.

Cenário	2.a	2.b	2.c	2.d	Unidades		
Tempo Crítico	0,92	2,14	2,02	0,48	0,73	dias	
Distância Crítica	41,42	98,55	92,71	20,74	32,54	32,51	km
Déficit Crítico	2,32	5,33	2,94	0,90	3,28	2,21	mg/L
OD crítico	6,28	3,61	6,00	7,31	4,93	6,00	mg/L
Tratamento Mínimo	---	---	61,10	---	---	81,41	%

4.8. Análise de Sensibilidade dos Parâmetros

Considerando os dados de saída do modelo no cenário 2.a, como mostrado na Tabela 19, fez-se a análise de sensibilidade. A tabela mostra os resultados numéricos da análise enquanto a Tabela 20 mostra a classificação das variáveis. A classificação dada a cada variável pode ser vista na Tabela 21.

Tabela 19: Parâmetros para a análise de sensibilidade.

Tempo Crítico	0,923315	dias
Distância Crítica	41,4104	km
Déficit Crítico	2,30292	mg/L
OD Crítico	6,296609	Mg/L

Tabela 20: Dados da análise de sensibilidade.

	Máximo	Mínimo	% Máx.	% Mín.	% Total
Temperatura do córrego					
Tempo Crítico	0,855726	0,982571	-7,32%	6,42%	13,74%
Distância Crítica	38,24211	44,18808	-7,65%	6,71%	14,36%
Déficit Crítico	2,144495	2,451988	-6,88%	6,47%	13,35%
OD Crítico	6,455034	6,147542	2,52%	-2,37%	4,88%
OD no córrego					
Tempo Crítico	0,932585	0,919584	1,00%	-0,40%	1,41%
Distância Crítica	41,84493	41,2355	1,05%	-0,42%	1,47%
Déficit Crítico	2,277991	2,313031	-1,08%	0,44%	1,52%
OD Crítico	6,321538	6,286499	0,40%	-0,16%	0,56%
DBO do córrego					
Tempo Crítico	0,923979	0,922608	0,07%	-0,08%	0,15%
Distância Crítica	41,44156	41,37729	0,08%	-0,08%	0,16%
Déficit Crítico	2,371131	2,23471	2,96%	-2,96%	5,92%
OD Crítico	6,228398	6,364819	-1,08%	1,08%	2,17%
k1 do córrego					
Tempo Crítico	0,92096	0,926989	-0,26%	0,40%	0,65%
Distância Crítica	41,30003	41,58264	-0,27%	0,42%	0,68%
Déficit Crítico	2,094526	2,731949	-9,05%	18,63%	27,68%
OD Crítico	6,505004	5,86758	3,31%	-6,81%	10,12%
kd do córrego					
Tempo Crítico	0,920833	0,925826	-0,27%	0,27%	0,54%
Distância Crítica	41,29405	41,52811	-0,28%	0,28%	0,57%
Déficit Crítico	2,309641	2,29614	0,29%	-0,29%	0,59%
OD Crítico	6,289889	6,303389	-0,11%	0,11%	0,21%
k2 do córrego					
Tempo Crítico	0,925797	0,921482	0,27%	-0,20%	0,47%
Distância Crítica	41,52677	41,32451	0,28%	-0,21%	0,49%
Déficit Crítico	2,296217	2,30788	-0,29%	0,22%	0,51%
OD Crítico	6,303312	6,29165	0,11%	-0,08%	0,19%
Temperatura do rio					
Tempo Crítico	0,981952	0,871751	6,35%	-5,58%	11,94%
Distância Crítica	44,15907	38,9933	6,64%	-5,84%	12,47%
Déficit Crítico	2,149707	2,44665	-6,65%	6,24%	12,89%
OD Crítico	6,059565	6,498112	-3,76%	3,20%	6,96%
OD no rio					
Tempo Crítico	1,009092	0,873387	9,29%	-5,41%	14,70%
Distância Crítica	45,43129	39,06997	9,71%	-5,65%	15,36%
Déficit Crítico	2,082285	2,441956	-9,58%	6,04%	15,62%
OD Crítico	6,591845	6,232174	4,69%	-1,02%	5,71%
DBO do rio					
Tempo Crítico	0,919372	0,902454	-0,43%	-2,26%	-1,83%
Distância Crítica	41,22558	40,43253	-0,45%	-2,36%	-1,92%
Déficit Crítico	2,652436	2,014393	15,18%	-12,53%	27,71%

	Máximo	Mínimo	% Máx.	% Mín.	% Total
OD Crítico	6,021694	6,659737	-4,37%	5,77%	10,13%
k1 do rio					
Tempo Crítico	0,901176	0,926383	-2,40%	0,33%	2,73%
Distância Crítica	40,37264	41,55421	-2,51%	0,35%	2,85%
Déficit Crítico	1,979194	3,066134	-14,06%	33,14%	47,20%
OD Crítico	6,694936	5,607996	6,33%	-10,94%	17,26%
kd do rio					
Tempo Crítico	0,768927	1,161213	-16,72%	25,77%	42,49%
Distância Crítica	34,17334	52,56211	-17,48%	26,93%	44,41%
Déficit Crítico	2,770013	1,701562	20,28%	-26,11%	46,40%
OD Crítico	5,904117	6,972568	-6,23%	10,74%	16,97%
k2 do rio					
Tempo Crítico	0,424584	1,500413	-54,02%	62,50%	116,52%
Distância Crítica	18,03192	68,46247	-56,46%	65,33%	121,78%
Déficit Crítico	1,012014	3,635017	-56,06%	57,84%	113,90%
OD Crítico	7,662116	5,039113	21,69%	-19,97%	41,66%

Tabela 21: Classificação da sensibilidade do modelo às variáveis.

Temperatura do córrego	Pouco sensível
OD no córrego	Pouco sensível
DBO do córrego	Pouco sensível
K_1 do córrego	Sensível
K_d do córrego	Pouco sensível
K_2 do córrego	Pouco sensível
Temperatura do rio	Pouco sensível
OD no rio	Pouco sensível
DBO do rio	Sensível
K_1 do rio	Sensível
K_d do rio	Sensível
K_2 do rio	Muito Sensível

5. Considerações Finais

Os resultados mostraram que mesmo com as parametrizações que causaram maior degradação tratável nos cursos d'água, o percentual de tratamento mínimo exigido está próximo dos alcançados pelo tratamento secundário de esgotos (80%).

Com relação ao córrego, o percurso em sua calha é tão pequeno que a mistura água-esgoto não foi capaz de permanecer tempo suficiente no córrego para que a depleção de oxigênio fizesse a concentração chegar a níveis inferiores ao estipulado.

No Rio Grande, a maioria das parametrizações testadas (incluindo as que não fazem parte do corpo deste trabalho) mostrou resultados que requereriam um tratamento muito baixo dos esgotos, ou mesmo o dispensariam. Os valores mostrados como “piores casos” apresentam parametrizações onde a maior parte das variáveis se encontra nos limites do intervalo considerado. As poucas situações paramétricas onde o rio estava irremediavelmente violado (em termos de OD da classe 1) ocorreram com algumas combinações específicas em que todas as variáveis foram escolhidas em seus extremos com influência mais negativa no modelo.

Os valores de K_2 foram os que possuíram maiores intervalos, pois os dados tabelados e as equações apontavam para valores com diferentes ordens de grandeza, principalmente no que se refere ao K_2 do Rio Grande, tendo sido considerado para este curso d'água apenas o intervalo entre o menor valor e a média geométrica dos valores encontrados. Esta decisão se baseou no fato de que para valores muito altos de K_2 do rio, os dados obtidos não apenas dispensavam o tratamento do esgoto bruto, mas também chegavam a aumentar a quantidade de OD do rio, ou mesmo alcançavam valores que geravam incongruências matemáticas, fazendo com que o modelo deixasse de funcionar. Todas essas situações pareciam não representar a realidade e por tanto foram retiradas dos intervalos de variação de K_2 .

Outra observação a ser feita é a de que ao longo do curso do rio grande haverá a adição de vazões incrementais, seja por escoamentos superficiais, de base ou desague de afluentes. Essas vazões não foram consideradas neste trabalho, mas em tese, tais vazões deixariam os cenários ainda mais favoráveis à manutenção da qualidade das águas do Rio Grande.

É importante mencionar que os dados de temperatura e OD da estação São Lourenço não estavam acompanhados da vazão no momento da coleta. O problema gerado por este fato está na variabilidade diária das vazões, que podem alcançar valores bastante diferentes ao longo dos dias do mês. Mesmo tendo sido adotado o critério de escolher as medições referentes ao período seco, nada garante que esses dados foram medidos em situações de seca (próximas à $Q_{7,10}$). Deve-se evidenciar o binômio qualidade-quantidade de água para que os dados obtidos por medições nos rios realmente representem as características da bacia o mais fielmente possível.

O modelo foi calibrado com os dados mais precisos que foi possível encontrar sem que houvesse a coleta de amostras ou experimentos *in loco*. Este fato introduz um grau alto de incerteza à modelagem, pois os valores tabelados e as fórmulas empíricas (fontes de dados deste trabalho) são fruto de observações realizadas em outras bacias, podendo não representar corretamente as peculiaridades da área de estudos do presente trabalho.

Entretanto, devido à imensa predominância de situações saneáveis com tratamento secundário dos esgotos, ou mesmo sem o tratamento destes, este trabalho considera que a solução de saneamento de Barracão dos Mendes deverá ser capaz de dar aos esgotos um tratamento secundário com eficiência próxima a 80%, para garantir que as águas a jusante do ponto de lançamento não violarão o valor de OD mínimo da classe 1 de águas imposto pela CONAMA 357/2005, mesmo nas piores hipóteses.

Referências Bibliográficas

ABNT. NBR 12209. **Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro. 1992. p.12.

ANA. **HidroWeb: Sistema de Informações Hidrológicas**. Brasil: ANA. Sem Data. Disponível em < <http://hidroweb.ana.gov.br/>> com acesso de abril a junho de 2013.

AZEVEDO NETTO, José M. et al. **Manual de Hidráulica**. 8ª ed. São Paulo: Blucher, 1998. 10ª reimpressão, 2012. p.669.

CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Publicada no DOU nº 053, de 18 de março de 2005, págs. 58-63.

HORA, Mônica de A.G.M. da; MARQUES, Eduardo. **SAD – RH: Sistema Generalizado para Apoio à Decisão na Gestão de Recursos Hídricos**. Projeto Macacú. Niterói, RJ: UFF/FEC, p. 88. 2010. Disponível em <http://www.uff.br/projetomacacu/relatorios/volume_2.pdf> com acesso em 05 de julho de 2013.

HWA, Chou Sin; HORA, Mônica de A.G.M. da. **Produção Científica do Projeto Macacú: Planejamento Estratégico da Região Hidrográfica dos Rios Guapi-Macacú e Caceribú-Macacú**. Projeto Macacú. Rio de Janeiro, RJ: FEC/UFF; Petrobrás Ambiental, p. 151. 2009. Disponível em < http://www.uff.br/projetomacacu/relatorios/volume_3.pdf> com acesso em 03 de julho de 2013.

IBGE. **Base de informações do Censo Demográfico 2010: Resultados do Universo por setor censitário**. Documentação do Arquivo. Rio de Janeiro: IBGE, 2011. p. 127.

PFEIL, Luiz Eduardo Cavallo. **Saneamento rural no município de Nova Friburgo/RJ: Estudos preliminares à solução de esgotamento sanitário de Barracão dos Mendes**. 2014. 70 p. (Trabalho de Conclusão de Curso I para a obtenção da titulação de Engenheiro Ambiental) Niterói: Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente – Universidade Federal Fluminense (UFF).

PMNF. **Site da Prefeitura Municipal de Nova Friburgo (PMNF)**. 2014. Disponível em <<http://www.pmnf.rj.gov.br/>> com acesso em novembro de 2014.

SÁNCHEZ, Ollin C. S. *Economic Cost-Benefit Analysis of Decentralized Wastewater and Sanitation Technologies in the microbasin of Barracão dos Mendes, Brazil*. 2014. p.124. Tese (Mestrado em ciências ambientais). *Cologne University Of Applied Sciences*. Alemanha.

TUCCI, Carlos E. M. **Regionalização de vazões**. 2002. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade/UFRGS. 256 p.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. 1ª ed. 2 Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2007. 2ª reimpressão 2008. 588 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.7).

VON SPERLING, Marcos. **Introdução À Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 2005. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Mimas Gerais. p.452 (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; v.1).

