

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

# AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIBEIRÃO SOBRADINHO A PARTIR DA APLICAÇÃO DO MODELO QUAL-UFMG

**JESSICA SILVA PEREIRA**

**ORIENTADOR: RICARDO TEZINI MINOTI**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL 2 EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**BRASÍLIA/DF: Setembro/2024**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

# AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIBEIRÃO SOBRADINHO A PARTIR DA APLICAÇÃO DO MODELO QUAL-UFMG

**JESSICA SILVA PEREIRA**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

**APROVADA POR:**

_____

**Ricardo Tezini Minoti, DSc (UnB)**
**(ORIENTADOR)**

_____

**Raquel de Moraes Soares, DSc (UnB)**
**(EXAMINADORA INTERNA)**

_____

**Antônio José de Brito, Eng. (UnB)**
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 20 DE SETEMBRO DE 2024.**

# FICHA CATALOGRÁFICA


PEREIRA, JESSICA SILVA

Avaliação da qualidade da água do ribeirão Sobradinho a partir da aplicação do modelo QUAL-UFMG.

xiii, 96 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2024)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Qualidade da água
2. Modelo QUAL-UFMG
3. Enquadramento dos corpos hídricos
4. Ribeirão Sobradinho
5. Reúso Agrícola

I. ENC/FT/UnB
II. Título (série)


# REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

PEREIRA, J. S. (2024). *Avaliação da qualidade da água do ribeirão Sobradinho a partir da aplicação do modelo QUAL-UFMG.* Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 96p.

# CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Jessica Silva Pereira

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Avaliação da qualidade da água do ribeirão Sobradinho a partir da aplicação do modelo QUAL-UFMG.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2024


É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.


_____


Jessica Silva Pereira

jessica.sjpr@gmail.com

**AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradecer a Deus por todas as oportunidades concedidas. Em segundo lugar, agradeço à minha família, que é minha base, por todo apoio, compreensão e força. Sem eles, não teria conseguido chegar até aqui.

Minha mãe, Arleide, por sempre acreditar em mim e ser o maior exemplo de pessoa na minha vida. Meu pai, Jeffrey, por ser meu grande apoiador e por sempre me tirar as melhores risadas. E a minha irmã, Camylla, por sempre me escutar em todos os momentos e ser meu maior amparo nessa vida.

Agradeço aos meus amigos de longa data, que estiveram ao meu lado durante todo o processo, ouvindo minhas queixas e alegrias enquanto eu elaborava este trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Ricardo Minoti, por todo aprendizado durante toda minha graduação, que despertou a paixão pelo tema do meu projeto final. Agradeço também pela paciência, atenção, parceria e compreensão que tornaram a elaboração desse trabalho mais leve.

Agradeço às coordenadoras, Ariuska e Yovanka, que me ajudaram durante minha graduação, especialmente nos momentos de tribulação, oferecendo valiosos conselhos e apoio.

Agradeço a todos que fizeram parte da minha graduação, especialmente aos professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, cujo ensinamento foi fundamental para o meu crescimento profissional.

Agradeço a todos os amigos que fiz durante a graduação. A amizade deles tornou o período mais suportável, trazendo momentos de grandes risadas e companheirismo. Participar dos projetos de extensão, Atlética Enxurrada e Concreta Consultoria e Serviços foi, sem dúvida, uma das melhores vivências que tive na universidade. Também gostaria de mencionar o Projeto TEIA, que foi uma experiência enriquecedora e complementou as demais.

Também agradeço pelos estágios que passei na CAESB e na ADASA, que foram decisivos para meu desenvolvimento na área. Deixo aqui uma menção especial a Vinícius, Joelma e Leandro, com quem aprendi muito e tive a oportunidade de crescer significativamente.

Agradeço também à disponibilização dos dados pela CAESB e pela SAE - ADASA que tornou possível esse trabalho.

Por fim, agradeço a oportunidade de me graduar na UnB, uma das melhores universidades do Brasil, de forma gratuita.

**RESUMO**

A água é um bem comum a todos, e a necessidade de ter uma água de qualidade, conforme os padrões estabelecidos é de extrema importância para que seu uso seja garantido. Este trabalho tem como objeto de estudo a bacia hidrográfica do ribeirão Sobradinho, uma área de grande relevância ambiental e social para o Distrito Federal, que vem sofrendo significativamente com os impactos das atividades humanas, resultando em sua degradação. Além disso, existem conflitos entre a comunidade e o Poder Público devido ao enquadramento do corpo hídrico a às restrições de uso da água do Ribeirão Sobradinho. Logo, os objetivos deste trabalho são: avaliar a qualidade do ribeirão Sobradinho de 2013 a 2022, com dados de cinco pontos de monitoramento da Caesb ao longo do Ribeirão; analisar o impacto do uso e ocupação do solo na qualidade da água; e realizar simulação da autodepuração do Ribeirão com o uso do modelo matemático QUAL-UFMG para análise de cenários futuros previstos para a bacia, com o intuito de compreender os possíveis impactos que esses cenários poderão gerar. Os resultados obtidos demonstram que a qualidade da água do Ribeirão vem diminuindo ao longo dos 10 anos analisados, principalmente os valores dos parâmetros fósforo e Escherichia coli (*E.coli*) que vêem aumentando de forma expressiva. Os cenários avaliados indicam que o Ribeirão não tem capacidade de se manter na classe 3 com o aumento populacional, mesmo considerando a melhoria da eficiência da ETE Sobradinho, prevista pelo Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal. No entanto, com o reúso de água para agricultura e a implementação das melhorias na ETE, o Ribeirão poderá atingir a Classe 3, inclusive, mantendo alguns trechos em Classe 2. Isso demonstra a importância de uma regulamentação voltada para o reúso da água na agricultura e dos aprimoramentos nos serviços de saneamento no Distrito Federal para o atendimento a uma população em constante crescimento.

**PALAVRAS-CHAVE**: Qualidade da água; Modelo QUAL-UFMG; Enquadramento dos corpos hídricos; Ribeirão Sobradinho; Reúso Agrícola.

**ABSTRACT**

Water is a common resource for all, and the need for high-quality water, in accordance with established standards, is crucial to ensure its proper use. This study focuses on the Sobradinho Stream watershed, an area of great environmental and social significance in the Federal District of Brazil, which has been severely impacted by human activities, resulting in its degradation. Additionally, there are conflicts between the community and the public authorities regarding the classification of the water body and the restrictions on the use of water from the Sobradinho Stream. Therefore, the objectives of this study are: to evaluate the water quality of the Sobradinho Stream from 2013 to 2022, using data from five monitoring points provided by Caesb (the local water utility) along the stream; to analyze the impact of land use and occupation on water quality; and to simulate the self-purification of the stream using the QUAL-UFMG mathematical model to assess future scenarios for the basin, aiming to understand the potential impacts these scenarios may cause. The results obtained show that the water quality of the stream has been declining over the ten years analyzed, especially in the phosphorus and Escherichia coli (E. coli) parameters, which have been increasing significantly. The evaluated scenarios indicate that the stream does not have the capacity to remain in Class 3 with the population growth, even considering the improvements in the efficiency of the Sobradinho Wastewater Treatment Plant (WWTP), as foreseen in the Federal District Basic Sanitation Plan. However, with the reuse of water for agriculture and the implementation of improvements in the WWTP, the stream may maintain its classification in Class 3, and even some stretches may reach Class 2. This demonstrates the importance of regulation focused on water reuse in agriculture and improvements in sanitation services in the Federal District, in order to serve a constantly growing population.

**KEYWORDS:** Water Quality; QUAL-UFMG Model; Classification of water bodies; Sobradinho Stream; Agriculture reuse.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO ..... 15
2. OBJETIVOS ..... 18
2.1 OBJETIVO GERAL ..... 18
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO ..... 18
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 19
3.1. PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL ..... 19
3.1.1. Enquadramentos dos Recursos Hídricos ..... 25
3.2 AUTODEPURAÇÃO ..... 28
3.3 BACIA HIDROGRÁFICA ..... 32
3.3.1 Bacia do Ribeirão Sobradinho ..... 35
3.4 REÚSO DE ÁGUA NA AGRICULTURA ..... 38
3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA A QUALIDADE DA ÁGUA ..... 40
3.5.1 Modelo -QUAL UFMG ..... 42
4. MATERIAL E MÉTODOS ..... 49
4.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS ..... 49
4.1.2 Banco de dados ..... 49
4.2 METODOLOGIA ..... 51
4.2.1 Caracterização da área de estudo ..... 52
4.2.1.1 Descrição Geral ..... 52
4.2.1.2 Clima ..... 54
4.2.1.2 Hipsometria ..... 56
4.2.1.4 Relevo ..... 56
4.2.1.5 Pedologia ..... 57
4.2.1.6 Geologia ..... 59
4.2.1.7 Hidrogeologia ..... 59
4.2.2 Análise da qualidade da água do ribeirão Sobradinho entre 2013 e 2022 ..... 61
4.2.3 Mapeamento do uso e ocupação do solo ..... 62
4.2.4 Modelagem da qualidade da água pela aplicação do modelo QUAL-UFMG 63
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO ..... 70
5.1 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA ..... 70

5.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA QUALIDADE DA ÁGUA ..... 75
5.3 AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS PREVISTOS ATÉ 2040 PARA O RIBEIRÃO SOBRADINHO ..... 78
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES ..... 86
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 88
APÊNDICE A – GRÁFICOS COM AS VARIAÇÕES ANUAIS E MENSAIS DOS DADOS DE VAZÃO DA ESTAÇÃO 60474100 ..... 95
APÊNDICE B - SÍNTESE DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA QUALIDADE DO RIBEIRÃO SOBRADINHO NO PONTO 010 (DADOS DE ENTRADA DO QUAL-UFMG) ..... 96
ÂPENDICE C - SÍNTESE DOS DADOS DO EFLUENTE FINAL DA ETE SOBRADINHO ..... 96

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 3. 1- Matriz institucional dos integrantes do SINGREH. 20
Figura 3. 2 - Mapa da Divisão Hidrográfica Nacional.. 21
Figura 3. 3 - Instrumentos da PNRH. 22
Figura 3. 4 – Escala dos Planos de Recursos Hídricos. 24
Figura 3. 5 - Etapas do processo de enquadramento. 25
Figura 3. 6 - Classes de enquadramento dos corpos de águas doces e usos. 26
Figura 3. 7 - Requisitos de qualidade da água em função das classes e usos da água. 27
Figura 3. 8 - Enquadramento dos recursos hídricos do Distrito Federal 28
Figura 3. 9 - Representação de poluição pontual e difusa. 30
Figura 3. 10 - Balanço do oxigênio dissolvido. 31
Figura 3. 11 - Zonas do processo de autodepuração. 32
Figura 3. 12 - Exemplificação de uma bacia hidrográfica. 33
Figura 3. 13 - Ciclo Hidrológico Terrestre. 34
Figura 3. 14 - Impacto da urbanização no ciclo hidrológico. 34
Figura 3. 15 - Localização da bacia do ribeirão Sobradinho. 35
Figura 3. 16 - (a) Vista do Ribeirão Sobradinho; (b) Ponto de lançamento de esgoto tratado no Ribeirão 36
Figura 3. 17 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento de um modelo matemático. 41
Figura 3. 18- Esquema dos parâmetros simulados pelo modelo QUAL-UFMG.. 45

Figura 4. 1 - Fluxograma das etapas metodológicas do desenvolvimento do trabalho. 52
Figura 4. 2 - Mapa de Localização e Hidrografia da bacia do Ribeirão Sobradinho. 53
Figura 4. 3 - Mapa de Pontos de Interesse e Monitoramento da bacia do Ribeirão Sobradinho. 54
Figura 4. 4 - Gráfico da precipitação mensal da estação 1547015. 55
Figura 4. 5 - Gráfico da precipitação anual da estação 1547015. 55
Figura 4. 6 - Mapa Hipsométrico da bacia do Ribeirão Sobradinho. 56
Figura 4. 7 - Mapa de Declividade da bacia do Ribeirão Sobradinho. 57
Figura 4. 8 - Mapa de Pedologia da bacia do Ribeirão Sobradinho. 58
Figura 4. 9 - Mapa de Geologia da bacia do Ribeirão Sobradinho. 59

Figura 4. 10 - Mapa de Hidrogeologia da bacia do Ribeirão Sobradinho. ..... 60
Figura 4. 11 - Gráfico do total de amostras por ano. ..... 61
Figura 4. 12 - Diagrama Unifilar do percurso simulado do ribeirão Sobradinho contendo os dados relacionados às condições de contorno para a aplicação do modelo QUAL-UFMG. ..... 64
Figura 4. 13 - (a) Gráfico da correlação da velocidade em função da vazão; (b) Gráfico da correlação da profundidade em função da vazão. ..... 65

Figura 5. 1 - Gráfico de amostras conformes e não conformes de acordo com o parâmetro. ..... 70
Figura 5. 2 – Análise dos dados de qualidade da água do ribeirão Sobradinho (DF) ao longo de 2013 a 2022. ..... 72
Figura 5. 3 - Análise dos dados de qualidade da água de cinco estações ao longo do ribeirão Sobradinho (DF) ao longo de 2013 a 2022 . ..... 74
Figura 5. 4 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeiro Sobradinho no ano de 2024. ..... 75
Figura 5. 5 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Sobradinho em 2019.. ..... 76
Figura 5. 6 - Gráfico com os valores de turbidez em cada ponto de monitoramento ao longo do ribeirão Sobradinho.. ..... 77
Figura 5. 7 - Concentrações da DBO no ribeirão Sobradinho após a calibração do modelo QUAL-UFMG com curvas da DBO do modelo e DBO medida (Dados medidos pela Caesb). ..... 79
Figura 5. 8 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **1° Cenário**. ..... 81
Figura 5. 9 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **2° Cenário**. ..... 82
Figura 5. 10 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **3° Cenário**. ..... 83
Figura 5. 11 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **4° Cenário**. ..... 84

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 3. 1: Tabela com os tipos de reúso. Fonte: Adaptado de Kubler, 2015. ..... 39
Tabela 3. 2 - Modelos matemáticos de qualidade da água e suas características. Fonte: Adaptado de Fleck *et al*, 2013. ..... 42
Tabela 3. 3 - Características do reator fluxo pistão idealizado em condições estacionárias. Fonte: Von Sperling, 2014. ..... 43
Tabela 3. 4 - Tabela com valores típicos de k1, kd e ks para diferentes tipos de poluentes (base e, 20ºC). Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2017. ..... 46
Tabela 3. 5 – Valores típicos de K2 (base e, 20ºC). Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2017. ..... 47
Tabela 3. 6 - Síntese dos parâmetros analisados no QUAL-UFMG e sua importância Fonte: Adaptado de ANA, 2024 ..... 48

Tabela 4. 1 - Dados do corpo hídrico utilizados na avaliação da qualidade da água e na modelagem com o QUAL-UFMG. ..... 49
Tabela 4. 2 - Dados do efluente final da ETE Sobradinho utilizados na modelagem com o QUAL-UFMG. ..... 50
Tabela 4. 3 - Dados usados para a caracterização da área de estudo. ..... 51
Tabela 4. 4 - Resumo das características dos tipos de aquíferos na bacia do Ribeirão Sobradinho. Fonte: Adaptado de SGB. ..... 60
Tabela 4. 5 - Dados de entrada para a qualidade da água do ribeirão Sobradinho. ..... 63
Tabela 4. 6 - Valores dos coeficientes aplicados para a melhor calibração do modelo. ..... 66
Tabela 4. 7 - Resumo dos cenários simulados. ..... 66
Tabela 4. 8 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção no período de junho a agosto de 2022 e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas. Fonte: Adaptado de ADASA. ..... 67
Tabela 4. 9 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção referente ao PDSB e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas. Fonte: Adaptado de ADASA. ..... 68

Tabela 4. 10 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção no período de junho a agosto de 2022 e a vazão resultante ao desvio do efluente tratado. Fonte: Adaptado de ADASA. ..... 68
Tabela 4. 11 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção referente ao PDSB e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas com o desvio do efluente tratado. Fonte: Adaptado de ADASA. ..... 69

## LISTA DE ABREVIAÇÕES, NOMENCLATURA E SÍMBOLOS

ADASA - Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal

ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal

CERHs - Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

CRH – Conselho Recursos Hídricos

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DF - Distrito Federal

DQO - Demanda Química de Oxigênio

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MDR - Ministério do Desenvolvimento Regional

MMA - Ministério do Meio Ambiente

nº - Número

OD - Oxigênio dissolvido

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

PDSB - Plano Distrital de Saneamento Básico do DF

PGIRH - Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

PNUD Brasil - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento Brasil

SEMA - Secretaria do Meio Ambiente

SGB – Serviço Geológico do Brasil

SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNIRH - Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos

SRHU - Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano

UF - Unidade Federativa

VMP - Valor máximo permitido

# 1. INTRODUÇÃO

A conservação e o uso sustentável dos recursos hídricos são temas amplamente discutidos na atualidade, uma vez que a vida humana está integralmente vinculada à água, seja do ponto de vista ambiental, social ou econômico. Segundo a declaração do Ministério Público no 8º Fórum Mundial da Água (MPF,2018) e a ONU (2010), a água é um direito humano reconhecido. Além disso, é relevante ressaltar que é essencial que essa água esteja em conformidade com padrões de qualidade para possibilitar seu uso.

Entretanto, observa-se diariamente que ações antrópicas estão provocando consequências negativas para os ambientes aquáticos. Dessa forma, torna-se essencial a implementação de ferramentas que assegurem a qualidade da água e a preservação desses ambientes.

Ademais, em 2020 foi sancionada a Lei Federal nº 14.026 conhecida como o "Novo Marco Regulatório do Saneamento", que atualizou o Marco Legal do Saneamento Básico (Lei Federal n° 11.445/2007) e busca a universalização do saneamento básico em todo o território brasileiro. O Novo Marco regulatório do Saneamento no art. 11B contido no art. 7º, destaca a meta para universalização de 99% de atendimento referente ao abastecimento de água potável e de 90% para coleta e tratamento de esgotos até o ano de 2033.

Segundo o SNIS (2023), em seu último relatório publicado referente ao ano de 2022, no Brasil cerca de 52% do esgoto gerado é tratado, e 81% do esgoto coletado é tratado. Isso demonstra a importância do tratamento adequado das águas residuais para evitar a poluição dos corpos d'água.

A preocupação com a preservação da qualidade dos corpos hídricos é mundial. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável é um plano global estabelecido pela ONU em assembleia geral no ano de 2015 e adotado por 193 países, incluindo o Brasil. Esse plano inclui 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), entre os quais o ODS 6, intitulado "Água Potável e Saneamento". Segundo o PNUD Brasil, uma das metas do ODS 6 é, até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, principalmente a advinda de águas residuais.

Logo, uma boa gestão dos recursos hídricos é a peça-chave para garantir o desenvolvimento sustentável, que é capaz de atender às necessidades da geração atual sem prejudicar a capacidade das futuras gerações de satisfazerem as suas necessidades (Brundtland, 1987). Assim, para que a conservação das águas ocorra de maneira efetiva e eficiente devem ser observadas as legislações vigentes.

No Brasil foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) introduzida com a Lei Federal nº 9.433, de 8 janeiro de 1997, que tem como finalidade estabelecer os procedimentos e diretrizes da gestão dos recursos hídricos e os instrumentos atrelados a essa gestão. Com a PNRH foi criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos – SINGREH –, estrutura brasileira mediante a qual se faz a gestão e garante que os recursos hídricos sejam usados e manejados com responsabilidade.

A PNRH estabeleceu a bacia hidrográfica como a unidade territorial para gestão dos recursos hídricos. Dessa forma, os planos de recursos hídricos são elaborados por bacia hidrográfica e por estado. Segundo TUCCI (2001), o termo bacia hidrográfica refere-se a "*uma área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório*". Isso destaca a importância dessa divisão para uma gestão eficiente das águas dentro de um território.

O Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), um dos órgãos integrantes do SINGREH, na Resolução 32, de 15 de outubro de 2003, definiu regiões hidrográficas como "*o espaço territorial brasileiro compreendido por uma bacia, grupo de bacias ou sub-bacias hidrográficas contíguas com características naturais, sociais e econômicas homogêneas ou similares, com vistas a orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos*". A resolução também define unidades hidrográficas como bacias e inter-bacias hidrográficas a partir da subdivisão das regiões hidrográficas. Portanto, toda gestão é focada em unidades hidrográficas menores, ou subunidades, facilitando ações centralizadas nas necessidades específicas de cada bacia e/ou unidade hidrográfica.

O Ribeirão Sobradinho é uma das 40 unidades hidrográficas do Distrito Federal, sendo um dos afluentes do Rio São Bartolomeu, que, por sua vez, é afluente da Bacia do Rio Paranaíba, inserida na região hidrográfica do Rio Paraná. A área passa por um grande parcelamento no uso do solo com a criação de novos condomínios e recebe poluição pontual advinda do efluente tratado pela Estação de Tratamento de Esgoto de Sobradinho (ETE Sobradinho), gerenciada pela Companhia de Saneamento Básico do Distrito Federal (CAESB), além de sofrer com poluição difusa relacionada a esgotos não tratados, efluentes de áreas de mineração, agricultura e áreas urbanas. (GDF, 2012)

O ribeirão Sobradinho tem um histórico de uso pela população para balneabilidade e atividades recreativas devido à existência de cachoeiras ao longo de seu percurso, o que, atualmente, gera conflitos entre a população e o poder público, devido à degradação da qualidade da água pelo Ribeirão ter sido escolhido como corpo receptor de efluentes

tratados. Devido às cargas poluidoras, o Ribeirão não é adequado para a recreação de contato primário, no entanto, ainda é comum ver pessoas se banhando nele (BARBOSA et al, 2021).

Devido a isso, mostra-se a importância de estudos que investiguem o impacto das cargas poluidoras que chegam ao Ribeirão Sobradinho, ao longo de seu percurso, além de identificar medidas que possam ser utilizadas para mitigá-las, garantindo, assim, a qualidade da água e evitando riscos à saúde humana e à biota do rio. O entendimento e a compreensão dos processos que ocorrem na bacia são fundamentais para que ações assertivas sejam tomadas diante dessa problemática, pois, ao receber cargas poluidoras, um corpo d'água precisa de tempo para se restabelecer e recuperar sua qualidade original.

Logo, saber o processo de como um rio se recupera ao ser exposto a cargas poluidoras é essencial para ajudar em tomadas de decisões em relação a um curso d'água. Diversas ferramentas são usadas para simulação desse processo, uma delas é o modelo matemático QUAL-UFMG que foi desenvolvido por Von Sperling a partir da adaptação do modelo QUAL2E criado pela *US Environmental Protection Agency* (USEPA) bastante usado mundialmente para a simulação da qualidade da água de rios.

Como discutido por Von Sperling (2014), a modelagem matemática é usada em diversos ramos para representar situações reais a partir de uma estrutura teórica embasada em equações matemáticas regidas por representações físicas do sistema a ser modelado, podendo ser usada para previsão de condições futuras, pesquisas, gerenciamento e planejamento daquele recurso hídrico destacando a importância do uso de ferramentas como o QUAL-UFMG.

Exposto isso, o presente trabalho tem como finalidade avaliar a qualidade do ribeirão Sobradinho diante os problemas enfrentados pelo corpo hídrico e prever cenários futuros, baseados no Plano Distrital de Saneamento Básico (PDSB) e nas classes de enquadramento, a partir de modelagem matemática com o emprego do modelo QUAL-UFMG.

# 2. OBJETIVOS

## 2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a qualidade da água e o atendimento ao enquadramento do Ribeirão Sobradinho (DF) a partir de modelagem matemática.

## 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Analisar a qualidade da água do Ribeirão Sobradinho com base em dados secundários de parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados em 5 estações ao longo de 10 anos (2013-2022).
- Avaliar as alterações no uso e na ocupação do solo da unidade hidrográfica do Ribeirão Sobradinho para compreender seu impacto na qualidade das águas superficiais.
- Analisar as perspectivas de qualidade de água do Ribeirão Sobradinho a partir de cenários propostos até 2040, segundo o PDSB e o enquadramento, com o uso do modelo QUAL-UFMG.

# 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como fim reunir conhecimentos já estabelecidos e temas importantes e oportunos, construindo assim a fundamentação teórica acerca de assuntos que estão totalmente atrelados ao pleno entendimento e desenvolvimento deste trabalho.

## 3.1. PLANEJAMENTO E GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NO BRASIL

A água é um recurso inestimável para a manutenção da vida humana, sabe-se que o Brasil detém cerca de 12% da água doce do mundo isso mostra o quanto é importante que se tenha um controle e gestão eficaz desse recurso para que todos possam ter acesso ao mesmo.

Existem diversas problemáticas que impactam diretamente no planejamento e gestão dos recursos hídricos, o aumento populacional, urbanização, o aumento da agricultura, a redução da capacidade natural da retenção de poluentes e até o aumento da temperatura no planeta Terra são variáveis que influenciam nos usos dos recursos hídricos (BICUDO *et al*, 2010).

No Brasil, a legislação voltada para os recursos hídricos teve seu primeiro marco com o Código de Águas, decreto n° 24.643, de 10 julho de 1934, que veio como uma mudança em relação aos usos da água e sua propriedade estabelecendo bases para a gestão e controle dos recursos hídricos. O código trouxe maiores ações voltadas ao setor de energia, mesmo assim, caracterizou-se um momento inicial de criação de uma base para um sistema de gerenciamento recursos hídricos no Brasil.

Na constituição de 1998, o artigo 21 inciso XIX, diz "*instituir sistema nacional de gerenciamento de recursos hídricos e definir critérios de outorga de direitos de seu uso...*". A partir disso, estabeleceu-se o marco que levaria à instituição, nos anos seguintes, da Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH).

A Lei federal nº 9.433, de 9 de Janeiro de 1997, instaurou então a PNRH tendo como fundamentos que "a água é um bem de domínio público, um recurso natural limitado e dotado de valor econômico. E em momentos de escassez deve ser prioridade o uso de recursos hídricos para consumo humano e dessedentação de animais além da garantia do uso múltiplo das águas. A bacia hidrográfica é a unidade de implementação da PNRH e por fim, a gestão deve contemplar participação descentralizada do Poder Público, dos usuários e das comunidades" (BRASIL, 1997).

Um dos objetivos da PNRH é "assegurar que futuras gerações tenham disponível água de qualidade de acordo com os respectivos usos". Por conta disso, a gestão deve ser

integrada pois toda a sociedade tem um papel relevante para garantir o uso responsável da água.

A PNRH tem mais dois objetivos sendo eles: “a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável; e a prevenção e defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais” (BRASIL, 1997).

Ademais, a PNRH criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, o SINGREH, que é estruturado por diversos grupos que têm como foco o debate e deliberações acerca da gestão dos recursos hídricos brasileiros, ou seja, são órgãos que tem como responsabilidade implementar a PNRH.

A atuação desses órgãos ocorre de acordo com a esfera do domínio do recurso hídrico, podendo ser federal ou estadual (Figura 3. 1). O SINGREH é composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), pela Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU) vinculada ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), pelos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos (CERHs), pelos órgãos gestores estaduais de recursos hídricos, pelos comitês de bacia hidrográfica (interestaduais e estaduais) e pelas agências de água (vinculadas aos comitês). (BRASIL,2021)

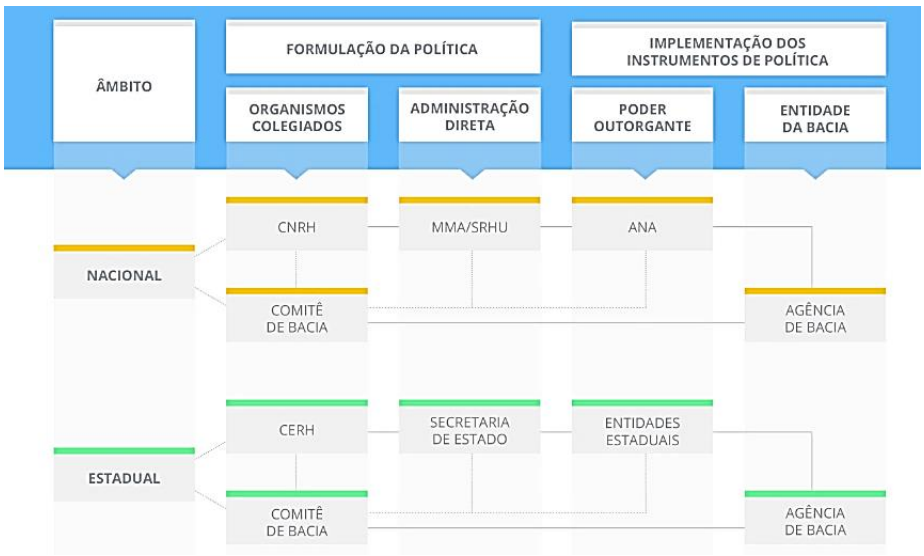



Figura 3. 1- Matriz institucional dos integrantes do SINGREH.
CNRH: Conselho Nacional de Recursos Hídricos; CERH: Conselho Estadual de Recursos Hídricos; MMA: Ministério do Meio Ambiente; SRHU: Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano; ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.
Fonte: ANA, 2017.

A Lei 9.984 de 17 de julho de 2000 sancionou a criação da ANA tendo como uma das suas maiores atribuições garantir a implementação da PNRH. No ano de 2020 com o

novo marco do saneamento básico, a autarquia recebeu mais uma responsabilidade de elaborar normas referentes ao saneamento básico e teve seu nome mudado de “Agência Nacional das Águas” para “Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico”.

Instituídas pelo CNRH, o Brasil possui atualmente doze regiões hidrográficas (Figura 3. 2). E essa divisão foi realizada para facilitar e orientar o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos em todo o país. Dentro dessa divisão, existem subdivisões de bacias e sub-bacias em cada estado, para que o gerenciamento local possa ser melhor realizado pelos seus colegiados e entidades de caráter estadual.




Figura 3. 2 - Mapa da Divisão Hidrográfica Nacional.

Fonte: CNRH, 2003.

Os instrumentos da PNRH (Figura 3. 3), de acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, têm como propósito estabelecer mecanismos e organização através de ações de planejamento, regulação, fiscalização e divulgação das informações facilitando assim a gestão dos recursos hídricos. Existe uma inter-relação entre eles e até uma dependência, pois um só pode ser exercido com a ajuda de outro (ANA,2021).

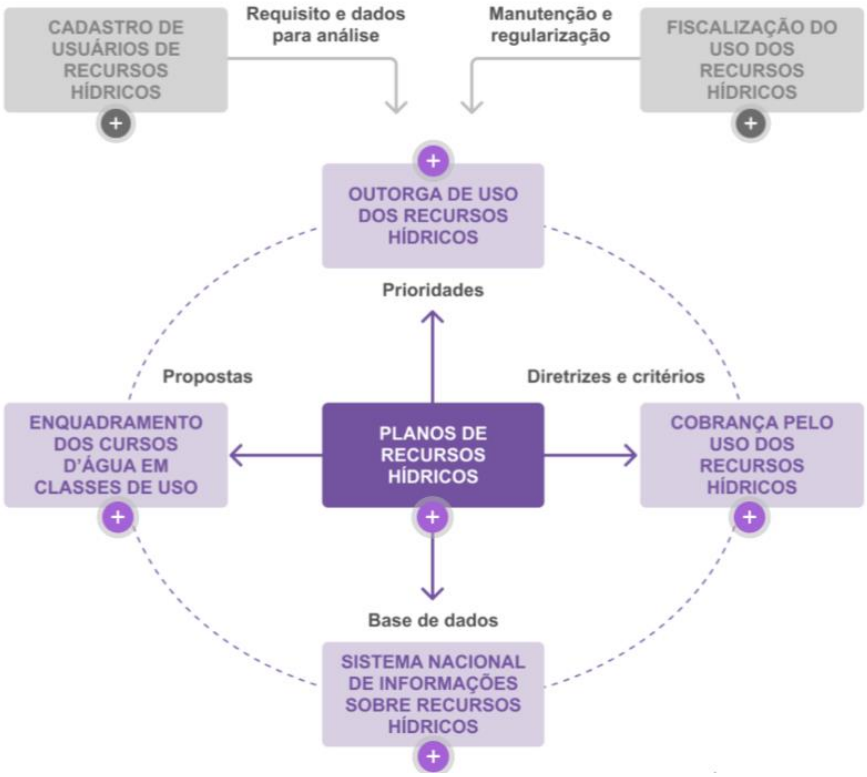



Figura 3. 3 - Instrumentos da PNRH.

Fonte: ANA, 2021.

Os instrumentos são definidos da seguinte maneira, de acordo com a Lei que os regem e com a ANA (2021):

- Planos de Recursos Hídricos (PRH): São planos diretores que visam a fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos. São planos de longo prazo, com horizonte de planejamento compatível com o período de implantação de seus programas e projetos. Trazem informações sobre o diagnostico atual dos recursos hídricos e demais informações que são imprescindíveis para uma boa gestão dos recursos hídricos. Só no ano de 2021, segundo a ANA, o Brasil possuía 26 Planos Estaduais de Recursos Hídricos (PERH), 12 Planos de Recursos Hídricos de Bacias Interestaduais (PIRH) e 169 PRHs de bacias estaduais.
- Sistema de informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH): é um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão. O mesmo deve ser acessível estruturado e estar sempre atualizado para que toda a sociedade possa ter acesso às informações contidas nele.

- Enquadramento: enquadra os corpos de águas em classes, segundo os usos preponderantes da água visando assim assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes.
- Outorga de direito de uso dos recursos hídricos: tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. Em observância a Resolução CNRH nº 16/2001, cada UF e União possuem a autonomia de definir os critérios para emissão da outorga de direito de uso das águas sob seu domínio.
- Cobrança pelo uso de recursos hídricos: tem como objetivo reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor, incentivar a racionalização do uso da água, obter recursos monetários para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

Com a Resolução CNRH n° 58/2006, foi aprovado o primeiro Plano Nacional de Recursos Hídricos que tem a ANA como papel central na sua implementação e a Resolução CNRH nº 145 de 2012 estabeleceu as diretrizes e demais informações para elaboração de um plano de bacia. No ano de 2020 começaram os debates para elaboração de um novo plano. Além de que durante o ano de 2021, o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) realizou diversas consultas públicas, seminários e oficinas para a discussão da elaboração do novo plano em 2022. Como resultado, o novo Plano Nacional para o período de 2022 a 2040 foi aprovado (ANA,2021).

Segundo o Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos de 2021, elaborado pela ANA, o Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040 é um instrumento essencial de gestão, cuja implementação garantirá o cumprimento dos objetivos estabelecidos no Plano Nacional. O novo Plano é dividido em dois volumes, primeiramente o Diagnóstico e Prognóstico dos recursos hídricos, representado pelo Relatório Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021, e o segundo, composto pelo Plano de Ações e Anexo Normativo. O primeiro volume, diagnóstico e Prognóstico dos Recursos Hídricos, nos traz informações sobre as principais pressões e temas relevantes em escala nacional, como a disponibilidade hídrica, qualidade da água, usos da água, gestão, mudanças climáticas e cenários de demandas e balanço hídrico (ANA,2021).

Já o segundo volume, Plano de Ações e Anexo Normativo, subsidiado por todas as informações agrupadas do primeiro volume, visa a eficaz implementação da PNRH e o aprimoramento da atuação dos entes do SINGREH. Esse volume é constituído por 5 programas e 23 subprogramas, sendo os 5 programas: 1) Fortalecimento do Sistema Nacional de Gerenciamento dos Recursos Hídricos; 2) Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos; 3) Gestão da Qualidade e da Quantidade dos Recursos Hídricos; 4) Integração da Política Nacional de Recursos Hídricos com Políticas e Planos Setoriais; e 5) Gerenciamento do PNRH 2022-2040 (ANA,2021). Na Figura 3. 4, é mostrado como se configura a escala dos planos de recurso hídricos.

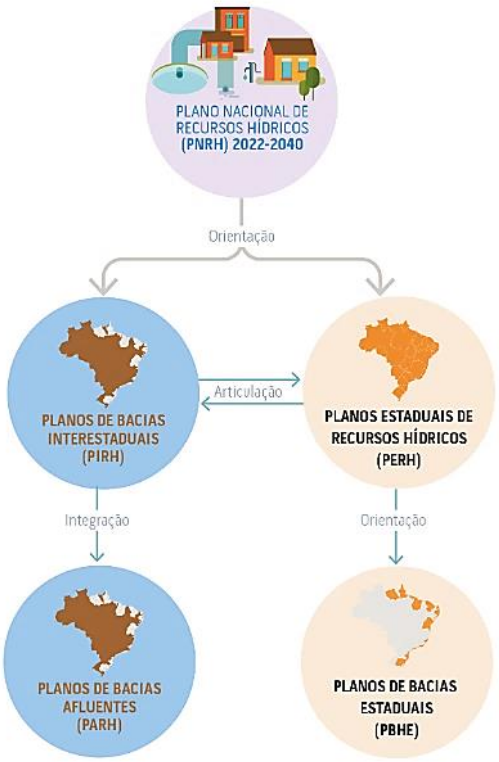



Figura 3. 4 – Escala dos Planos de Recursos Hídricos.

Fonte: ANA, 2021.

No Distrito Federal, os órgãos gestores dos recursos hídricos são Secretaria do Meio Ambiente (SEMA), Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA) e o Instituto do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos do Distrito Federal (Brasília Ambiental – IBRAM). Fazem parte da estrutura do SINGREH e cada um possui suas respectivas competências e agem conjuntamente de forma sinérgica.

### 3.1.1. Enquadramentos dos Recursos Hídricos

Como já destacado, o enquadramento dos recursos hídricos é um dos instrumentos de gestão da PNRH. O enquadramento ocorre através da definição das classes de qualidade, as diretrizes ambientais e as condições e padrões de lançamento de efluentes de acordo com as resoluções CONAMA nº 357 de 2005, nº 396 de 2008 e n° 91 de 2008. Destaca-se que o enquadramento leva em consideração a realidade da bacia tanto de usos atuais quanto de usos futuros para que as necessidades dos usuários possam ser atendidas (BRASIL,2005).

A resolução CONAMA nº 430 de 2011, veio como um complemento da resolução nº 357/2005, pois ela trouxe novas condições, parâmetros, padrões diretrizes para a gestão dos lançamentos de efluentes em corpos de águas receptores, com destaque ao lançamento de esgotos. As resoluções CONAMA citadas até agora, todas possuem em suas competências condições e padrões de qualidade das águas, os valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos para cada tipo de parâmetro sendo ele físico, químico e biológico (BRASIL, 2011).

A definição das classes e enquadramento dos recursos hídricos é feito através de propostas realizadas pelos comitês de bacia, que fazem parte do SINGREH. Para a proposta seja aprovada é necessário a aprovação final do CNRH, de acordo com o domínio do recurso hídrico (Resolução do CNRH nº 91, 2008). Na Figura 3. 5 é demonstrado um fluxograma simples das etapas de um diagnóstico para o enquadramento de um curso d'água.

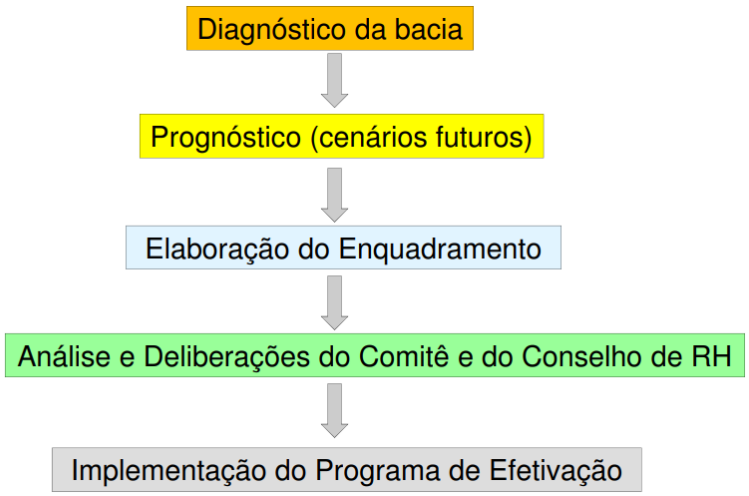



Figura 3. 5 - Etapas do processo de enquadramento.

Fonte: ANA, 2009.

Para que seja garantido o uso múltiplo das águas, as separações em classes definem os requisitos de qualidade da água, o enquadramento e os seus usos (CONAMA, nº 357/2005). Os usos da água podem ser diversos, como preservação das comunidades aquáticas, abastecimento humano, recreação, navegação, irrigação, produção de energia, entre outros. Diante disso quanto mais restritivo for o uso melhor deve ser a qualidade daquela água, logo, quanto maior a classe menor é a demanda da qualidade dela. Nas Figuras Figura 3. 6 e Figura 3. 7 é mostrado as classes de enquadramento, usos e qualidade da água.

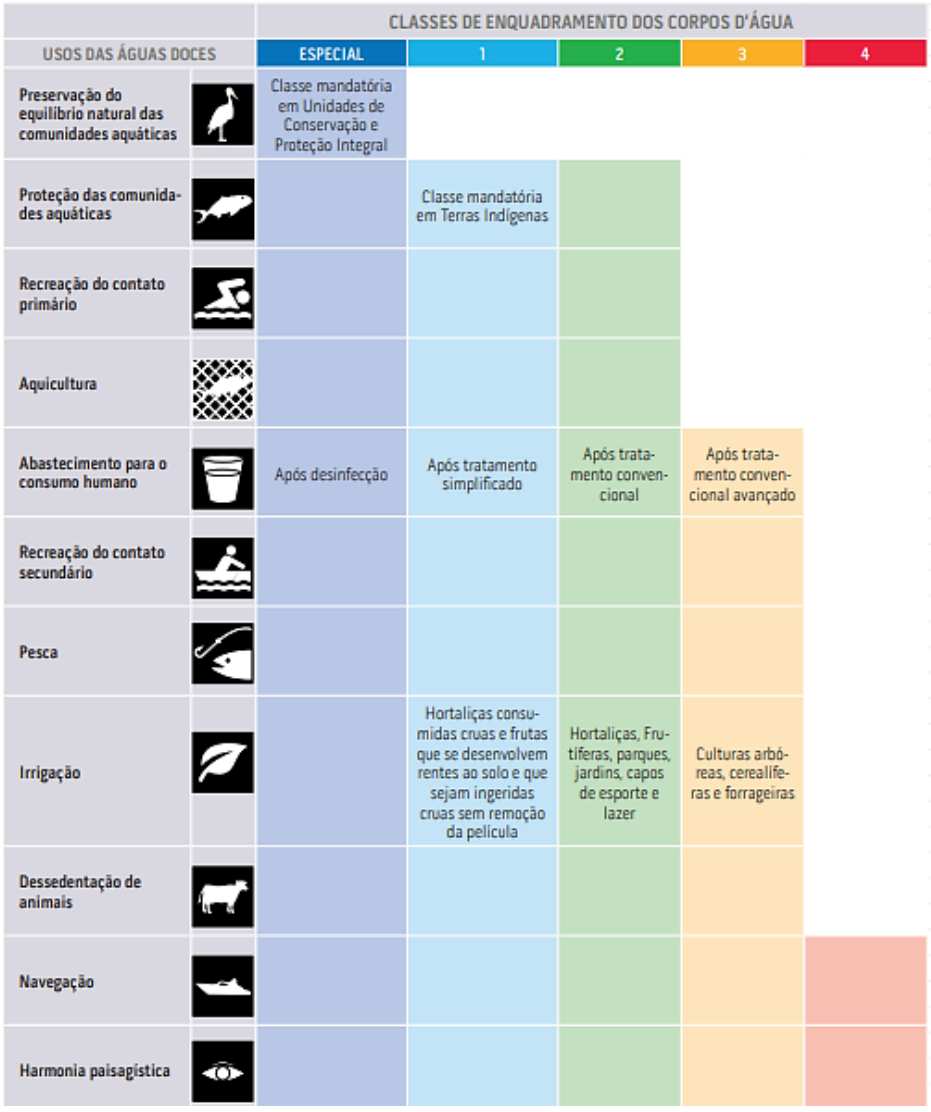



Figura 3. 6 - Classes de enquadramento dos corpos de águas doces e usos.

Fonte: ANA,2019.




Figura 3. 7 - Requisitos de qualidade da água em função das classes e usos da água.

Fonte: ANA,2019.

No Distrito Federal, a Lei nº 2.725 de 2001, institui a Política de Recursos Hídricos tendo como um de seus instrumentos o Plano de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos do Distrito Federal (PGIRH/DF) com prazos e planos de ação de acordo com o período de implantação. O PGIRH/DF de 2012, apresenta proposta de enquadramento das águas superficiais do Distrito Federal (Figura 3. 8). Essa proposta, dividida por bacias hidrográficas, envolveu diversos órgãos como CRH-DF, ADASA (órgão responsável pela elaboração do plano), CAESB e comitês de bacia, sendo aprovada em unanimidade pelo CRH-DF (ADASA,2012). Destaca-se que, em 2020, o Plano de Recursos Hídricos das bacias hidrográficas dos afluentes distritais do rio Paranaíba (PRH Paranaíba – DF), elaborado em 2019, foi aprovado pelo Comitê de Bacia do Paranaíba-DF e pelo CRH-DF.

E em 2014, o Conselho de Recursos Hídricos do DF (CRH-DF) homologou a 2ª Resolução do CRH-DF na qual aprovou o enquadramento dos corpos de água superficiais do Distrito Federal em classes e estipulou 2030 como o ano prazo para efetivação do enquadramento.

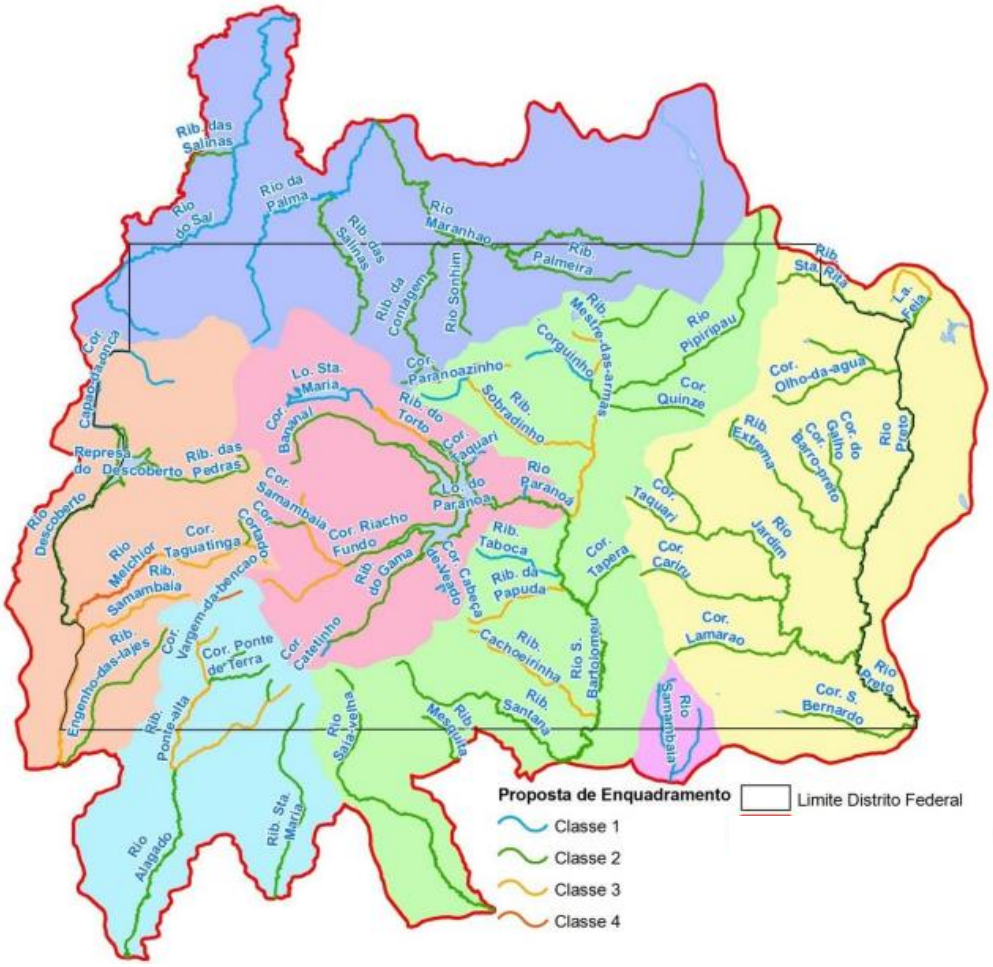



Figura 3. 8 - Enquadramento dos recursos hídricos do Distrito Federal
Em azul escuro: bacia do Maranhão; em laranja: bacia do Descoberto; em azul claro: bacia do Corumbá; em rosa: bacia do Paranoá; em verde: bacia do São Bartolomeu; em amarelo: bacia do Preto; e em roxo: bacia do São Marcos.
Fonte: PGIRH/DF,2012.

O enquadramento é um grandioso instrumento para gestão e planejamento dos recursos hídricos pois para a sua implementação são levados em consideração aspectos sociais, econômicos, políticos e técnicos. Tudo isso para evitar que cargas poluidoras superiores que à capacidade de suporte dos cursos d'agua afetem sua qualidade e, consequentemente, seus usos, o que pode gerar gastos não planejados e trazer prejuízos diversos para toda a sociedade. No entanto, é importante lembrar que os instrumentos do PNRH somente se tornam efetivos quando trabalhados em conjunto (ANA, 2009).

## 3.2 AUTODEPURAÇÃO

Com o passar dos anos, as ações antrópicas vêm trazendo impactos altos na qualidade da água dos corpos hídricos. Desde o crescimento populacional até a efluentes que alcançam

os corpos d'água, isso gera um nível de degradação que o curso d'água não consegue se recuperar sozinho. Logo, são necessárias medidas de mitigação para que a autodepuração do recurso hídrico aconteça (BRAGA,2005).

Pode-se conceituar que autodepuração é a capacidade do corpo d'agua se recuperar e estabelecer seu equilíbrio ecológico após ser exposto a diversas cargas poluidoras. Segundo Von Sperling (1996), "*a autodepuração pode ser entendida como um fenômeno de sucessão ecológica, em que o restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, ou seja, a busca pelo estágio inicial encontrado antes do lançamento de efluentes, é realizada por mecanismos essencialmente naturais*".

O conhecimento acerca da autodepuração de um curso d'água é essencial para o controle da qualidade, pois isso ajuda a entender o grau de poluição que aquele corpo hídrico consegue suportar. Esse entendimento é base para ajudar na definição dos usos do recurso hídrico e estabelecer os padrões de lançamento de efluentes de ETES.

O tipo de fonte de poluição mais significativa no Brasil ainda é a proveniente de esgotos domésticos. No entanto, dependendo do tipo de uso e ocupação do solo, essas fontes de poluição podem variar, incluindo, além dos efluentes domésticos, efluentes industriais, escoamento superficial urbano e agrícola. Cada uma dessas fontes possui características distintas em relação aos tipos de poluentes que carreiam. Por exemplo, os esgotos contêm matéria orgânica biodegradável, nutrientes e patogênicos; os efluentes industriais, sólidos em suspensão e metais; o escoamento superficial urbano, sólidos em suspensão, matéria orgânica biodegradável, nutrientes e patogênicos; e, por fim, o escoamento superficial agrícola, que inclui matéria orgânica não biodegradável, como pesticidas e agrotóxicos, sólidos em suspensão e nutrientes. (Von Sperling, 1996)

Esses poluentes podem provocar impactos na água como (BRASIL, 2006):

- "matéria orgânica biodegradável (esgotos, por exemplo), provocando consumo de oxigênio, mortandade de peixes etc.;
- sólidos em suspensão, acarretando problemas estéticos (maior turbidez), depósitos de lodo, proteção a organismos patogênicos, adsorção de poluentes (estes ficam ade ridos à superfície dos sólidos suspensos);
- nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, conduzindo ao crescimento excessivo de plantas, cuja posterior decomposição irá prejudicar o balanço de oxigênio do corpo d'água;

- patogênicos, provocando o surgimento de diversas enfermidades de veiculação hídrica;
- matéria orgânica não biodegradável (pesticidas, detergentes), levando à ocorrência de maus odores e de condições tóxicas;
- metais pesados, também produzindo toxicidade e prejudicando o desenvolvimento da vida aquática."

A poluição que alcança um corpo hídrico pode ser classificada como de origem pontual ou de origem difusa (Figura 3. 9). A carga pontual é de fácil identificação, como por exemplo, um efluente tratado advindo de uma ETE. Por outro lado, uma carga difusa é difícil de identificar e não se tem informação precisa do momento em que aquela carga foi introduzida, exemplificando, um despejo irregular de esgoto não tratado (Von Sperling, 1996).

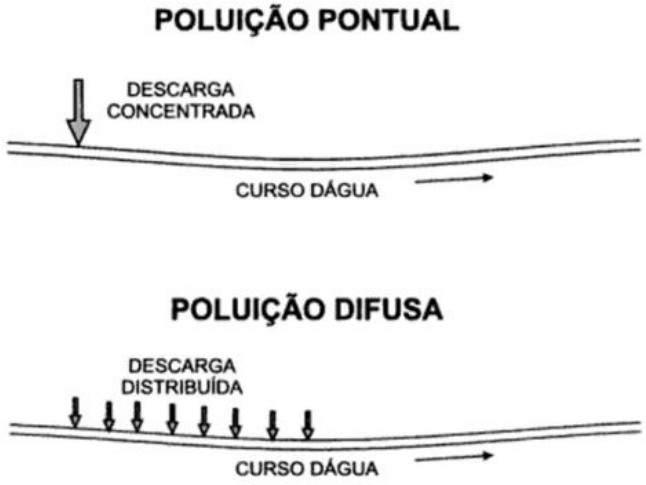



Figura 3. 9 - Representação de poluição pontual e difusa.
Fonte: Von Sperling, 2005.

De acordo com Braga *et al* (2005), diversos mecanismos estão atrelados ao fenômeno da autodepuração podendo ser físicos (diluição, sedimentação), químicos (oxidações), biológicos (absorção, biodegradação e biotransformação). A produção e consumo de nutrientes do meio aquático são equilibrados entre os seres produtores e os consumidores. Para que esse equilíbrio aconteça, é necessário que estejam presentes elementos como nitrogênio, fósforo, potássio, ferro, carbono, oxigênio e hidrogênio.

Na oxidação da matéria orgânica, nitrificação e demanda bentônica de oxigênio ocorre o consumo de oxigênio dissolvido (OD). O oxigênio é reintroduzido no sistema através da reaeração atmosférica e da fotossíntese (Figura 3. 10). O oxigênio dissolvido é essencial para

a vida aquática da maioria dos organismos aeróbios que ali vivem, os teores mínimos necessários para a sobrevivência desses organismos variam de 2 mg/L a 5 mg/L. Porém, valores acima de 10 mg/L acabam afetando a sobrevivência dos organismos aquáticos por conta de mudanças no equilíbrio ecológico, lembrando que isso só ocorre em decorrência da atividade de fotossíntese (Funasa,2014).

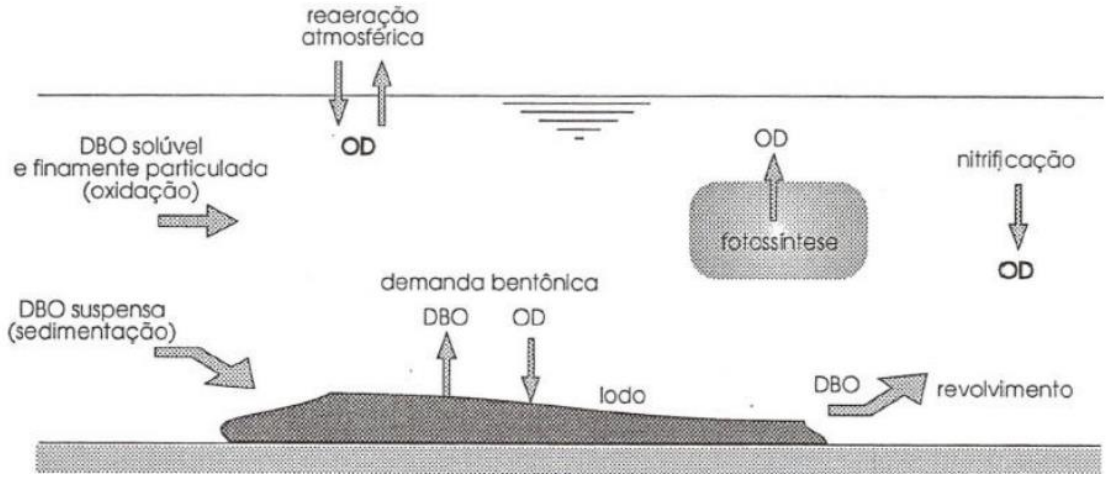



Figura 3. 10 - Balanço do oxigênio dissolvido.

Fonte: Von Sperling, 2005.

Para se estimar a quantidade de oxigênio necessário para degradar a matéria orgânica, existem os cálculos dos parâmetros Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A diferença entre os parâmetros é que a DBO mede apenas a fração bioquímica, ou seja, aquela que é degradada por microrganismo. Já a DQO mede também a quantidade de oxigênio para a estabilização da matéria orgânica por processos químicos. Por conta disso, a DQO pode ser maior ou igual a DBO (Funasa,2014).

Von Sperling (2005) destaca que o processo da autodepuração ocorre ao longo do tempo e depende da dimensão longitudinal do curso d'água receptor, podendo ser identificadas quatro zonas: degradação, decomposição ativa, recuperação e águas limpas.

A zona de águas limpas, como representado na Figura 3. 11, é tanto aquela antes do despejo de matéria orgânica como após a passagem do mesmo pelas demais zonas, pois o equilíbrio foi estabelecido e observa-se que a água fica com menos turbidez.

Segundo Braga (2005), na zona de degradação é onde existe a maior concentração de matéria orgânica, turbidez da água e predominância de organismos resistentes a essa carga. Isso ocorre, pois, a concentração de OD diminui devido a incorporação da matéria orgânica,

resultando em um aumento da DBO. Na zona de decomposição ativa, a degradação da matéria orgânica ocorre de maneira mais significativa, com maior presença de organismos decompositores e menor concentração de OD, o que leva à predominância de organismos anaeróbicos. Por fim, na zona de recuperação, a água se torna mais clara, a matéria orgânica se estabiliza, há um aumento da concentração de OD e uma maior diversificação dos organismos.

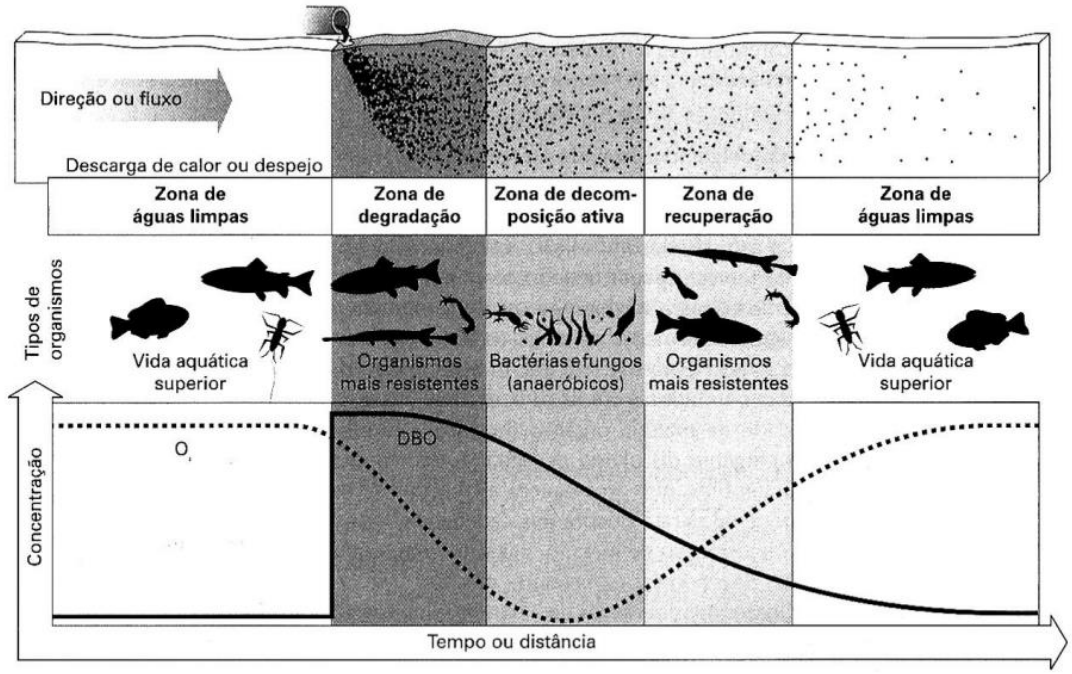



Figura 3. 11 - Zonas do processo de autodepuração.

Fonte: BRAGA, 2005.

### 3.3 BACIA HIDROGRÁFICA

A bacia hidrográfica, de acordo com a PNRH, é a unidade territorial definida para que sejam colocados em ação os instrumentos, gestão e controle dos recursos hídricos no Brasil. Os comitês de bacia fazem parte do SINGREH e no DF cada bacia possui seu comitê, eles têm como papel buscar a sustentabilidade hídrica, o equilíbrio entre os diversos usos da água e a harmonia na bacia hidrográfica (ANA,2022).

Existem diversas definições para uma bacia hidrográfica, porém segundo a ANA (2015), “a bacia hidrográfica é *um espaço geográfico delimitado pelo respectivo divisor de águas cujo escoamento superficial converge para seu interior sendo captado pela rede de drenagem que lhe concerne. Em outras palavras, é um território em que todos os corpos*

*hídricos superficiais se dirigem a um único ponto, que é a foz do rio principal.” (*Figura 3. 12).

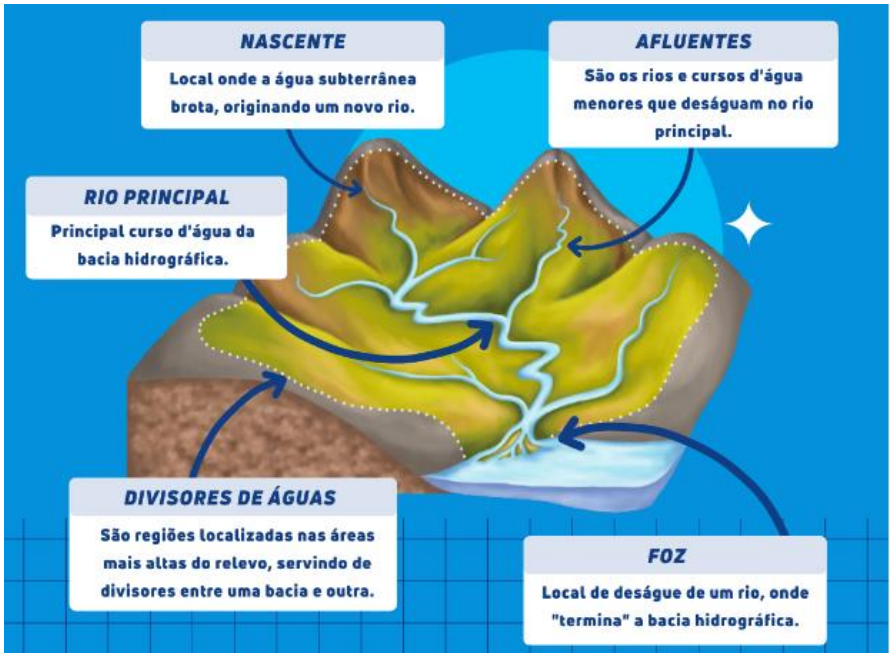



Figura 3. 12 - Exemplificação de uma bacia hidrográfica.

Fonte: Cômite Batitonga, 2022.

Diversas variáveis influenciam na dinâmica de uma bacia hidrográfica. Segundo Teodoro (2007), todo o comportamento hidrológico de uma bacia está ligado aos aspectos geomorfológicos sendo eles: a forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem, solo etc. Além disso, as características físicas e bióticas também influenciam no ciclo hidrológico da bacia, impactando a infiltração, deflúvio (quantidade de água produzida), a evapotranspiração e o escoamento superficial.

O ciclo hidrológico de uma bacia é caracterizado por uma circulação contínua e dinâmica da água em seu interior (Figura 3. 13). Assim, pode-se definir o ciclo hidrológico como as relações da água em um sistema fechado. Esse ciclo é composto principalmente pelos seguintes processos hidrológicos de evaporação, precipitação, infiltração, percolação e escoamento superficial (Ritzen, 2005).

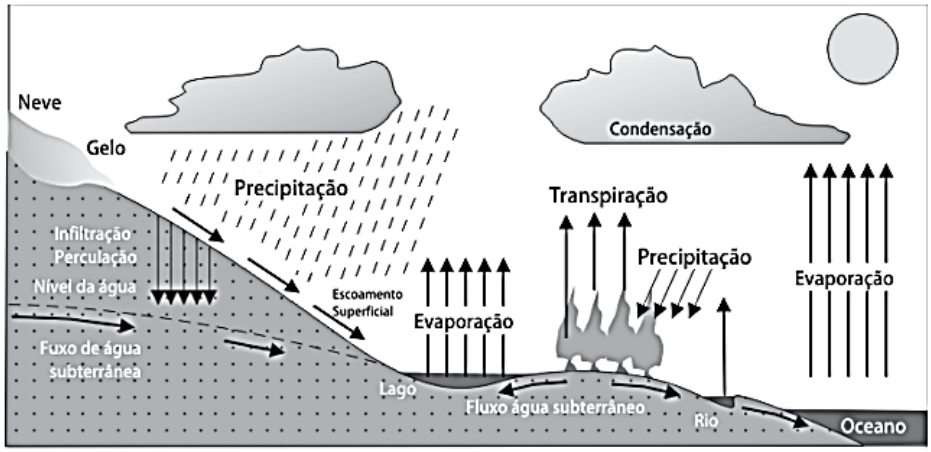



Figura 3. 13 - Ciclo Hidrológico Terrestre.

Fonte: TUCCI, 2006.

A bacia hidrográfica está exposta a diversas ações antrópicas. Por exemplo, o uso e ocupação do solo influenciam no escoamento superficial da água que chega à bacia. Com o crescimento populacional, áreas que antes eram permeáveis podem ser compactadas ou se tornar impermeáveis, gerando assim o aumento do escoamento superficial e uma diminuição da infiltração da água. Além disso, Tucci (2006) enfatiza que o desenvolvimento urbano impacta uma bacia, pois, com a redução da infiltração do solo, o nível do lençol freático do aquífero diminui, e a retirada da cobertura natural reduz a evapotranspiração. (Figura 3. 14).

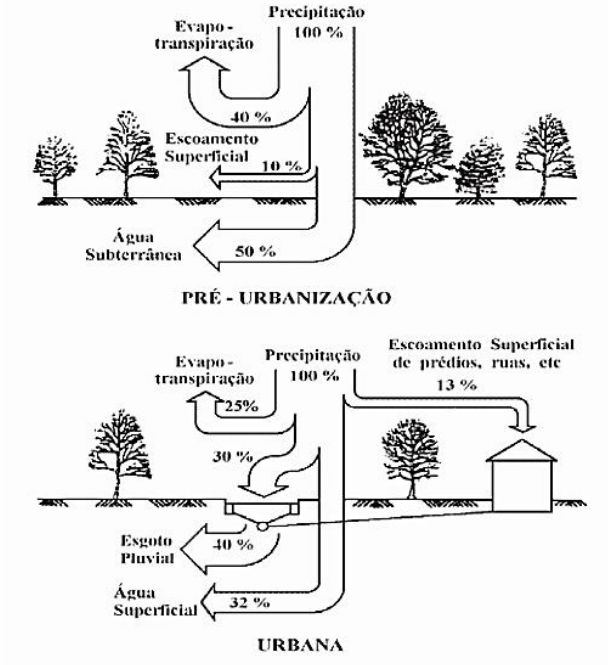



Figura 3. 14 - Impacto da urbanização no ciclo hidrológico.

Fonte: TUCCI, 2006.

### 3.3.1 Bacia do Ribeirão Sobradinho

A bacia do Ribeirão é uma área de grande relevância ambiental e social. O Ribeirão atua como um importante corpo diluidor no Distrito Federal e é um dos mais importantes afluentes do Rio São Bartolomeu que alimenta a região hidrográfica do Rio Paraná. Além disso, a bacia desempenha um papel fundamental no suporte à agricultura, devido às outorgas de uso da água concedidas principalmente para irrigação de culturas. A região da bacia também abriga áreas de proteção como a APA do São Bartolomeu, parte da APA de Cafuringa e áreas de Parques que reforçam a proteção da biodiversidade e dos recursos hídricos.

Ademais, a região administrativa de Sobradinho (Figura 3. 15) é ocupada por diversos usos do solo como áreas agrícolas, urbanas e áreas naturais de conservação possui como mais importantes afluentes os córregos de Capão Comprido (margem esquerda), Paranoazinho e Capão Grande (margem direita). A captação de água para consumo na região de Sobradinho é feita pelo Sistema Produtor de Água Sobradinho/Planaltina, logo, essa captação é feita na bacia hidrográfica do rio Pipiripau pois devido ao lançamento de efluente da ETE Sobradinho no ribeirão não ocorre captação de água (Barbosa *et al*, 2021).

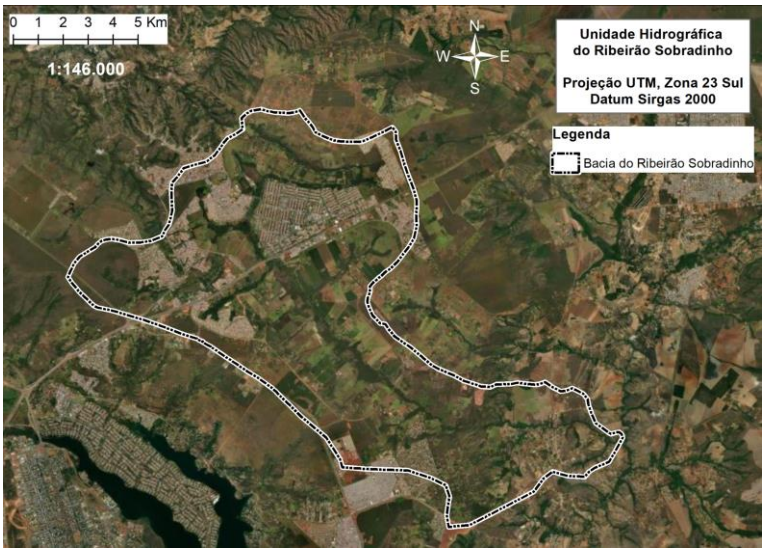



Figura 3. 15 - Localização da bacia do ribeirão Sobradinho.

De acordo com a Resolução nº 02, de 17 de dezembro de 2014 (CRH-DF), o Ribeirão Sobradinho é classificado como Classe 3, com a expectativa de alcançar a qualidade de água referente a essa classe até o ano de 2030. O Comitê de Bacia Hidrográfica dos Afluentes do Rio Paranaíba no Distrito Federal é responsável pelo Ribeirão Sobradinho. Atualmente, existem conflitos entre a classe do Ribeirão e a demanda da população, pois, de acordo com

sua classificação, não é permitido o contato primário. Mesmo assim, ainda é possível ver pessoas se banhando no corpo hídrico.

A bacia do Ribeirão é marcada pela participação ativa e engajada da comunidade em sua conservação. Um exemplo disso é o movimento "SOS Ribeirão", que está constantemente em contato com o Poder Público, lutando pela melhoria da classe do ribeirão para que ele possa ser balneável. No entanto, o ribeirão enfrenta sérios problemas de poluição difusa, relacionados ao esgoto não tratado, efluentes de áreas de mineração, atividades agrícolas e urbanas. A bacia do ribeirão Sobradinho enfrenta intensa especulação imobiliária e criação de novos empreendimentos como o Urbitá, com ocupação total de aproximadamente de 120 mil pessoas (Barbosa *et al*, 2021).

O movimento “SOS Ribeirão” conta atualmente com um representante no Comitê de Bacia do Paranaíba (CBH Paranaíba-DF) e possui representantes na Comissão de Defesa do Meio Ambiente de Sobradinho (COMDEMA-SOB), constituída em 3 de junho de 2024, conforme publicado no Diário Oficial do Distrito Federal nº 107, de 7 de junho de 2024. Os grupos engajados na bacia do Ribeirão Sobradinho estão constantemente ativos na luta socioambiental e política na região.

O Ribeirão também recebe efluentes da ETE Sobradinho (Figura 3. 16) com nível de tratamento secundário e tecnologia de lodos ativados convencional, ou seja, sem remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. De acordo com o Plano Distrital de Saneamento Básico (PDSB), a CAESB tem como perspectivas futuras até 2037 a implementação de biomídia — material utilizado para fornecer uma superfície onde microrganismos podem se aderir e crescer — no reator biológico e a desinfecção do efluente garantindo assim o não lançamento de microrganismos, incluindo patógenos no ribeirão.



Figura 3. 16 - (a) Vista do Ribeirão Sobradinho; (b) Ponto de lançamento de esgoto tratado no Ribeirão.
Fonte: Autor, 2023.

Com base na importância ambiental e social do Ribeirão Sobradinho, diversos estudos têm sido realizados para avaliar sua qualidade da água e entender os impactos das atividades humanas na bacia hidrográfica. Esses trabalhos fornecem uma base sólida de conhecimento e destacam os avanços obtidos na compreensão dos desafios enfrentados pelo Ribeirão.

O trabalho de Muniz (2011) teve como objetivo avaliar a qualidade da água superficial em uma bacia hidrográfica urbana do Distrito Federal (Ribeirão Sobradinho) e em outra agrícola (Rio Jardim), com foco em entender os impactos dessas diferentes características de bacias nos corpos hídricos. Foram coletadas 3 amostras ao longo do ribeirão Sobradinho de maio de 2008 a abril de 2009, sendo uma próxima à nascente, um a montante e outra a jusante da ETE Sobradinho. Os resultados indicaram baixos valores de OD, próximos de 2 mg/L, na bacia urbana de Sobradinho, além de concentrações de nitrato dentro do esperado e um aumento da condutividade elétrica ao longo dos pontos de amostragem. Houve também elevação na dureza (cálcio e magnésio), principalmente no período chuvoso, e altas concentrações de amônio. Esses fatores, em conjunto, destacam que a contaminação decorrente da ocupação urbana é mais intensa do que na bacia predominantemente agrícola.

O estudo de Zorzin (2011), avaliou os parâmetros como temperatura, oxigênio, pH, turbidez, sólidos totais, nitrogênio, amônia, demanda bioquímica de oxigênio, coliformes totais e Escherichia coli (E. coli). Com amostras em quatro pontos: próximo à nascente, próximo à saída da ETE, no Parque Jequitibá e próximo à saída de Sobradinho, na BR-020. Observou-se que os pontos próximos à saída de esgoto da CAESB e próxima a saída da cidade de Sobradinho apresentaram altos níveis de poluentes, como nitrato, nitrito, fósforo e amônia, além de contaminação por Coliformes e Escherichia coli. Em contraste, a qualidade da água na nascente foi melhor. Esses achados indicam que a qualidade da água do Ribeirão Sobradinho é insatisfatória, afetando a saúde dos moradores e diminuindo suas opções de lazer.

Gasque (2019) avaliou a qualidade da água do Ribeirão Sobradinho analisando parâmetros físicos, químicos e biológicos. Os resultados indicaram poluição significativa, especialmente em relação a coliformes e nutrientes, frequentemente ultrapassando os limites da Resolução CONAMA 357/2005. A pesquisa revelou que a estação de tratamento de esgoto de Sobradinho impacta negativamente a qualidade da água, que é inadequada para usos recreativos e de dessedentação. O Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) sugeriu conformidade regular, mas a contaminação, associada ao uso urbano e agropecuário, representa um risco à saúde pública.

Destaca-se também o trabalho de Souza (2021), que avaliou a qualidade da água do ribeirão Sobradinho entre janeiro de 2015 e dezembro de 2020, utilizando o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) e o modelo QUAL-UFMG. O primeiro cenário simula uma população atual de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 100 mil, mantendo a eficiência atual da ETE. O segundo cenário considera um aumento populacional semelhante, mas com 200 mil pessoas. No terceiro cenário, analisa-se um acréscimo de 200 mil pessoas, agora com a eficiência projetada no PDSB. O quarto cenário aborda a população atual de 150 mil, mas aplicando a eficiência proposta no PDSB. Em todos os cenários, assim como no cálculo do ICE, a presença de E. coli se manteve na classe 4, evidenciando a grave inadequação da qualidade da água. Isso ressalta a urgente necessidade de melhorias na infraestrutura de saneamento e mostra que, mesmo com a implementação das melhorias previstas no PDSB para a ETE Sobradinho, aumentos expressivos na população atendida não garantiriam lançamentos compatíveis com a classe 3.

Um fato importante a ser destacado, com implicações para o Ribeirão, é que, em 2021, a SEMA-DF, por meio da Resolução nº 02/2021, criou uma Câmara Técnica para estudar e propor regulamentações sobre o reúso de água em atividades agrícolas e de irrigação no Distrito Federal. A criação dessa Câmara reflete a crescente necessidade de buscar alternativas sustentáveis para o uso da água impulsionada, principalmente, pelo aumento populacional no DF. E motivada, inclusive, pelas reivindicações da comunidade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Sobradinho. Além disso, a comunidade rural da região de Sobradinho já demanda a possibilidade de irrigação de hortaliças o que reforça a importância de implementar soluções de reúso de água na bacia.

## 3.4 REÚSO DE ÁGUA NA AGRICULTURA

A água é um recurso finito, sendo fundamental o uso racional para garantir o acesso de água de qualidade a todos. No entanto, sabe-se que o principal causador de degradação da qualidade da água é o despejo de esgotos tratados ou com tratamento ineficiente. Mesmo quando os efluentes são tratados dentro dos padrões regulamentados, nem sempre o corpo hídrico possui capacidade de autodepuração suficiente para se recuperar após o lançamento (Braga e Lima, 2014).

Diante disso, o reúso da água surge como uma alternativa que, aliada à gestão dos recursos hídricos, pode ajudar a garantir o uso múltiplo da água. Seu grande potencial de minimizar a produção de efluentes e o consumo de água contribui para que menores cargas

de poluição cheguem aos corpos hídricos, assegurando, assim, sua conservação (Tavares, 2008).

De acordo com Brega Filho e Mancuso (2003), o reúso de água pode ser conceituado como aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes, em alguma atividade humana para suprir as necessidades de outros usos benéficos, podendo ser classificado como potável ou não potável.

Na Tabela 3. 1, apresenta-se um sintase das classificações de tipos de reúso.

Tabela 3. 1: Tabela com os tipos de reúso.
Fonte: Adaptado de Kubler, 2015.

| | |
|---|---|
| **Menor qualidade de água exigida** | |
| Reúso Não potável | Reúso Agrícola |
| | Reúso Municipal |
| | Reúso Industrial |
| | Melhorias recreacionais e ambiental |
| **Maior qualidade de água exigida** | |
| Reúso Potável | Indireto: fonte de água potável (represas, aquíferos,etc). |
| | Direto: diretamente na rede de água bruta ou água tratada. |

Segundo a PNRH, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) tem como uma de suas atribuições a criação de políticas que garantam o uso múltiplo das águas, incluindo o reúso. E em 2005, o CNRH publicou a Resolução n° 54 que trata exatamente das modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água e conceitua reúso de água como utilização de águas residuárias.

Para essa atividade ser realizada de maneira segura é fundamental que medidas de segurança sejam asseguradas, os sistemas de tratamento devem ter um nível de tratamento avançado que retire patogênicos para evitar riscos biológicos na água de reúso. Além disso, a depender do tipo de cultura o nível qualidade da água pode requerer uma maior rigorosidade (Braga e Lima, 2014).

No estudo de Schaer (2014), são discutidos os obstáculos para uma eficaz implementação do reúso, que estão ligados à falta de regulações no Brasil, a aceitação pública frente a essa prática, e aos potenciais impactos na saúde devido a mau gerenciamento da água de reúso podendo afetar a saúde humana e a qualidade do meio ambiente. Porém, o

estudo ainda comenta sobre a relação econômica favorável, destacando que, para validar a eficiência econômica do reúso agrícola de água, é necessário que os custos sejam inferiores aos de outras alternativas que busquem o mesmo objetivo.

Mesmo diante desses obstáculos, o reúso de águas residuárias para fins agrícolas, se realizado de maneira adequada, possui um grande potencial, pois essa área demanda uma quantidade significativa de água para a produção de alimentos. Além disso, oferece vários benefícios, entre os quais podemos destacar: (Hespanhol, 2003)

- Minimização das descargas de esgoto em corpos d'água;
- Aumento de produtividade, devido a presença de nutrientes nos efluentes;
- Economia no uso de fertilizantes comerciais;
- Economia no uso de água.

Dito isso, diversos estudos mostram o potencial do reúso agrícola, como o trabalho de Domingues (2023), que avaliou alternativas para a destinação de efluentes sanitários tratados em cinco municípios do estado de São Paulo e teve resultado positivo no qual o reúso agrícola reduziria a carga de DBO que chegaria aos corpos d'água. E o estudo de Silva (2023), no qual analisou o potencial de utilização de água de reúso em um Polo Nacional de Agricultura Irrigada, em Goiás, teve uma resposta positiva, observando-se um alto potencial de reúso. Se implementado, traria benefícios voltados à redução de conflitos hídricos e à diminuição do descarte de esgoto sanitário.

## 3.5 MODELAGEM MATEMÁTICA APLICADA A QUALIDADE DA ÁGUA

Segundo Von Sperling (2014), um modelo matemático é formado por:

- estrutura teórica, representada por equações matemáticas;
- valores numéricos dos parâmetros (coeficientes das equações);
- dados de entrada e saída, que são relacionados a observações de campo e relacionados com fatores externos do sistema.

Para se obter uma boa resposta do modelo matemático e resultados que representem de fato a realidade observada com a modelada, é preciso seguir procedimentos mínimos, na Figura 3. 17 é apresentado um fluxograma das etapas necessárias para desenvolvimento de um modelo matemático.

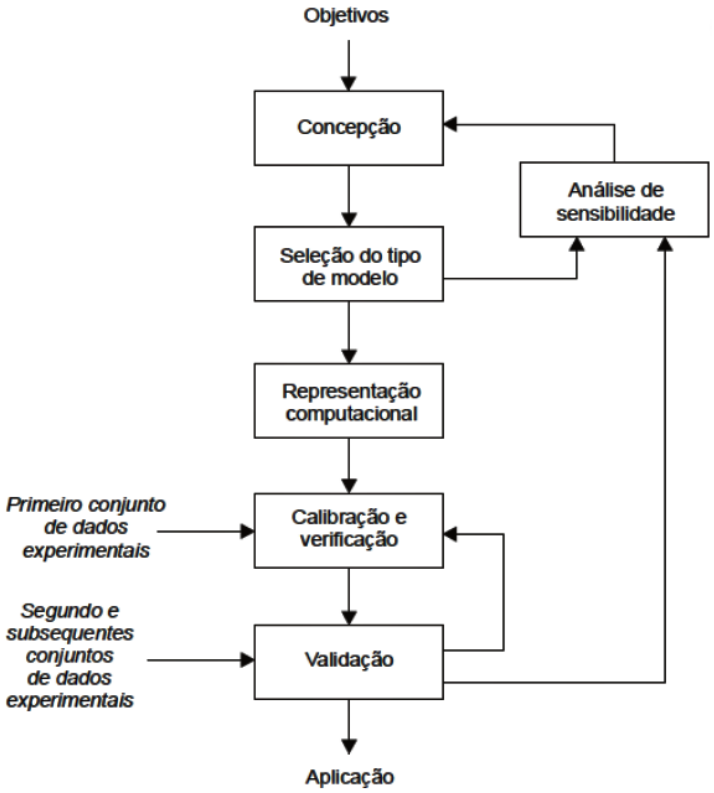



Figura 3. 17 - Fluxograma das etapas do desenvolvimento de um modelo matemático.

Fonte: Von Sperling, 2014.

Ao escolher um modelo, é fundamental estabelecer os objetivos para sua aplicação, que podem incluir pesquisa, gerenciamento, controle, planejamento ou previsão de condições futuras, entre outros. Em seguida, é necessário compreender a concepção do modelo, ou seja, a forma como ele representa fisicamente o sistema, a formulação das variáveis e a definição de seus devidos parâmetros (Von Sperling, 2014).

No âmbito da qualidade da água, uma das primeiras modelagens amplamente difundidas foi o modelo de Streeter-Phelps, desenvolvido em 1925. Esse modelo buscava representar a autodepuração por meio da avaliação do oxigênio dissolvido, considerando o consumo de oxigênio pela DBO e sua reposição pela reaeração atmosférica devido à oxidação da matéria orgânica. O modelo se baseia na dinâmica de uma reação de primeira ordem, onde a taxa de oxidação da matéria orgânica é proporcional à sua concentração em um determinado instante de tempo. Ele serviu como base para diversos modelos posteriores (Braga, 2005).

O modelo mais difundido e utilizado é o QUAL2E, desenvolvido pela US Environmental Protection Agency (USEPA). Ele é amplamente empregado para simular o

impacto de lançamentos de cargas poluentes em corpos hídricos, podendo utilizar até 15 parâmetros para essa simulação. Dentre os parâmetros estão: demanda bioquímica de oxigênio (demanda carbonácea), oxigênio dissolvido, demanda bentônica de oxigênio, clorofila, nitrogênio (amônia, nitrito e nitrato), fósforo, coliformes, material radioativo, minerais conservativos e temperatura (De Rezende, 2009). Na Tabela 3. 2 têm-se um esquema dos modelos mais utilizados e seus constituintes.

Tabela 3. 2 - Modelos matemáticos de qualidade da água e suas características.
Fonte: Adaptado de Fleck *et al*, 2013.

| **Modelo** | **Corpo Hídrico** | | | | **Variáveis de estado** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Lago | Reservatório | Rio | Estuário | Patogênicos | Eutrofização | DBO |
| EFDC | X | X | X | X | | X | |
| CE-QUAL-W2 | X | X | X | X | X | X | X |
| QUAL-2E | | | X | | | X | |
| HSPF-RCHRES | X | X | X | | X | X | X |
| MIKE 11-WQ | | X | X | X | X | X | X |
| WASP | X | X | X | X | X | X | X |
| AESOP | X | X | X | X | X | X | X |
| AQUASEA | X | X | | X | X | | X |
| C3 | X | X | X | X | X | X | X |
| SOBEK | | X | X | | X | X | X |

### 3.5.1 Modelo -QUAL UFMG

O QUAL-UFMG é uma ferramenta amplamente utilizada em estudos de qualidade da água no Brasil, devido à sua simplicidade e facilidade de operação dentro do ambiente do Microsoft Office Excel. A eficácia do modelo é comprovada por resultados satisfatórios obtidos em diversos trabalhos. Por exemplo, Costa (2010) aplicou o QUAL-UFMG para avaliar a qualidade da água do Ribeirão do Ouro em Araraquara (SP) que possui extensão de 19km e recebe contribuição de efluentes industriais e tributários com altas concentrações de matéria orgânica, o estudo obteve resultados satisfatórios mostrando que o modelo conseguiu identificar as tendências do Corpo d'água.

Esse trabalho foi posteriormente referenciado por Gomes *et al* (2018), que utilizaram o QUAL-UFMG para modelar sazonalmente a qualidade da água do Rio dos Sinos no Rio Grande do Sul com extensão de 221km que possui ao longo de seus primeiros 100km características rurais e no restante de seu percurso característica urbanas, no qual também

alcançou resultados consistentes. Estes exemplos demonstram a aplicabilidade e adequação do QUAL-UFMG em diferentes contextos.

O modelo também foi utilizado para simular a qualidade da água da Bacia do Rio Alagado, localizado entre o DF e GO, no estudo de Melo (2022), que, mesmo com baixa disponibilidade de dados, conseguiu obter resultados esperados que refletiam a realidade do corpo d'água.

O modelo QUAL-UFMG é baseado no QUAL2E e consiste em um conjunto de planilhas no Excel que simulam os impactos gerados por cargas poluentes em rios. Diferente do QUAL2E, que simula diversos parâmetros, o QUAL-UFMG foca em parâmetros como DBO, OD, nitrogênio total e suas frações (orgânico, amoniacal, nitrito e nitrato), fósforo total e suas frações (orgânico e inorgânico), além de coliformes termotolerantes (fecais) e Escherichia coli (E. coli).

Ademais, no modelo a dispersão longitudinal não é considerada, pois se presume que o fluxo no corpo hídrico é do tipo pistão (dispersão nula), onde a dispersão longitudinal é mínima. Assim como o modelo norte americano, o modelo brasileiro criado por Von Sperling também opera em modo estacionário, ou seja, as variáveis não se alteram ao longo do espaço e tempo, o que facilita e simplifica a modelagem (Von Sperling, 2014).

Tabela 3. 3 - Características do reator fluxo pistão idealizado em condições estacionárias.
Fonte: Von Sperling, 2014.

| Modelo | Esquema | Fluxo contínuo | Variação da composição com o tempo (em uma dada posição do reator) | Variação da composição com a posição no reator (em um dado tempo) | Número de células (de mistura completa e equivalentes) | Típica relação comprimento/ largura |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Fluxo em pistão |  | Sim | Não | Sim | ∞ | >>1 |

Para lançamentos pontuais, o modelo assume uma mistura perfeita e instantânea no ponto de contribuição. Com base nesse pressuposto, é possível calcular a concentração dos parâmetros desejados, como DBO, OD, entre outros. A capacidade de diluição de um rio desempenha um papel fundamental na assimilação de lançamentos pontuais, como efluentes de ETEs. Rios com vazões baixas enfrentam maiores dificuldades em lidar com o impacto desses lançamentos devido à sua capacidade reduzida de diluição. A razão de diluição permite uma estimativa rápida para compreender como o rio assimila o impacto de um lançamento. (Von Sperling,2014)

Nas equações 3.1 e 3.2, são apresentadas as fórmulas para o cálculo das concentrações e da razão de diluição. Ambas as equações são simples, mas fornecem resultados rápidos e importantes sobre a resposta do corpo d'água à entrada de poluentes.

$$C_o = \frac{Q_r \cdot C_r + Q_e \cdot C_e}{Q_r + Q_e} \quad (3.1)$$

Onde:

Co = concentração do componente na mistura (mg/L);

Qr = vazão do rio ($m^3/s$);

Cr = concentração do componente no rio (mg/L);

Qe = vazão do componente ($m^3/s$);

Qe = concentração do componente no efluente (mg/L).

$$r = \frac{Qr + Qe}{Qe} \quad (3.2)$$

Onde:

r = razão de diluição.

A inclusão dos parâmetros de nitrogênio e fósforo na modelagem de um rio é essencial, pois ambos são macronutrientes necessários para os processos biológicos dos microrganismos presentes no corpo hídrico. O nitrogênio participa da conversão da amônia em nitrito e, em seguida, em nitrato (nitrificação), processo que consome oxigênio dissolvido e afeta a vida aquática. Além de seu papel na nitrificação, o nitrogênio é fundamental para o crescimento de microrganismos. Por outro lado, o fósforo também é crucial para o crescimento de microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica em águas superficiais. Destaca-se que o excesso de ambos os parâmetros pode causar eutrofização (Von Sperling, 1996).

Abaixo na Figura 3. 18, têm-se um esquema dos parâmetros simulados pelo modelo QUAL-UFMG.

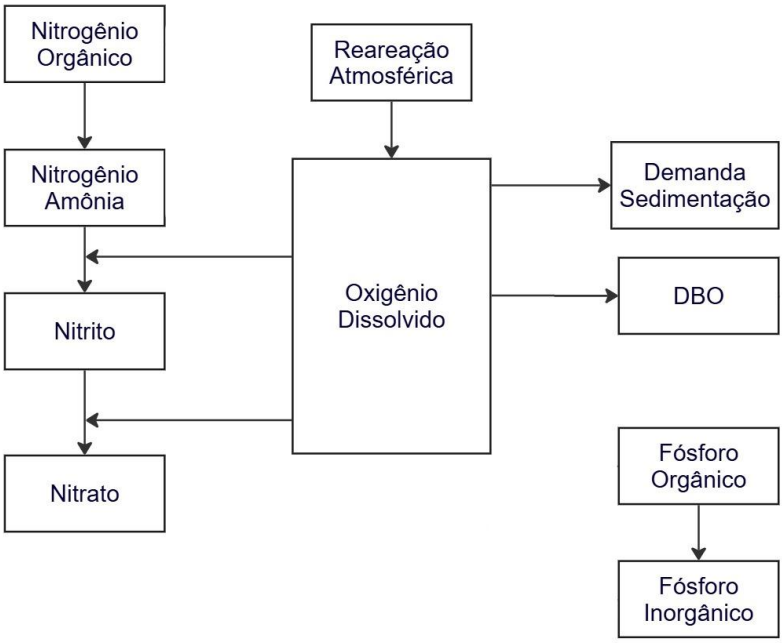



Figura 3. 18- Esquema dos parâmetros simulados pelo modelo QUAL-UFMG.

Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2014.

Os dados principais necessários para a simulação do modelo, de acordo com as planilhas do modelo QUAL-UFMG, são os seguintes:

- Hidrológicos, são os dados acerca da vazão do rio normalmente para casos de simulação da autodepuração é usado as menores vazões do corpo hídrico, que ocorre durante o tempo de seca;
- Hidráulicos, são os dados físicos do rio como distância do trecho simulado, velocidade e profundidade;
- Parâmetros de desoxigenação (k1), o de decomposição da DBO (kd) e o de reaeração (k2).

O coeficiente de desoxigenação (k1) depende do tipo de efluente despejado, da temperatura e da presença de substâncias inibidoras. Ele fornece informações sobre o consumo de oxigênio, pois, quanto maior o valor de k1, maior será o consumo de oxigênio. Assim, a concentração de OD também varia conforme a carga de poluentes que atinge o corpo receptor. Vale destacar que o k1 segue a cinética de primeira ordem, na qual a taxa de desoxigenação é proporcional à concentração de matéria orgânica presente no meio (Von Sperling, 2014).

Já o coeficiente de decomposição da DBO (kd) está relacionado à degradação e sedimentação da DBO. Em um curso d'água, o kd pode ser maior do que em laboratório devido à presença de mais fontes de consumo de oxigênio. Enfatize-se que o coeficiente de sedimentação (ks) depende da velocidade de sedimentação do composto e da profundidade do rio. Além disso, fontes provenientes de esgotos tratados geralmente têm um ks baixo ou irrelevante devido às baixas concentrações de sólidos sedimentáveis (Paula, 2011).

Na Tabela 3. 4, são apresentados valores típicos dos coeficientes k1, kd e ks para a remoção de DBO em cursos d'água que recebem diferentes tipos de poluentes, considerando as características dos efluentes e as profundidades do corpo d'água.

Tabela 3. 4 - Tabela com valores típicos de k1, kd e ks para diferentes tipos de poluentes (base e, 20ºC).
Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2017.

| **Modelo** | | **Rios Rasos** | | **Rios Profundos** | |
|---|---|---|---|---|---|
| | **k1 (laboratório)** | **kd - Decomp.** | **ks - Sediment** | **kd - Decomp.** | **ks - Sediment** |
| Curso d'água recebendo esgoto bruto concentrado | 0,35-0,45 | 0,50-1,00 | 0,10-0,35 | 0,035-0,50 | 0,05-0,20 |
| Curso d'água recebendo esgoto bruto de baixa concentração | 0,30-0,10 | 0,40-0,80 | 0,05-0,25 | 0,30-0,45 | 0,00-0,15 |
| Curso d'água recebendo efluente primário | 0,30-0,40 | 0,40-0,80 | 0,05-0,10 | 0,30-0,45 | 0,00-0,05 |
| Curso d´água recebendo efluente secundário | 0,12-0,24 | 0,12-0,24 | - | 0,12-0,24 | - |
| Curso d'água com águas limpas | 0,08-0,20 | 0,08-0,20 | - | 0,08-0,20 | - |

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

O parâmetro de reaeração (k2) está relacionado à troca de oxigênio entre o corpo hídrico e a atmosfera. Esse contato transfere oxigênio dissolvido para a água. A razão para isso é que, ao degradar a matéria orgânica, o OD é consumido, fazendo com que as concentrações fiquem abaixo dos valores de saturação, logo, o contato com a atmosfera reintroduz o OD no ambiente aquático. Assim como o k1, o k2 também é regido por uma cinética de primeira ordem (Paula, 2011).

Os valores de k2 podem ser obtidos por meio de valores tabelados(literatura), considerando as características hidráulicas do corpo d'água e valores correlacionados com a vazão do curso d'água. No modelo QUAL-UFMG, o k2 é determinado utilizando valores tabelados e relações hidráulicas, e o resultado é obtido através da escolha do menor valor entre os métodos (Von Sperling, 2014).

Na Tabela 3. 5, são apresentados os valores de k2 obtidos de acordo com as características do corpo hídrico.

Tabela 3. 5 – Valores típicos de K2 (base e, 20ºC).
Fonte: Adaptado de Von Sperling, 2017.

| Corpo d'água | k2 ($d^{-1}$) | |
|---|---|---|
| | Profundo | Raso |
| Pequenas lagoas | 0,12 | 0,23 |
| Rios vagorosos, 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 |

Para garantir maior fidelidade nas simulações realizadas pelo modelo, é essencial realizar a calibração para que os coeficientes se aproximem o máximo possível da escala real. Von Sperling (2014) destaca a dificuldade de calibração devido às limitações dos sistemas ambientais e ao fato de que as equações aplicadas nesses modelos não são lineares. Além disso, a presença de muitos parâmetros e o uso predominante de dados secundários contribuem para um maior grau de incerteza.

A análise de sensibilidade está diretamente vinculada à calibração, pois é fundamental para que o modelador compreenda como o modelo responde e funciona em relação aos dados. Ela envolve a avaliação de como as variações nos coeficientes, dados de entrada e outras variáveis afetam os resultados do modelo. Dessa forma, é possível identificar quais parâmetros têm maior ou menor impacto no desempenho do modelo. Esse entendimento é crucial para garantir que a calibração do modelo seja realizada da forma mais eficaz possível (Knapik,2009).

O atendimento à legislação também pode ser incorporado ao modelo QUAL-UFMG. A inclusão dos Valores Máximos Permitidos (VMPs) para cada parâmetro é importante para verificar se os parâmetros modelados estão em conformidade com a legislação ambiental, a CONAMA 357/2005. Além disso, o modelo permite calcular a porcentagem dos trechos que atendem a esses padrões, proporcionando uma visão clara do grau de conformidade ao longo do corpo hídrico.

A Tabela 3. 6, traz uma síntese dos parâmetros analisados pelo modelo e sua importância.

Tabela 3. 6 - Síntese dos parâmetros analisados no QUAL-UFMG e sua importância

Fonte: Adaptado de ANA, 2024

| Parâmetro | Importância |
|---|---|
| Oxigênio Dissolvido (OD) | Essencial para a sobrevivência da microbiota aeróbia, o oxigênio é o elemento principal no metabolismo desses organismos. Está diretamente ligado à quantidade de matéria orgânica, pois, durante a decomposição, o oxigênio é consumido. Esse processo é fundamental para os modelos de autodepuração. |
| Demanda Bioquímica do Oxigênio (DBO) | Está ligada a demanda de oxigênio necessária para degradação de compostos orgânicos, nos traz informação do grau de poluição daquele curso hídrico em decorrência da quantidade de matéria orgânica. |
| Nitrogênio Amoniacal ($NH_3$) | Em excesso apresenta toxicidade para a vida aquática. |
| Nitrito ($NO_2$) | Sua presença na água superficial indica que o lançamento é recente, pois o nitrito é instável e rapidamente é oxidado a nitrato. Em alta concentração aumenta o consumo de OD. |
| Nitrato ($NO_3$) | É a principal forma encontrada em águas superficiais devido à sua estabilidade. Em altas concentrações pode afetar a saúde humana, causando uma doença chamada metahemoglobinemia. |
| Fósforo (P) | Em alta concentração pode gerar eutrofização. |
| E-coli | Bactéria associada a presença de coliformes fecais na água, a quantificação pode nos informar quanto a presença de microrganismos patogênicos. |

# 4. MATERIAL E MÉTODOS

## 4.1 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O presente trabalho utilizou os seguintes softwares: ARCGIS, software de domínio privado fornecido pela UnB, para a criação de mapas temáticos da caracterização da área de estudo; o modelo QUAL-UFMG, software livre desenvolvido na UFMG, para simulação da qualidade de água de rios; Microsoft Excel e R Studio para manipulação e análise de dados.

### 4.1.2 Banco de dados

Na Tabela 4. 1, são apresentadas as informações detalhadas sobre os tipos de dados necessários para a elaboração deste trabalho, incluindo suas fontes e a frequência com que foram coletados.

Os dados dos parâmetros de qualidade de água foram disponibilizados em formato de planilha Excel pela CAESB através de pedido realizado via GDOC (Sistema de Gestão de Documentos) com número de protocolo 00092-00030664/2023-50, pedido realizado no dia 05 de julho de 2023. A frequência dos dados fornecidos é bimestral até 2020 e mensal para os anos 2021 e 2022. O período de análise foi escolhido para abranger, pelo menos, 10 anos de dados, a fim de proporcionar uma visão abrangente da qualidade da água ao longo do tempo.

Os dados vazão foram extraídos do portal HIDROWEB, da estação Sobradinho Jusante DF – 330 (código da estação: 60474100), escolhida devido à maior disponibilidade de dados, que vão de 1995 a 2022. Para um melhor entendimento do comportamento da vazão, no Apêndice A são apresentados os gráficos com as variações anuais e mensais dos dados de vazão da estação.

Da mesma forma, os dados de precipitação foram obtidos no HIDROWEB da estação ETE - SOBRADINHO (código da estação: 1547015), a única estação pluviométrica dentro da bacia com dados disponíveis, que abrangem o período de 1973 a 2022.

Tabela 4. 1 - Dados do corpo hídrico utilizados na avaliação da qualidade da água e na modelagem com o QUAL-UFMG.

| Tipo de dado | Dado | Fonte | Frequência | Unidade | Período |
|---|---|---|---|---|---|
| Limnológicos | Coliformes (Escherichia coli) | Caesb | Bimestral ou Mensal | NMP/100 mL | 2013 - 2022 |
| | Demanda Bioquímica de Oxigênio | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |

| Tipo de dado | Dado | Fonte | Frequência | Unidade | Período |
|---|---|---|---|---|---|
| Limnológicos | Fósforo Total | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrato | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrito | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrogênio de Amônia (N-NH3) | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrogênio Total | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Oxigênio Dissolvido | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | pH | Caesb | Bimestral ou Mensal | - | 2013 - 2022 |
| | Sólidos Dissolvidos Totais | Caesb | Bimestral ou Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Temperatura da Água | Caesb | Bimestral ou Mensal | ºC | 2013 - 2022 |
| | Turbidez | Caesb | Bimestral ou Mensal | NTU | 2013 - 2022 |
| Hidrométricos | Vazão | ANA | Mensal | m³/s | 1995 - 2022 |
| Hidrológicos | Precipitação | ANA | Mensal | mm | 1973 - 2022 |

No mesmo protocolo, foram solicitados os dados de qualidade do efluente final da ETE Sobradinho para os anos de 2013 a 2022, com as concentrações médias do efluente final fornecidas para cada mês. Além disso, o quantitativo de vazão diária, obtido pela ADASA e disponibilizado pela SAE (Superintendência de Abastecimento de Água e Esgoto), abrange os anos de 2017 a 2022. Todas essas informações estão detalhadas na Tabela 4. 2.

Tabela 4. 2 - Dados do efluente final da ETE Sobradinho utilizados na modelagem com o QUAL-UFMG.

| Tipo de dado | Dado | Fonte | Frequência | Unidade | Período |
|---|---|---|---|---|---|
| Limnológicos | Coliformes (Escherichia coli) | Caesb | Mensal | NMP/100 mL | 2013 - 2022 |
| | Demanda Bioquímica de Oxigênio | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Fosfato (PO4) | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Fósforo Total | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrato (NO3) | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrito (NO2) | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Nitrogênio de Amônia (N-NH3) | Caesb | Mensal | - | 2013 - 2022 |
| | Nitrogênio Total | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | pH | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Sólidos Suspensos (SS) | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Sólidos Sedimentáveis (Ssed) | Caesb | Mensal | mg/L | 2013 - 2022 |
| | Turbidez | Caesb | Mensal | NTU | 2013 - 2022 |
| Hidrométricos | Vazão do efluente | Adasa | Diário | m³/s | 2017 - 2022 |

Os dados utilizados para a caracterização da área de estudo estão apresentados na Tabela 4. 3. Esta tabela inclui informações sobre a resolução, a fonte e a escala dos dados.

Tabela 4. 3 - Dados usados para a caracterização da área de estudo.

| **Imagem Raster** | | |
|---|---|---|
| **Dados** | **Resolução** | **Fonte** |
| Imagens multiespectrais do satélite CBERS4A WPM | 8 m | INPE (2024) |
| **Shapefiles e Mapas Temáticos** | | |
| **Dados** | **Escala** | **Fonte** |
| Curvas de nível 5m | - | GEOPORTAL DF (2009) |
| Geologia | 1:250.000 | IBGE (2023) |
| Hidrogeologia | 1:200.000 | SGB/CPRM (2019) |
| Hidrografia | 1:10.000 | GEOPORTAL (2024) |
| Limites DF | 1:1.000.000 | IBGE (2021) |
| Pedologia | 1:250.000 | IBGE (2023) |
| Regiões Administrativas | 1:100.000 | GEOPORTAL DF (2021) |
| Unidades Hidrográficas | 1:5.000 | GEOPORTAL (2024) |

## 4.2 METODOLOGIA

O presente trabalho contou com uso do software ArcGIS para a criação de mapas temáticos da caracterização da área de estudo, uso do modelo QUAL-UFMG para simulação da qualidade de água, e Microsoft Excel e R Studio para manipulação e análise de dados.

Esse trabalho se configura como uma pesquisa experimental para avaliação da qualidade da água do Ribeirão Sobradinho, foram realizados manipulações de calibração, sensibilidade e análise dos dados monitorados para o Ribeirão dos anos de 2013 a 2022.

As etapas da metodologia aplicada a pesquisa são apresentadas no fluxograma na Figura 4. 1.

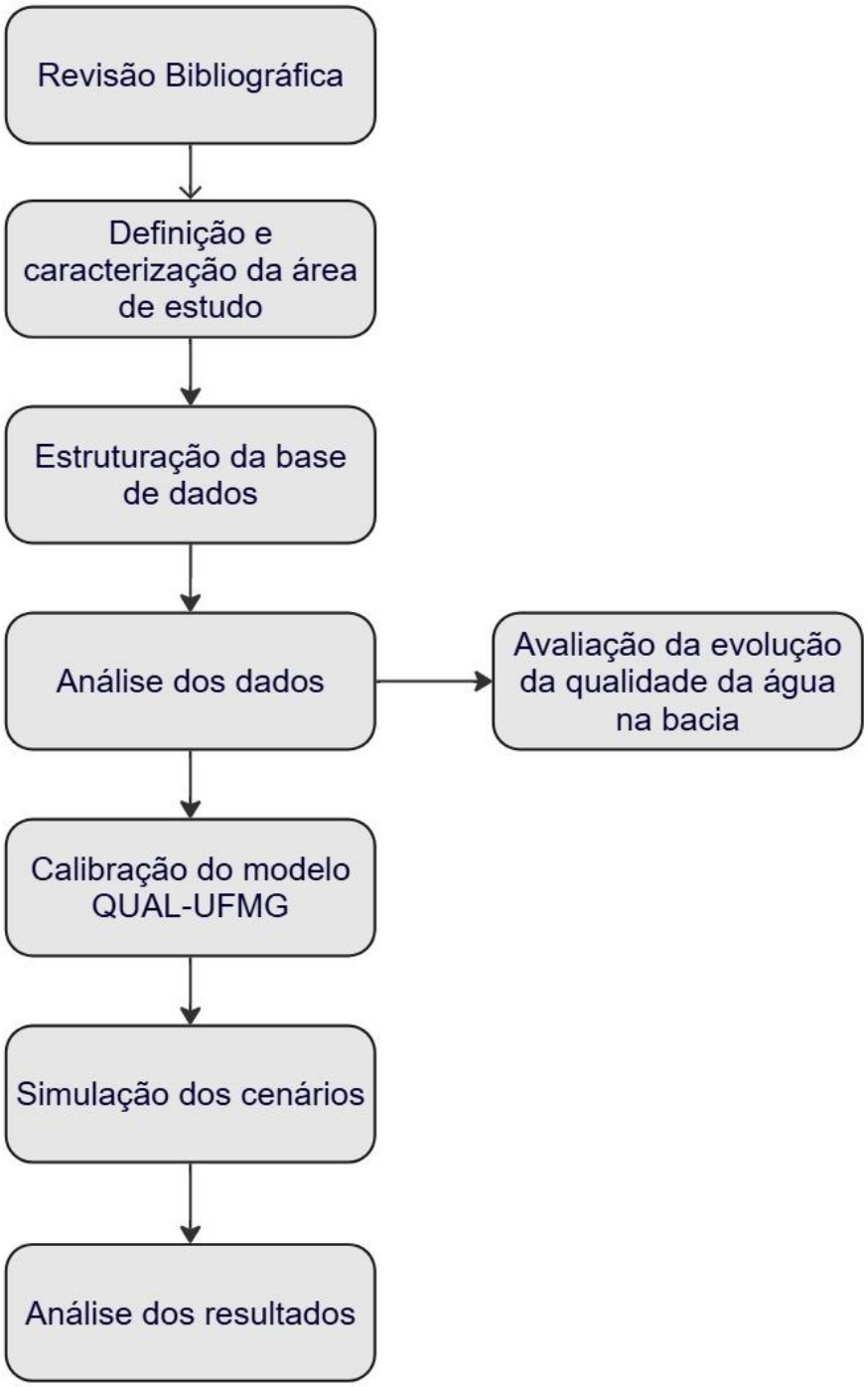



Figura 4. 1 - Fluxograma das etapas metodológicas do desenvolvimento do trabalho.

### 4.2.1 Caracterização da área de estudo

#### 4.2.1.1 Descrição Geral

O ribeirão Sobradinho está localizado na região administrativa de Sobradinho, no Centro-Norte do Distrito Federal. A bacia hidrográfica do ribeirão Sobradinho possui uma área total

de aproximadamente 146 km², e o rio principal, desde a nascente até a foz, tem uma extensão de 29 km. O ribeirão é formado por diversas nascentes até desaguar no rio São Bartolomeu (Figura 4. 2) e está inserido na região hidrográfica do rio Paraná, como mencionado anteriormente.

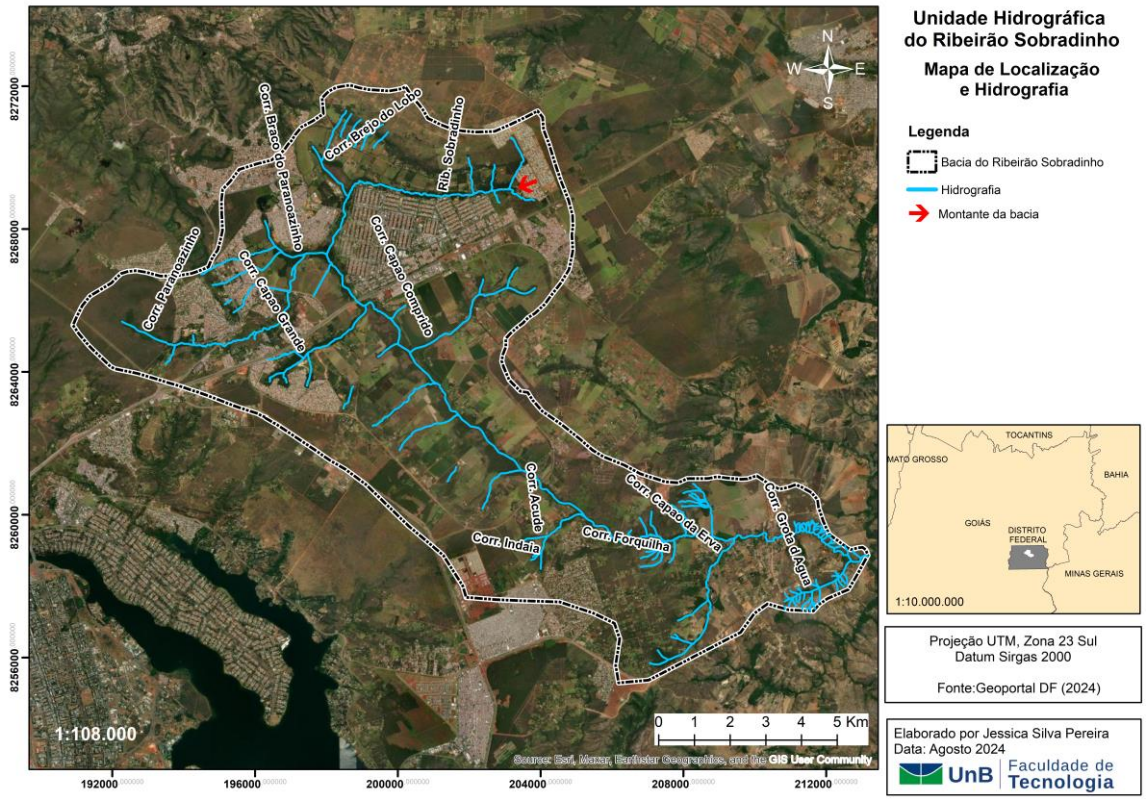



Figura 4. 2 - Mapa de Localização e Hidrografia da bacia do Ribeirão Sobradinho.

Na Figura 4. 3 é mostrado os pontos de interesse e de monitoramento na bacia do Ribeirão Sobradinho. A ADASA monitora a qualidade da água do exutório do Ribeirão disponibilizando dados a cada três meses e disponibilizada no Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos do DF, tendo dados de diversos parâmetros que podem sem acessados através de uma plataforma de Power-BI. Além disso, a CAESB possui mais cinco pontos de monitoramento, sendo eles:

- 010 RB: próximo a nascente do Ribeirão;
- 020 RB: a montante da ETE Sobradinho;
- 030 RB: 1km após o ponto de lançamento da ETE Sobradinho;
- 040 RB: 8km o ponto de lançamento da ETE Sobradinho;
- 050 RB: exutório do Ribeirão.

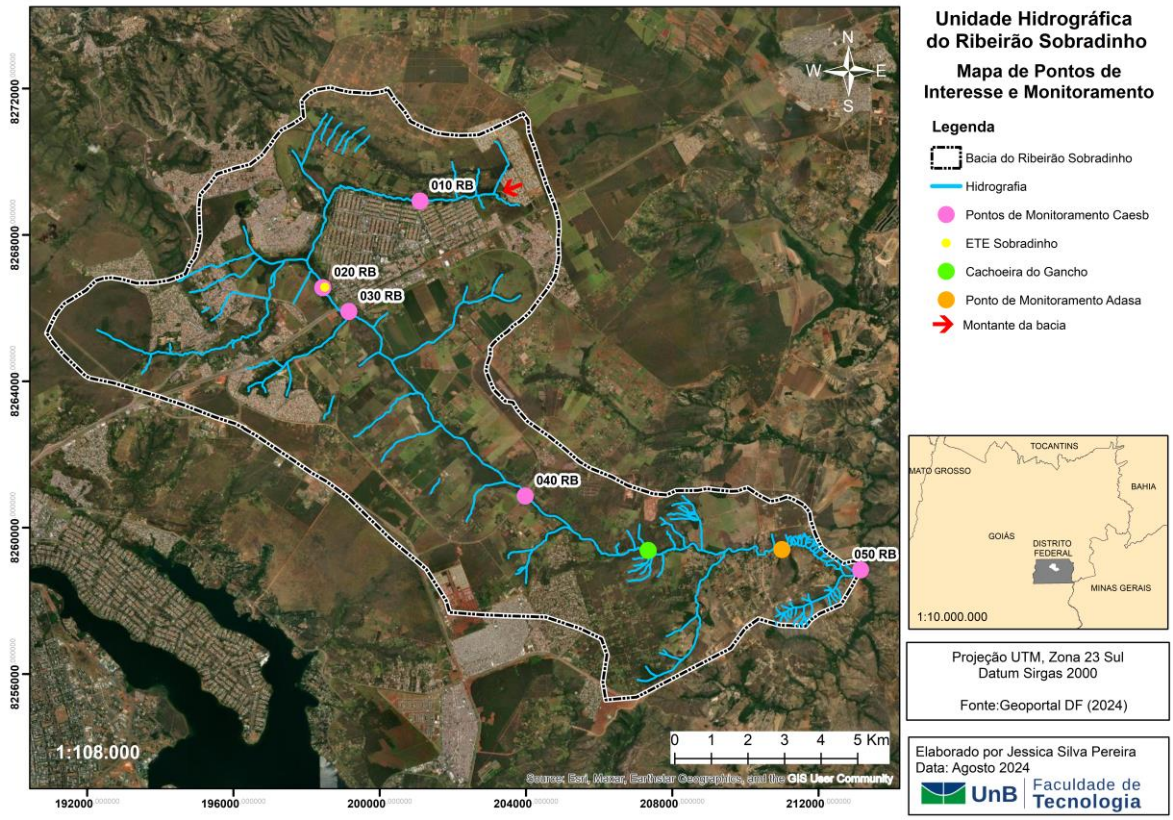



Figura 4. 3 - Mapa de Pontos de Interesse e Monitoramento da bacia do Ribeirão Sobradinho.

#### 4.2.1.2 Clima

O clima no DF, de acordo com a classificação de Köppen, é predominantemente tropical, onde se têm duas estações distintas: quente e úmida - de outubro a abril, e seca - de maio a setembro, sendo julho normalmente o mês mais frio do ano. As temperaturas médias anuais variam entre 19 °C e 23 °C. O período mais quente ocorre entre setembro e outubro, no qual a média histórica das temperaturas mais altas chega a 30 °C. O período mais frio ocorre entre junho e julho, meses em que as temperaturas mais baixas chegam a 13 °C. A bacia do Ribeirão se encontra majoritariamente, no tipo climático tropical (Aw) possuindo temperaturas superior a 18 °C para o mês mais frio. Ademais, a precipitação anual no DF varia entre 1.100 mm e 1.600 mm. (Codeplan, 2020)

Para entendimento melhor da pluviosidade na área da bacia, usou-se a estação pluviométrica 1547015 – ETE Sobradinho. Nas Figuras Figura 4. 4 e Figura 4. 5 são apresentadas, respectivamente, a precipitação mensal e anual registradas pela estação pluviométrica da ETE Sobradinho, em uma série histórica de 49 anos (1973 a 2022), de acordo com os dados baixados no Portal HidroWeb gerenciado pela ANA.

Pode-se observar na Figura 4. 4 que a precipitação segue o padrão sazonal já esperado pela área de estudo. Entre os meses de maio e setembro, que correspondem ao período seco, registram-se os menores índices de precipitação. Nos demais meses, que fazem parte da estação chuvosa, a média de precipitação se aproxima de 165mm. Junho se destaca como o mês com o menor índice de precipitação, com apenas 5 mm, enquanto dezembro apresenta o maior volume de chuvas, atingindo 236 mm.

Já na Figura 4. 5, mostra a variação da quantidade total de precipitação ao longo dos anos. Mostra-se uma variação significativa entre os anos, onde existem anos mais chuvosos, como 1974, com uma média de 171 mm, e 1983, com 161 mm, enquanto anos menos chuvosos, como 1996 (78,2 mm), 2002 (74,2 mm) e 2007 (79,0 mm). Não se observa uma tendência clara nessa variação, sugerindo que as variações estão ligadas a eventos climáticos ou mudanças no regime de chuvas.

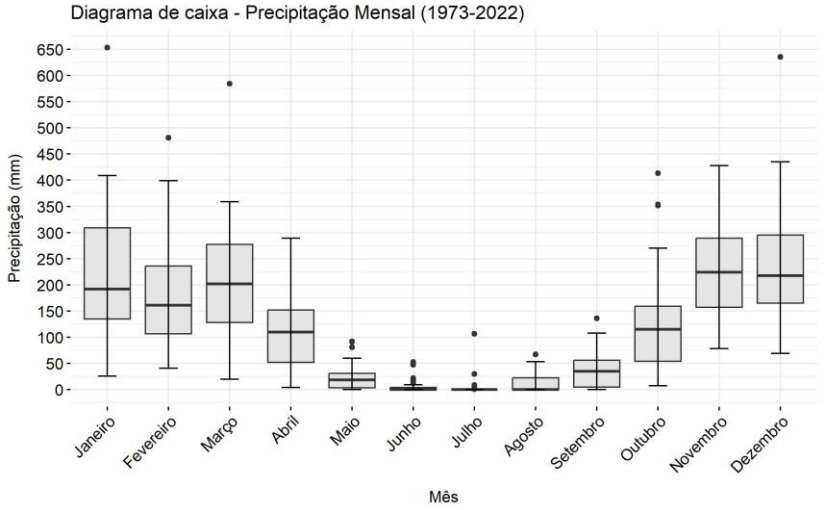



Figura 4. 4 - Gráfico da precipitação mensal da estação 1547015.

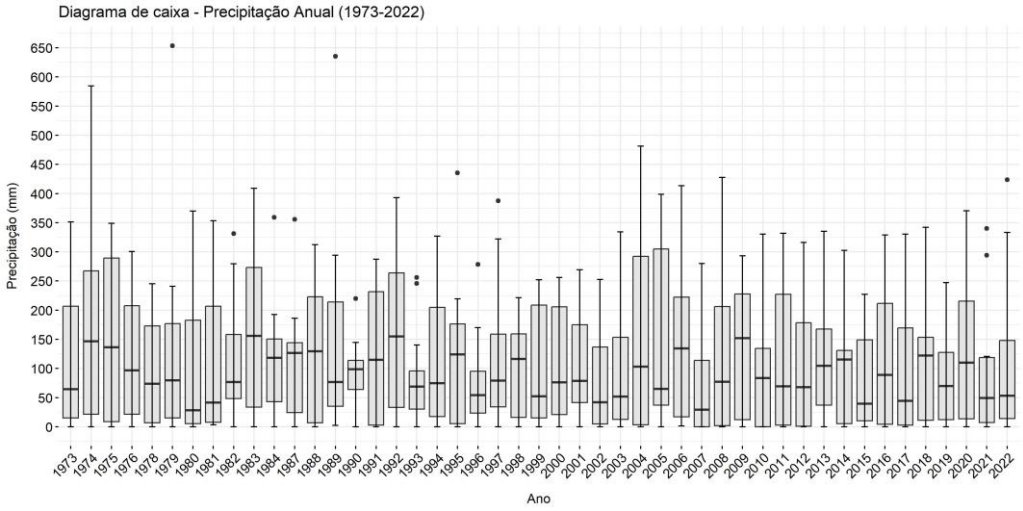



Figura 4. 5 - Gráfico da precipitação anual da estação 1547015.

#### 4.2.1.2 Hipsometria

A hipsometria tem como objetivo representar a altitude de uma área, ou seja, apresentar os desníveis existentes entre os pontos que constituem a superfície do terreno (Ibrahin, 2014). Em um mapa hipsométrico usa-se cores para representar as variações de altitude.

Na Figura 4. 6, temos o mapa hipsométrico da bacia do Ribeirão Sobradinho, que mostra as áreas de maior altitude localizadas a leste e oeste, nas cabeceiras da bacia. Destaca-se que a região urbanizada está situada nas áreas altas da bacia, com altitudes variando entre 1045 m e 1120 m. As altitudes mais baixas estão concentradas no exutório da bacia, onde o Ribeirão encontra com o rio São Bartolomeu.

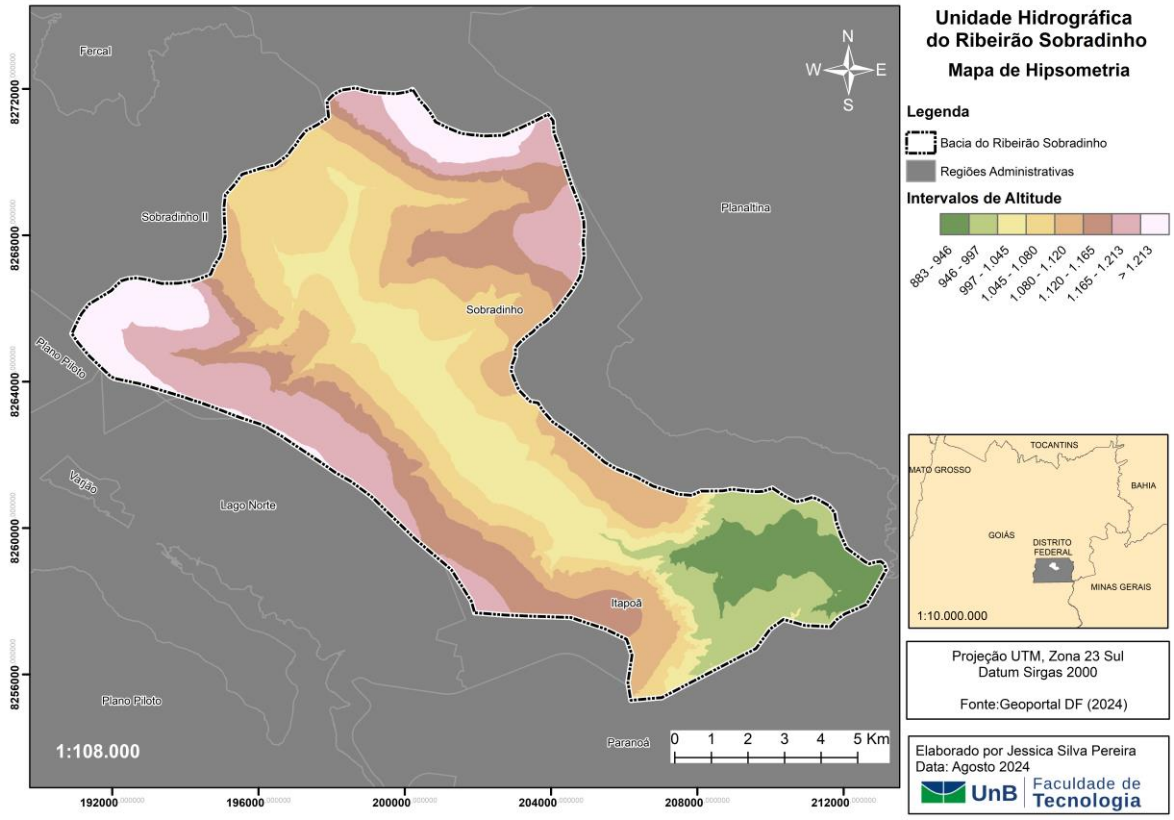



Figura 4. 6 - Mapa Hipsométrico da bacia do Ribeirão Sobradinho.

#### 4.2.1.4 Relevo

As classes de relevo podem ser classificadas como (EMBRAPA,2018):

- “Plano – área de topografia horizontal, com desníveis muito pequenos e declividade menor que 3%;
- Suave ondulado – área de topografia pouco acidentada, constituída de colinas ou outeiros, com diferenças de níveis de 50 a 100 m e com declividades de 3 a 8%;

- Ondulado – área de topografia pouco acidentada, constituída de colinas ou outeiros, com declividades de 8 a 20%;
- Forte ondulado – área de topografia acidentada, formada de outeiros ou morros, com diferenças de níveis de 100 a 200 m e declividade de 20 a 45%;
- Montanhoso – área de topografia acidentada, constituída de morros e montanhas, com declividades de 45 a 75%;
- Escarpado – áreas escarpadas (aparado, itaimbé, frente de costa, falésia e flanco de serra), com declividades maiores que 75%.”

A maior parte da bacia está localizada em relevos planos, variando entre plano e suave ondulado, o que é uma característica geral do Distrito Federal, por se tratar de um planalto central. A jusante da bacia, observam-se áreas de relevo escarpado, onde estão situadas as cachoeiras da região (Figura 4. 7).

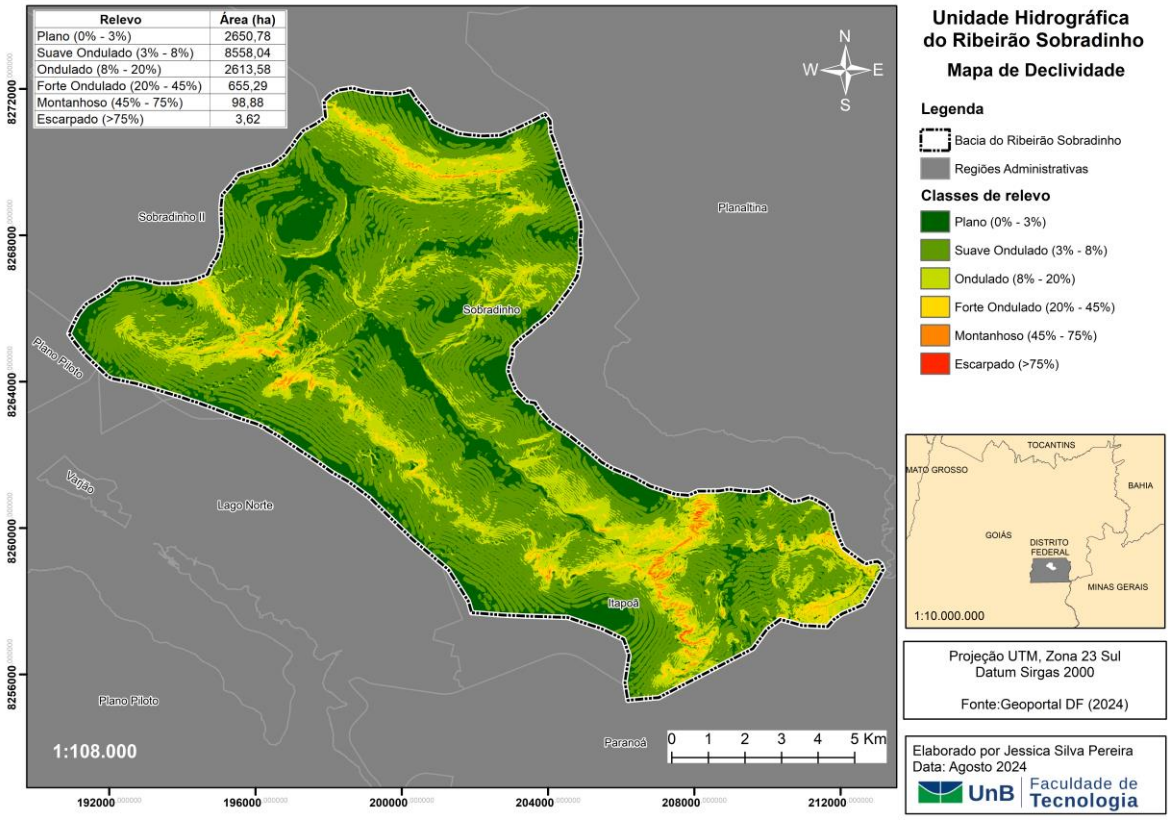



Figura 4. 7 - Mapa de Declividade da bacia do Ribeirão Sobradinho.

#### 4.2.1.5 Pedologia

Na região da bacia de estudo, foram encontradas as seguintes classes pedológicas: Cambissolo Háplico Tb Distrófico, Neossolo Litólico Distrófico, Latossolo Vermelho

Distrófico e Latossolo Vermelho Ácrico. Entre esses, 60% dos solos são latossolos, seguidos por cambissolos (3%) e uma pequena proporção de neossolos (0,3%). Além de que cerca de 33% são solos classificados como antropogênicos por estarem localizados em áreas urbanas e sofrerem diversos tipos de modificações (Figura 4. 8).

Os latossolos são o tipo de solo com maior ocorrência no Distrito Federal, são típicos de relevos planos e suaves, caracterizados por serem altamente evoluídos e intempirizados. Apresentam uma profundidade alta, uma textura que varia de média a muito argilosa, além de apresentarem coloração avermelhadas. Por outro lado, os cambissolos são típicos de relevos acidentados e podem apresentar material concrecionário e cascalhos. São menos evoluídos em comparação com os latossolos, rasos e possuem textura variando entre argilosa a franco-arenosa. (Codeplan, 2020)

Os neossolos são solos pouco evoluídos, frequentemente encontrados em relevos fortes. São jovens e pouco intemperizados, constituídos predominantemente por material mineral, mas também podem conter matéria orgânica. Esses solos apresentam baixa profundidade e podem possuir afloramentos rochosos. (Bertollo, 2021)

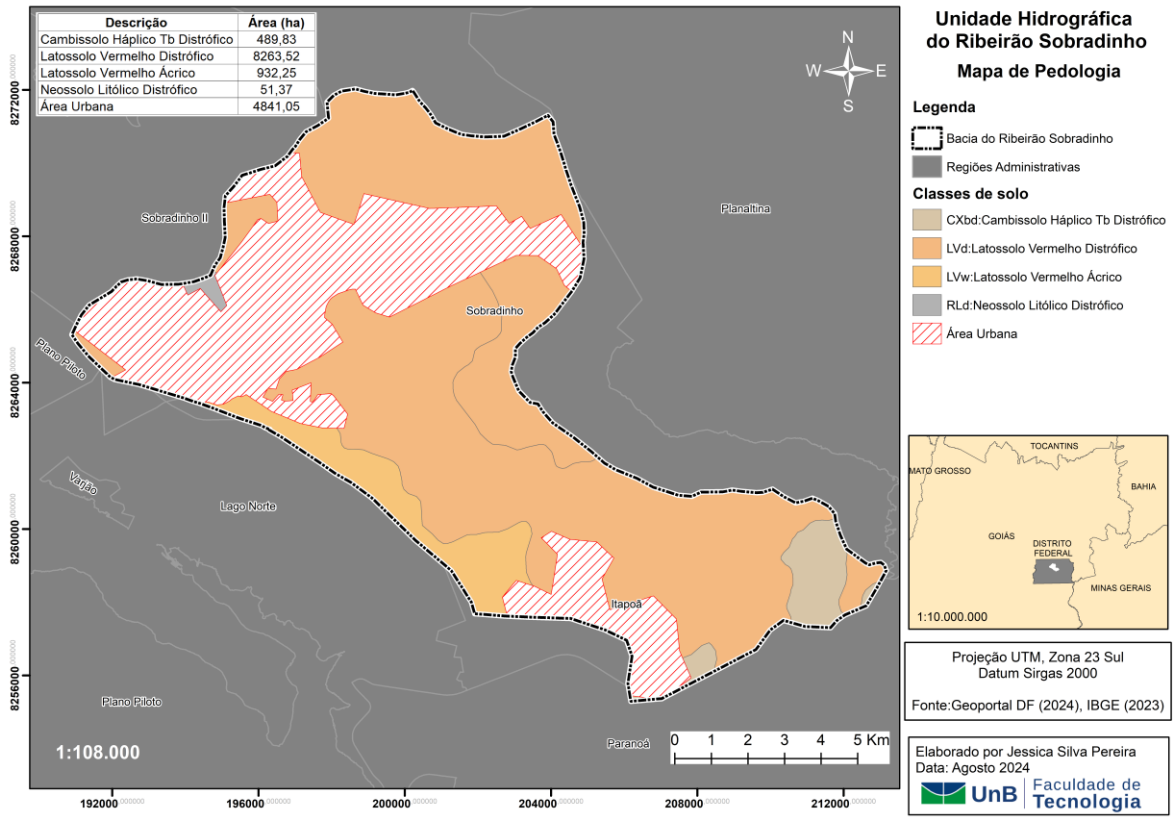



Figura 4. 8 - Mapa de Pedologia da bacia do Ribeirão Sobradinho.

#### 4.2.1.6 Geologia

A bacia está inserida na região de predominância do conjunto litológico Paranoá, predominante na maior área do DF (Figura 4. 9). No qual, é composto pelas seguintes rochas: quartzito conglomerático fino, metassiltitos, ardósias, metarritmito arenoso, quartzito médio, metarritmitos argilosos e a unidade psamo-pelito-carbonatada. (Codeplan, 2020)

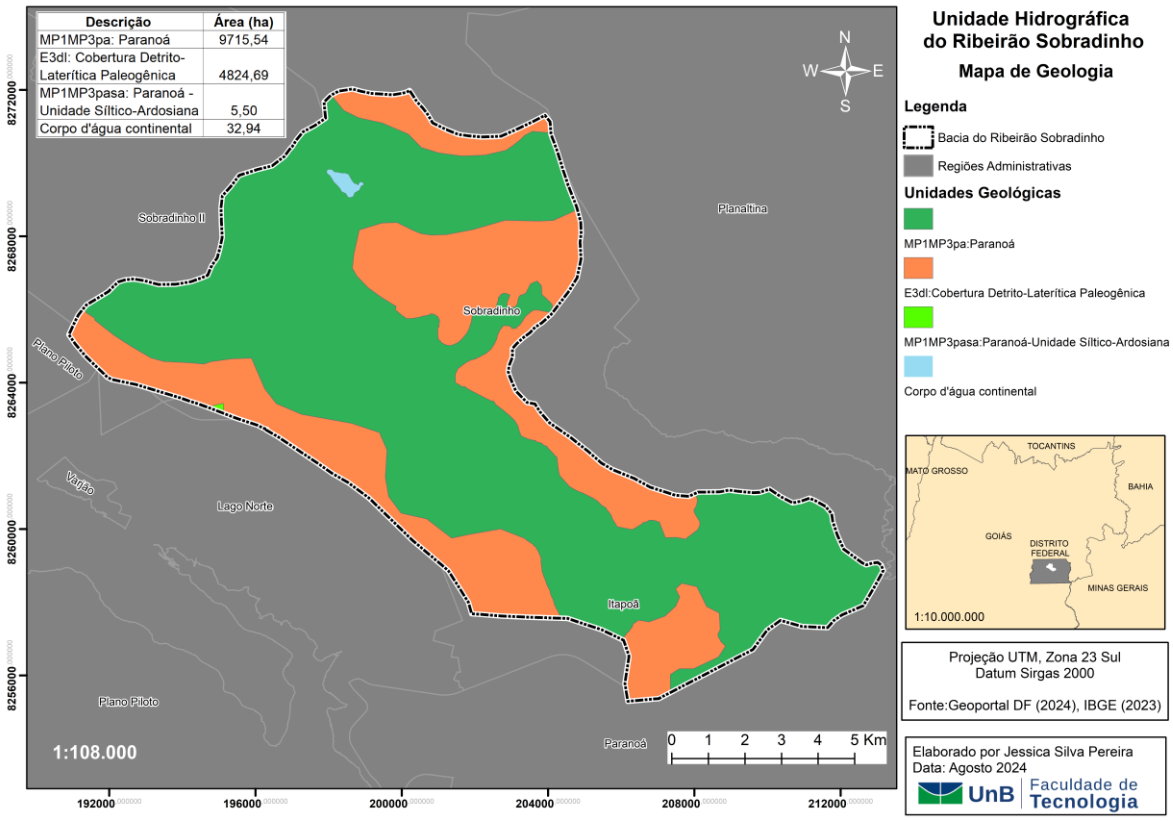



Figura 4. 9 - Mapa de Geologia da bacia do Ribeirão Sobradinho.

#### 4.2.1.7 Hidrogeologia

O Distrito Federal está situado na Província Hidrogeológica do Escudo Central, na qual são diferenciados dois grandes grupos de aquíferos: o Domínio Aquífero Poroso e o Domínio Aquífero Fraturado (Codeplan, 2020). A área da bacia se encontra predominante no grupo de domínio fraturado.

Na Figura 4. 10, mostra os tipos de aquíferos da região, sendo eles: Depósito Aluvinar (Qa), Canastra Paracatu (NP1cpa), Paranoá 4 unidade rítmica pelito-carbonatada (MPpa4) e Paranoá 3 unidade rítmica quartzítica intermediária (MPpa3 e MPpa3qt).

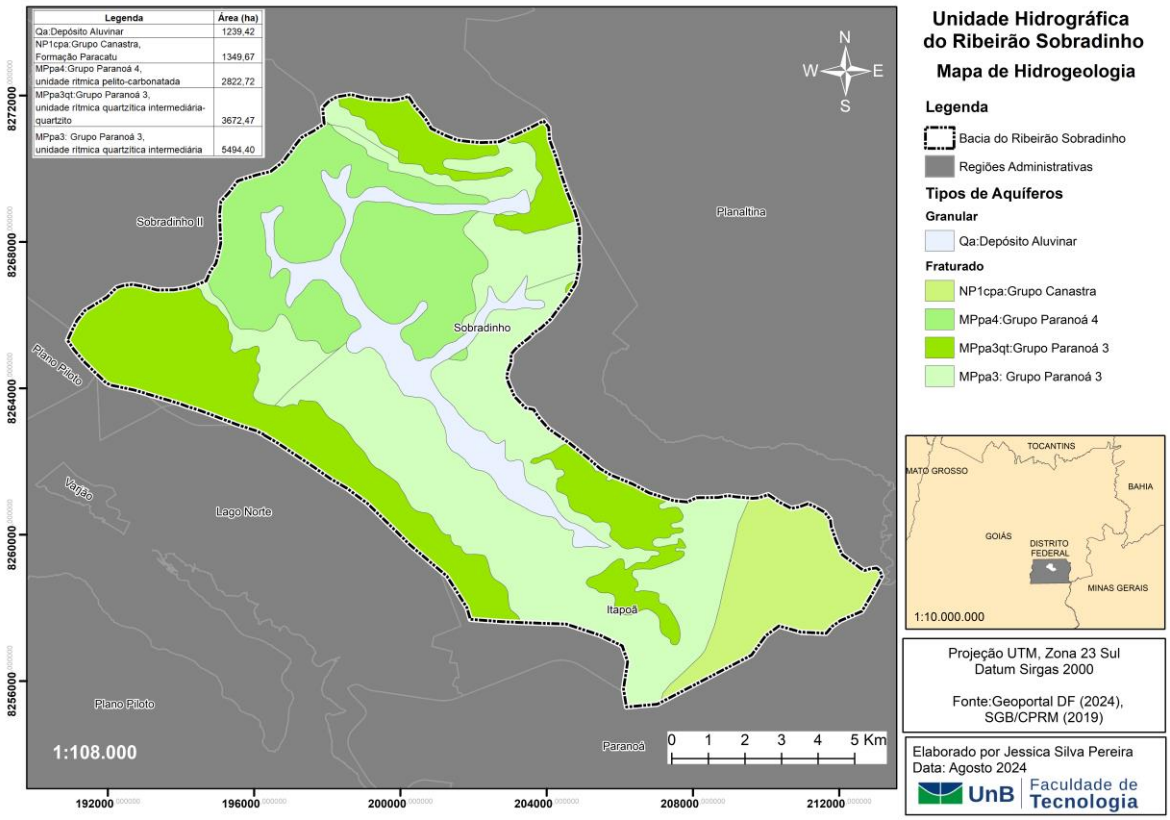



Figura 4. 10 - Mapa de Hidrogeologia da bacia do Ribeirão Sobradinho.

Na Tabela 4. 4, são apresentadas as características dos aquíferos identificados na bacia, conforme os dados elaborados pelo Serviço Geológico do Brasil. A tabela resume as principais propriedades hidrogeológicas, a produtividade e a qualidade da água dos aquíferos, oferecendo uma visão geral detalhada sobre suas condições.

Tabela 4. 4 - Resumo das características dos tipos de aquíferos na bacia do Ribeirão Sobradinho.

Fonte: Adaptado de SGB.

| Unidades hidroestratigráficas | Características hidrogeológicas | Qualidade |
|---|---|---|
| Depósito Aluvinar (Qa) | Aquíferos livres, porosos e descontínuos, com superfície freática rasa e recarga por infiltração. Possuem alta porosidade e permeabilidade, mas baixa transmissividade devido à pequena espessura. Vazões entre 1 e 10 m³/h. | Boa qualidade, mas bastante vulnerável a contaminação antrópica. |
| Canastra Paracatu (NP1cpa) | Aquífero livre, fissural e anisotrópico, com extensão regional. Registra surgências em poços, indicando condições de confinamento local. Vazões entre 1 e 10 m³/h. | Boa qualidade natural, com pH em torno de 6,5, sendo apropriadas para o consumo humano. |

| Unidades hidroestratigráficas | Características hidrogeológicas | Qualidade |
|---|---|---|
| Paranoá 4 unidade rítmica pelito-carbonatada (MPpa4) | Essas unidades formam um aquífero livre, fissural, anisotrópico e descontínuo, com potencial cárstico. Em Sobradinho a vazão pode ultrapassar 10 m³/h, devido à estrutura local e ao relevo, que favorecem a recarga e o fluxo de água subterrânea. Vazões entre 1 e 25 m³/h e vazão média é de 5 m³/h. | Boa qualidade natural, apropriadas para o consumo humano. No entanto, podem ocorrer valores de pH acima de 7,0 e alta dureza devido à presença de rochas carbonáticas. |
| Paranoá 3 unidade rítmica quartzítica intermediária (MPpa3 e MPpa3qt) | As unidades formam um aquífero livre, fissural, anisotrópico, heterogêneo e descontínuo. Registra surgências em poços, indicando condições de confinamento local. A unidade MPpa3 possui vazões mais altas que a média perto de Sobradinho. Vazões entre 1 e 25 m³/h. Mpa3q tem uma vazão média de 13 m³/h, enquanto a MPpa3 tem uma média de 9,6 m³/h. | Boa qualidade natural, adequada para consumo humano |

### 4.2.2 Análise da qualidade da água do ribeirão Sobradinho entre 2013 e 2022

A análise da qualidade da água do Ribeirão Sobradinho foi conduzida através da avaliação das concentrações dos parâmetros ao longo dos anos e nos pontos de amostragem fornecidos pela CAESB. Foi empregada uma análise descritiva detalhada para avaliar a qualidade da água, utilizando métodos estatísticos, como diagramas de caixa, para uma avaliação mais minuciosa dos parâmetros críticos.

A planilha disponibilizada pela Companhia continha 3.450 registros, dos quais 433 estavam incompletos para os seguintes parâmetros: DBO (29), E. coli (5), Amônia (6), Nitrito (40), Nitrato (50), PT (13), SDT (285) e Turbidez (5). Esses registros foram excluídos da análise, resultando em um total de 3.017 registros válidos. O total de amostras por ano é apresentado na Figura 4. 11.

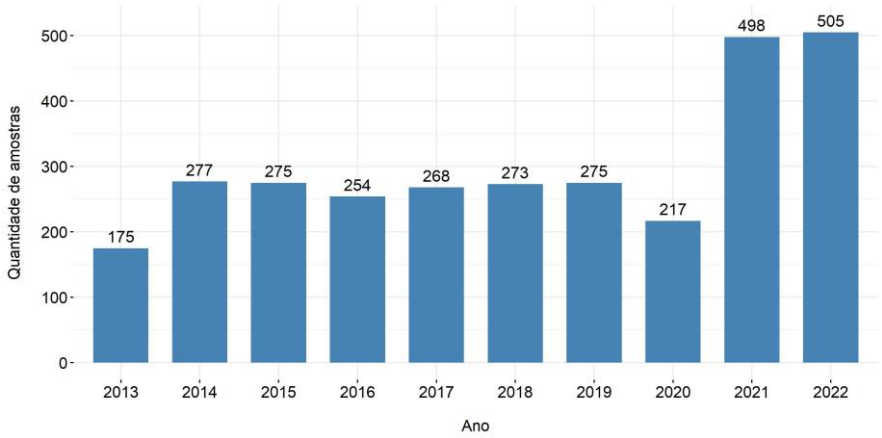



Figura 4. 11 - Gráfico do total de amostras por ano.

Os parâmetros considerados para a avaliação, conforme os padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para a Classe 3, incluem: pH, Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Amônia (ajustada para pH 7,5 de acordo com a frequência histórica dos dados), Nitrito, Nitrato, Fósforo Total (PT), Turbidez, Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Coliformes Termotolerantes (E. coli). Para este último, utilizou-se o valor máximo permitido (VMP) do uso mais restritivo da classe.

A análise focou especialmente nos parâmetros prioritários para o enquadramento, conforme a Resolução nº 02, de 17 de dezembro de 2014 (CRH-DF), que são: DBO, OD, fósforo total, coliformes termotolerantes(E.coli) e nitrogênio total.

### 4.2.3 Mapeamento do uso e ocupação do solo

O mapeamento da bacia do Ribeirão Sobradinho foi realizado utilizando o software ArcGIS 10.8 e imagens multiespectrais do satélite CBERS-4A WPM, datadas de 10/07/2024. A presença de nuvens, inferior a 1%, não interferiu no mapeamento, sendo corrigida manualmente posteriormente.

As imagens foram obtidas no site do INPE e são provenientes do satélite de imagem óptica, operado em colaboração com o Centro Chinês de Recursos para Aplicação de Satélites e Dados (CRESDA) e o INPE, lançado em 2019. O satélite opera a uma altitude de 629 km, com inclinação de 97,9°, possui um período de 97,3 minutos e ciclo de repetição de 31 dias (INPE, 2024).

O sistema de coordenadas utilizado foi o SIRGAS 2000 UTM 23S, e a imagem raster gerada resultou da combinação das bandas multiespectrais 1, 2, 3 e 4, com resolução de 8 metros, formando uma composição RGB. A escala utilizada no mapeamento foi de 1:10.000

Com o shapefile da unidade hidrográfica de Sobradinho, obtido através do Geoportal, foi realizado o recorte da imagem, limitando à área da bacia. As classes de uso e ocupação do solo foram definidas com base no mapa do Geoportal - DF.

A classificação do uso e ocupação do solo foi realizada por meio do método de classificação supervisionada, no qual os tipos de uso foram previamente definidos manualmente e inseridos no software para que este pudesse realizar a classificação. Foram estabelecidas 10 classes: área urbana, mineração, solo exposto, formação florestal, formação savânica, formação campestre, agricultura, queimada, água e reflorestamento.

### 4.2.4 Modelagem da qualidade da água pela aplicação do modelo QUAL-UFMG

O trecho do ribeirão Sobradinho simulado no modelo QUAL-UFMG possui extensão de 29 km, e uma discretização de 100 metros para cada segmento. Para uma a realização da modelagem serão descritos a seguir os dados de entrada, coeficientes adotados e os cenários simulados.

Os dados de qualidade da água utilizados na entrada do modelo de qualidade referem-se ao ponto 010 do Ribeirão Sobradinho, localizado na cabeceira da bacia. Esses dados, fornecidos pela CAESB, cobrem o período de 2013 a 2022 e correspondem aos meses de estiagem no Distrito Federal, especificamente maio, junho e julho. Esses meses foram selecionados por apresentarem os menores índices de precipitação na bacia, como discutido no item 4.2.1.2 Clima.

Destaca-se que foram usadas as concentrações médias, porém somente para os dados de E.coli usou-se a mediana devido à alta dispersão dos dados disponibilizados e a ocorrência de valores extremos mais altos que elevam a média. Devido à disponibilidade apenas do dado de fósforo total, foi necessário realizar um ajuste, no qual o valor foi dividido em 50% para cada tipo de fósforo, orgânico e inorgânico, para realização da modelagem. Esse ajuste segue as recomendações de Von Sperling (2014), que indica que, em situações de baixa poluição e na ausência de dados detalhados sobre as frações, é adequado adotar valores que respeitem as classes de qualidade da água (como a Classe 2). A abordagem foi adotada para garantir uma modelagem que não superestime a concentração de qualquer fração de fósforo, respeitando as condições atuais do corpo hídrico

Os parâmetros utilizados e suas concentrações são mostrados na Tabela 4. 5.

Tabela 4. 5 - Dados de entrada para a qualidade da água do ribeirão Sobradinho.

| OD (mg/L) | DBO (mg/L) | Amônia (mg/L) | Nitrito (mg/L) | Nitrato (mg/L) | Fósforo Total (mg/L) | E.coli (NMP/100ml) | Temperatura (ºC) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7,2 | 1,74 | 0,43 | 0,129 | 2,37 | 0,03 | 3,10E+02 | 20 |

A vazão utilizada para o dado de cabeceira corresponde ao valor de Q7,10, igual a 0,037 m³/s, conforme dado da CAESB. Essa vazão foi escolhida devido à falta de dados específicos da cabeceira. Por essa razão, os valores dos parâmetros até o ponto 010 foram mantidos constantes, com o objetivo de aproximar o modelo o máximo possível da realidade.

Para a vazão final do Curso d'água, foi utilizada a média das vazões mínimas dos meses de seca (junho, junho e agosto), resultando em 0,50 m³/s, que é o critério atualmente

adotado pela ADASA para emissão de outorgas. Foi necessário adicionar uma vazão incremental para que o valor final atingisse 0,50 m³/s. Esse incremento pode ser explicado pela presença de outorgas, captações clandestinas ou águas subterrâneas que acabam diminuindo a vazão no corpo d'água (Figura 4. 12).

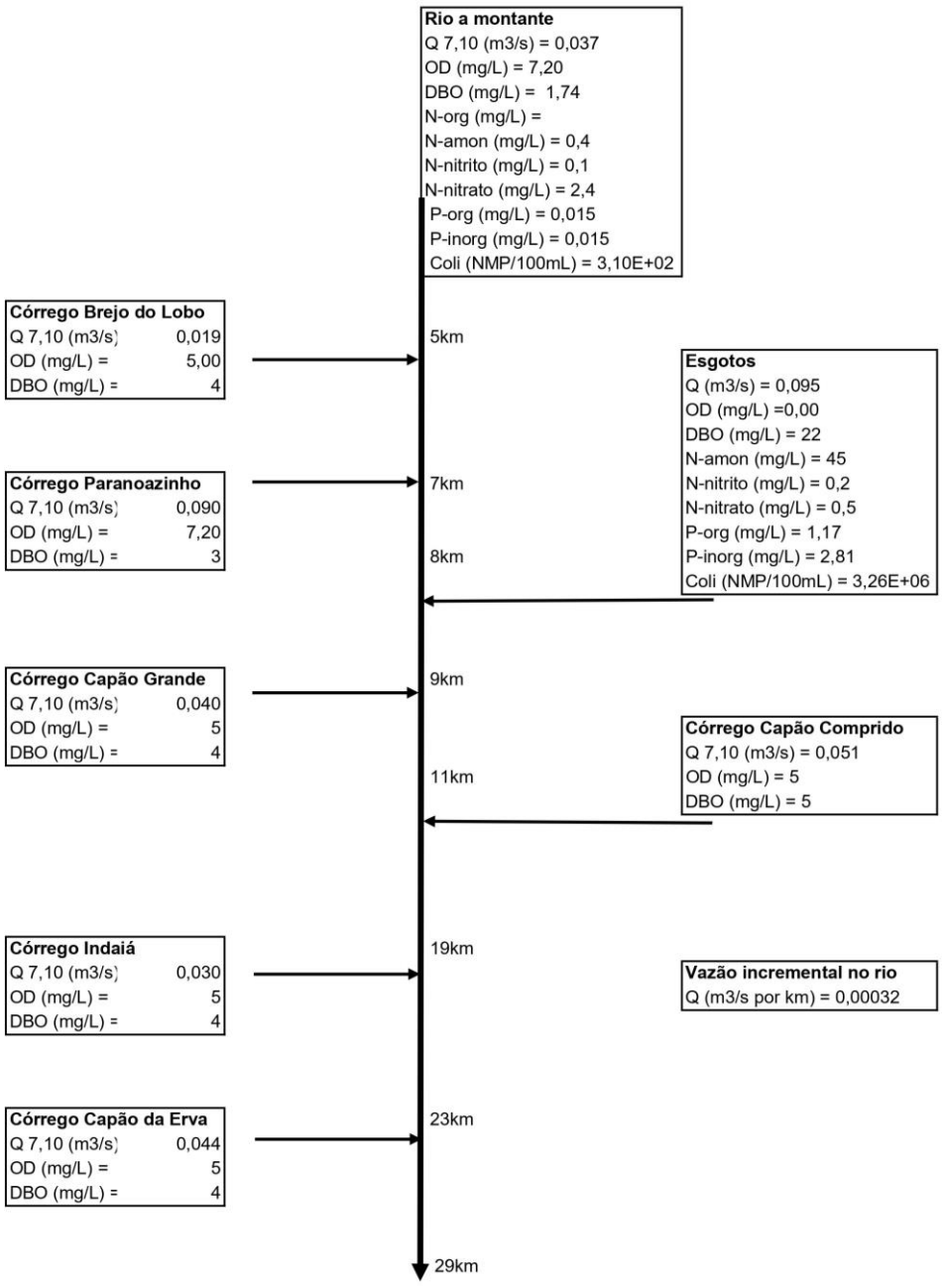



Figura 4. 12 - Diagrama Unifilar do percurso simulado do ribeirão Sobradinho contendo os dados relacionados às condições de contorno para a aplicação do modelo QUAL-UFMG.

As concentrações médias do efluente final da ETE Sobradinho também foram integradas ao modelo como uma das fontes de carga. No entanto, para a concentração de

DBO, foi utilizado o valor do primeiro quartil. Isso se deve ao fato de que, na análise descritiva dos valores de DBO da ETE, observou-se que a maioria dos dados está próxima ao primeiro quartil, como observado pela proximidade da mediana com o primeiro quartil. Essa abordagem foi adotada para garantir que o valor modelado se aproximasse mais do valor real. Além disso, foram incorporados na modelagem do Ribeirão os dados de Q7,10, DBO e OD dos tributários, conforme fornecido pela CAESB, como ilustrado no diagrama unifilar (Figura 4. 12).

Para a obtenção dos coeficientes a, b, c e d referentes aos dados físicos do rio, foram utilizados os dados históricos dos anos de 1995 a 2022 da estação fluviométrica 6047410. Seguindo as orientações de Von Sperling (2014), foi realizado um ajuste de correlação do tipo potência para estabelecer as equações de velocidade e profundidade em função da vazão. Esse procedimento resultou nas curvas-chave e, consequentemente, nos valores dos coeficientes. Na Figura 4. 13, mostram os ajustes obtidos para velocidade e profundidade respectivamente.

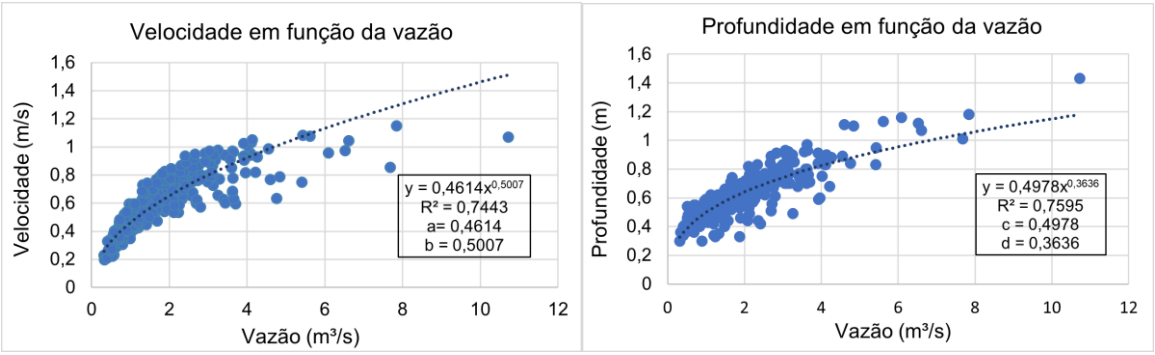



Figura 4. 13 - (a) Gráfico da correlação da velocidade em função da vazão; (b) Gráfico da correlação da profundidade em função da vazão.

Com a entrada dos dados, o próximo passo foi a calibração e análise de sensibilidade. Ambas foram realizadas manualmente, variando os valores dos coeficientes atrelados a cinética do modelo para minimizar a soma do erro quadrático e avaliando a sensibilidade em resposta a essas alterações nos coeficientes. Os coeficientes calibrados foram k1, kd e k2 e a variação foi realizada seguindo a discussão feita no item 3.5.1 Modelo -QUAL UFMG, onde a natureza de cada um deles foi detalhada.

Destaca-se que para o coeficiente k2, devido às características do corpo hídrico de baixas vazões, baixa profundidade, porém uma velocidade considerável atrelada a

declividade o coeficiente de reareação acaba tendo valores elevados que se distanciam dos descritos na literatura, como discutido por Brites (2019). Por isso, optou-se por calibrar esse coeficiente.

Os valores dos coeficientes k1 (coeficiente de desoxigenação), kd (coeficiente de decomposição da DBO) e k2 (coeficiente de reaeração), utilizados para a calibração do modelo são mostrados na Tabela 4. 6.

Tabela 4. 6 - Valores dos coeficientes aplicados para a melhor calibração do modelo.

| k1 | kd | k2 |
|---|---|---|
| 0,1 | 0,8 | 16 |

A Tabela 4. 7, mostra uma simplificação dos cenários realizados tendo como base o panorama do PDSB, os possíveis acréscimos de população na região e alternativa do reúso para agricultura de parte do efluente da ETE.

Tabela 4. 7 - Resumo dos cenários simulados.

| Cenários | Descrição |
|---|---|
| 1º cenário | População de projeto de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, mantendo a eficiência atual. |
| 2º cenário | População de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, adotando a eficiência esperada para 2040. |
| 3º cenário | População de 150 mil pessoas, mantendo a eficiência atual, porém com 75% do efluente da ETE destinado à reúso na agricultura. |
| 4º cenário | População de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, adotando a eficiência esperada para 2040 e com 75% do efluente da ETE destinado à reúso na agricultura. |

- 1º cenário

O primeiro cenário simula o que ocorreria se a ETE Sobradinho passasse a tratar o esgoto de uma população adicional de 200 mil pessoas, além da população de projeto de aproximadamente 150 mil pessoas (conforme estimativas do PDSB), mantendo a eficiência atual de tratamento.

As informações referentes a eficácia da remoção dos parâmetros pelo tratamento da ETE Sobradinho foram obtidas através do Painel Interativo de Informações dos Serviços de Abastecimento de Água e Esgoto, administrado pela ADASA. Os dados correspondem a média da eficiência da ETE nos meses de estiagem (junho, julho e agosto) no de 2022.

Para o cálculo da vazão média gerada foi calculada seguindo a Equação 4.1:

$$Qméd = \frac{Pop\,.\,QPC.\,R}{86400} \qquad (4.1)$$

Onde:

Qméd = vazão média de esgoto gerada, em l/s;

Pop = população estimada;

QPC = quota per capta de água, em l/hab.dia;

R = o coeficiente de retorno água/esgoto.

O valor adotado que QPC foi de 134 l/hab.dia correspondente a média do consumo dos meses de junho, julho e agosto no ano de 2022, retirado do painel interativo da ADASA já mencionado. A população estimada é a do cenário de 200 mil pessoas e o coeficiente de retorno adotado foi 0,8 bastante usado nas boas práticas da engenharia e em diversas literaturas. O valor obtido para Qméd foi somado com a vazão atual da ETE.

Na Tabela 4. 8, são apresentados o valor da vazão resultante, as concentrações do afluente (esgoto bruto) e do efluente final da ETE, juntamente com suas respectivas eficiências de remoção.

Tabela 4. 8 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção no período de junho a agosto de 2022 e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas. Fonte: Adaptado de ADASA.

| Parâmetros | Concentração Afluente | Concentração Efluente final | Eficiência Remoção atual |
|---|---|---|---|
| DBO (mg/L) | 537,52 | 17,49 | 96,76% |
| Nt (mg/L) | 90,44 | 62,56 | 30,83% |
| Pt (mg/L) | 10,66 | 6,08 | 42,92% |
| E.coli (NMP/100ml) | 1,30E+07 | 1,50E+06 | 88,46% |
| Q méd (m³/s) | - | 0,248 | - |
| Q resultante (m³/s) | - | 0,095 + 0,248 = 0,343 | - |

- 2º cenário

O segundo cenário simula o impacto se a ETE Sobradinho passasse a tratar o esgoto de uma população adicional de 200 mil pessoas, além da população de 150 mil pessoas, mas agora com a eficiência esperada para 2040. Segundo o PDSB (2017), a ETE Sobradinho removerá nutrientes e realizando desinfecção do efluente final. A eficiência de remoção da DBO será a mesma do primeiro cenário devido ao fato da eficiência da ETE superou o

estimado pelo PDSB que era de 96%. Os valores das concentrações do afluente, os novos valores do efluente final da ETE e suas respectivas eficiências de remoção, de acordo com o PDSB, estão apresentados na Tabela 4. 9.

Tabela 4. 9 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção referente ao PDSB e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas.
Fonte: Adaptado de ADASA.

| Parâmetros | Concentração Afluente | Concentração Efluente final | Eficiência remoção conforme PDSB |
|---|---|---|---|
| DBO (mg/L) | 537,52 | 17,41 | 96,76% |
| Nt (mg/L) | 90,44 | 54,3 | 40% |
| Pt (mg/L) | 10,66 | 0,43 | 96% |
| E.coli (NMP/100ml) | 1,30E+07 | 1,30E+03 | 99,99% |
| Q resultante (m³/s) | - | 0,095 + 0,248 = 0,343 | - |

- 3º cenário

O terceiro cenário simula a população de 150 mil pessoas, sem acréscimo, mantendo a eficiência atual da ETE. Entretanto, 75% do efluente tratado sendo destinado ao reúso na agricultura. Logo, a vazão da ETE resultante da redução, as concentrações dos parâmetros e suas respectivas eficiências de remoção estão apresentadas na Tabela 4. 10.

Tabela 4. 10 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção no período de junho a agosto de 2022 e a vazão resultante ao desvio do efluente tratado.
Fonte: Adaptado de ADASA.

| Parâmetros | Concentração Afluente | Concentração Efluente final | Eficiência remoção atual |
|---|---|---|---|
| DBO (mg/L) | 537,52 | 17,49 | 96,76% |
| Nt (mg/L) | 90,44 | 62,56 | 30,83% |
| Pt (mg/L) | 10,66 | 6,08 | 42,92% |
| E.coli (NMP/100ml) | 1,30E+07 | 1,50E+06 | 88,46% |
| Q resultante (m³/s) | - | 0,095 - 0,07125 = 0,024 | - |

- 4º cenário

O quarto cenário é a junção dos de todos os 3, ou seja, a população de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, adotando a eficiência esperada para 2040 e com 75% do efluente da ETE destinado à reúso na agricultura. Na Tabela 4. 11, são

apresentadas as concentrações do afluente que chega à ETE, do efluente, além da eficiência de remoção projetada pelo PDSB e a nova vazão final.

Tabela 4. 11 - Média das concentrações dos parâmetros do afluente, do efluente final da ETE, a eficiência de remoção referente ao PDSB e a vazão resultante para uma população de 200mil pessoas com o desvio do efluente tratado.

Fonte: Adaptado de ADASA.

| Parâmetros | Concentração Afluente | Concentração Efluente final | Eficiência remoção conforme PDSB |
|---|---|---|---|
| DBO (mg/L) | 537,52 | 17,41 | 96,76% |
| Nt (mg/L) | 90,44 | 54,3 | 40% |
| Pt (mg/L) | 10,66 | 0,43 | 96% |
| E.coli (NMP/100ml) | 1,30E+07 | 1,30E+03 | 99,99% |
| Q resultante ($m^3/s$) | - | 0,343 - 0,257 = 0,086 | - |

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo tem como finalidade trazer os resultados da análise dos dados de qualidade da água do ribeirão Sobradinho (5.1 Análise da Qualidade da Água), do mapeamento do uso e ocupação do solo (5.2 Avaliação do impacto do uso e ocupação do solo na qualidade da água ) e a simulação pelo modelo QUAL-UFMG para os possíveis cenários do Ribeirão (5.3 Avaliação dos cenários previstos até 2040 para o ribeirão sobradinho).

## 5.1 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA

De modo geral, a maioria dos parâmetros analisados estão dentro da Classe 3 atendendo o enquadramento ao longo dos 10 anos de monitoramento. Na Figura 5. 1, é possível observar a quantidade de amostras em conformidade, ou seja, de acordo com o Valor Máximo Permitido (VMP) estabelecido para a classe do Curso d'água.

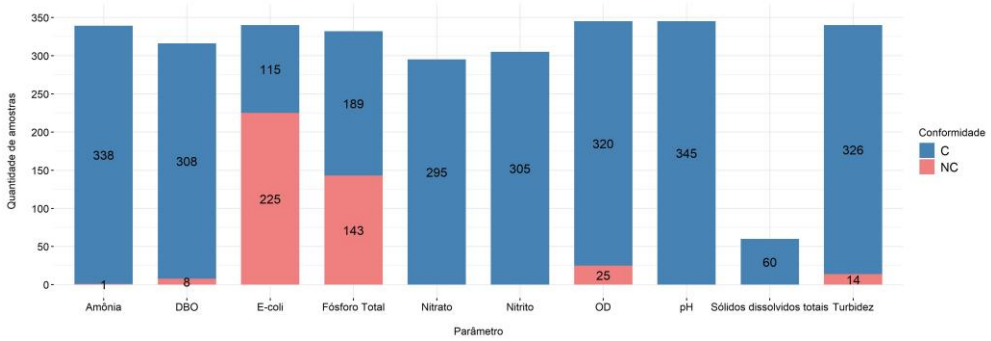



Figura 5. 1 - Gráfico de amostras conformes e não conformes de acordo com o parâmetro.

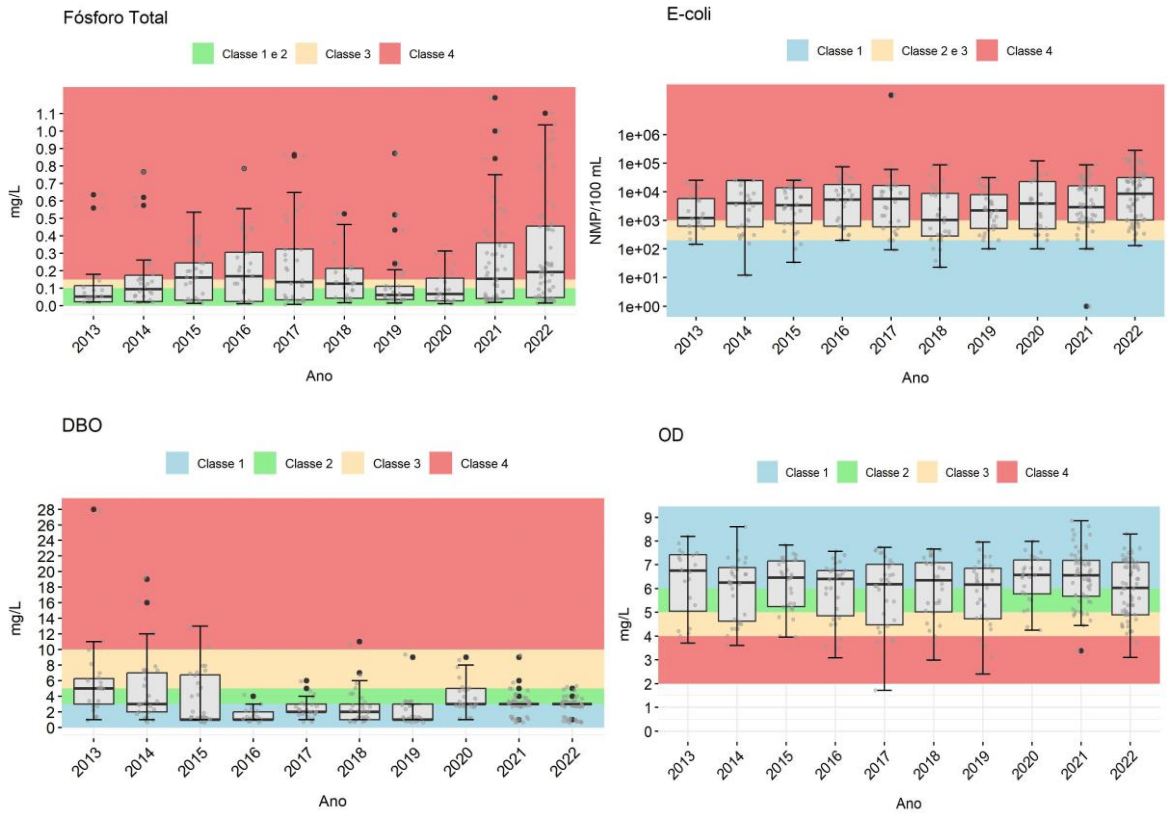
Os parâmetros mais problemáticos para a bacia do Ribeirão Sobradinho são E. coli e Fósforo Total, que apresentaram valores elevados em toda a série histórica analisada, impactando negativamente a qualidade da água. Amostras com os maiores níveis de fósforo total foram observadas, especialmente, nos meses de estiagem, quando o menor volume de água disponível no ribeirão resulta em maior concentração de poluentes. Em contraste, os maiores valores de E. coli ocorrem nos meses chuvosos, o que pode ser atribuído ao escoamento superficial, principalmente em áreas urbanas, que carrega sedimentos e outros poluentes de forma difusa. Esse fenômeno foi observado no estudo de Gasque (2019), que registrou uma amostra com altos níveis de poluentes após um período de chuva intensa no Ribeirão Sobradinho.

Observou-se uma melhoria nos níveis de fósforo entre 2018 e 2020, provavelmente em decorrência das reformas no tanque pulmão da ETE Sobradinho e da adoção do

tratamento primário quimicamente assistido no qual ocorre a precipitação do fósforo (Lima, 2021). No entanto, nos anos subsequentes, a mediana dos níveis de fósforo voltou a subir, permanecendo, na maior parte do tempo, com valores enquadrados na Classe 4, com destaque para a grande variação nas concentrações em 2022. Quanto à E. coli, há uma tendência crescente na mediana dos valores, com assimetria voltada para níveis mais altos, indicando um aumento constante ao longo dos anos analisados, mantendo-se dentro dos limites da Classe 4. Demonstrando um perigo para a população devido à presença de microrganismos patogênicos e ao fato de que recreações de primeiro contato ainda ocorrem nas cachoeiras ao longo do Ribeirão, mesmo não sendo permitido esse tipo de contato para a Classe 3.

A concentração de OD mostra-se consistentemente dentro da Classe 1 de qualidade da água ao longo dos anos, enquanto a DBO oscila entre as Classes 1 e 2. Em relação a DBO, observa-se uma redução gradual nos valores ao longo do tempo, podendo ser atribuída à melhoria na eficiência de tratamento desse parâmetro na ETE Sobradinho, com destaque para a eficiência de remoção de 97% atingida em 2022.

Quanto ao nitrogênio e suas formas (nitrato, nitrito e amônia), todos os parâmetros permanecem dentro da classe esperada. Na Figura 5. 2, mostra-se análise dos dados de qualidade da água do ribeirão sobradinho dos anos de 2013 a 2022.



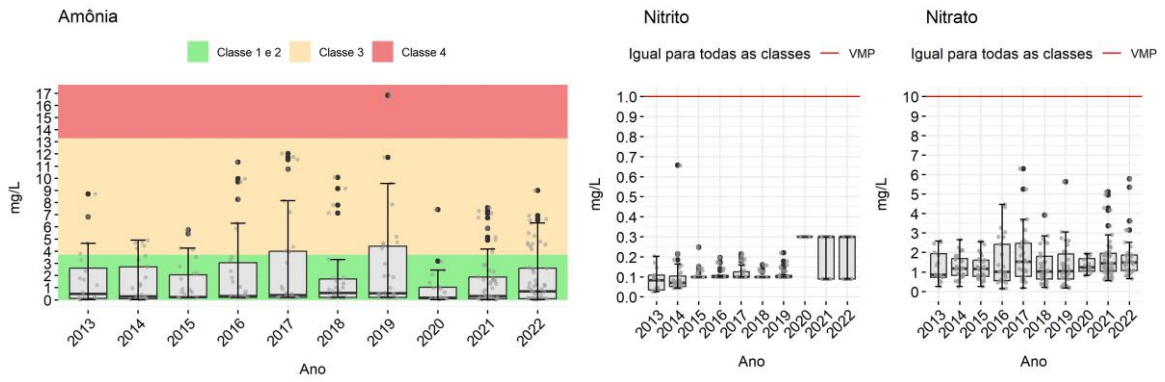



Figura 5. 2 – Análise dos dados de qualidade da água do ribeirão Sobradinho (DF) ao longo de 2013 a 2022. (Fonte dos dados - Caesb)

A maioria das medições do fósforo total nos pontos 010 e 020, enquadra-se na Classe 1 e 2 (Figura 5.3). No entanto, no ponto 010, próximo a nascente, existem outliers, com alguns dados inseridos na Classe 4, indicando possível contaminação difusa chegando nesse ponto, provavelmente causada por ocupações urbanas presentes na área de nascentes do Ribeirão, como o condomínio Alto da Boa Vista.

Nos pontos 030 e 040, localizados após o ponto de lançamento de efluentes tratados da ETE Sobradinho, há um aumento significativo nos níveis de fósforo, com a maioria dos valores enquadrados na Classe 4. Apesar de uma leve melhora no ponto 050, a mediana dos níveis de fósforo ainda permanece dentro dessa classe, evidenciando o impacto proveniente das cargas aportadas pela ETE Sobradinho, por ainda não possuir tecnologia voltada para remoção de nutrientes, o que pode explicar os valores elevados.

Em relação à E.coli (Figura 5. 3), a mediana das concentrações no ponto 010 indica que a maioria das amostras está dentro dos limites da Classe 3. No entanto, a presença de outliers e valores elevados aumenta a dispersão dos dados, evidenciando episódios de descarga de cargas poluidoras no Ribeirão. No ponto 020 a maior parte das amostras se encontram na Classe 4, com assimetria voltada para valores altos.

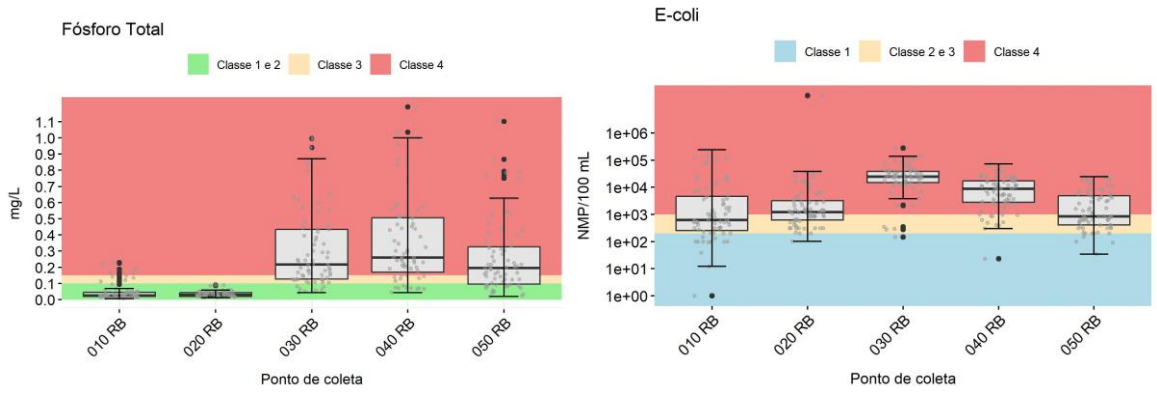
Isso indica que já existem poluentes atingindo a bacia desde o montante, sugerindo a possível entrada de esgotos clandestinos. Destaca-se também a presença de uma elevatória de esgoto bruto nas proximidades do ponto 010, onde, em casos de chuvas intensas, ocorrem lançamentos diretos de efluentes no Ribeirão, sem tratamento. Esse fato evidencia o problema dos sistemas de esgoto combinados com as águas de drenagem urbana, caracterizando uma contribuição significativa para o Corpo d'água e intensificando a contaminação observada.

Como esperado, os níveis de E. coli nos pontos após o lançamento da ETE são altos, especialmente no ponto 030, localizado 1 km a jusante do ponto de lançamento. Embora haja uma melhora no ponto 050, os valores ainda tendem a permanecer elevados, sendo enquadrados na Classe 4. Portanto, a concentração de E. coli está elevada em todos os pontos, e ao longo dos anos, os valores têm aumentado continuamente, indicando uma poluição consistente do Ribeirão e uma deterioração da qualidade da água.

A concentração de OD diminui logo nos pontos 030 e 040, logo após o lançamento do efluente da ETE devido ao consumo do OD pela carga orgânica remanescente. Apesar disso, a maioria dos valores está enquadrada na Classe 3 apresentando somente alguns outliers dentro da Classe 4. No ponto 050, a concentração de OD aumenta novamente, com valores enquadrados na Classe 1. Já a DBO se mantém consistentemente dentro da Classe 2 em todos os pontos de coleta, com a presença de outliers na Classe 4 nos pontos a jusante da bacia.

Quanto ao nitrogênio e suas formas (nitrato, nitrito e amônia), foram observados valores mais elevados de amônia nos pontos 030 e 040, provavelmente devido ao efluente da ETE Sobradinho, já que a amônia é um componente comum em efluentes de esgoto. No entanto, os valores ainda se mantêm dentro dos limites estabelecidos para a Classe 3.

O nitrito e o nitrato se mantêm dentro das classes esperadas em todos os pontos, porém, observam-se valores mais elevados após o ponto 040, o que pode ser atribuído aos processos de nitrificação ocorridos no corpo d'água.



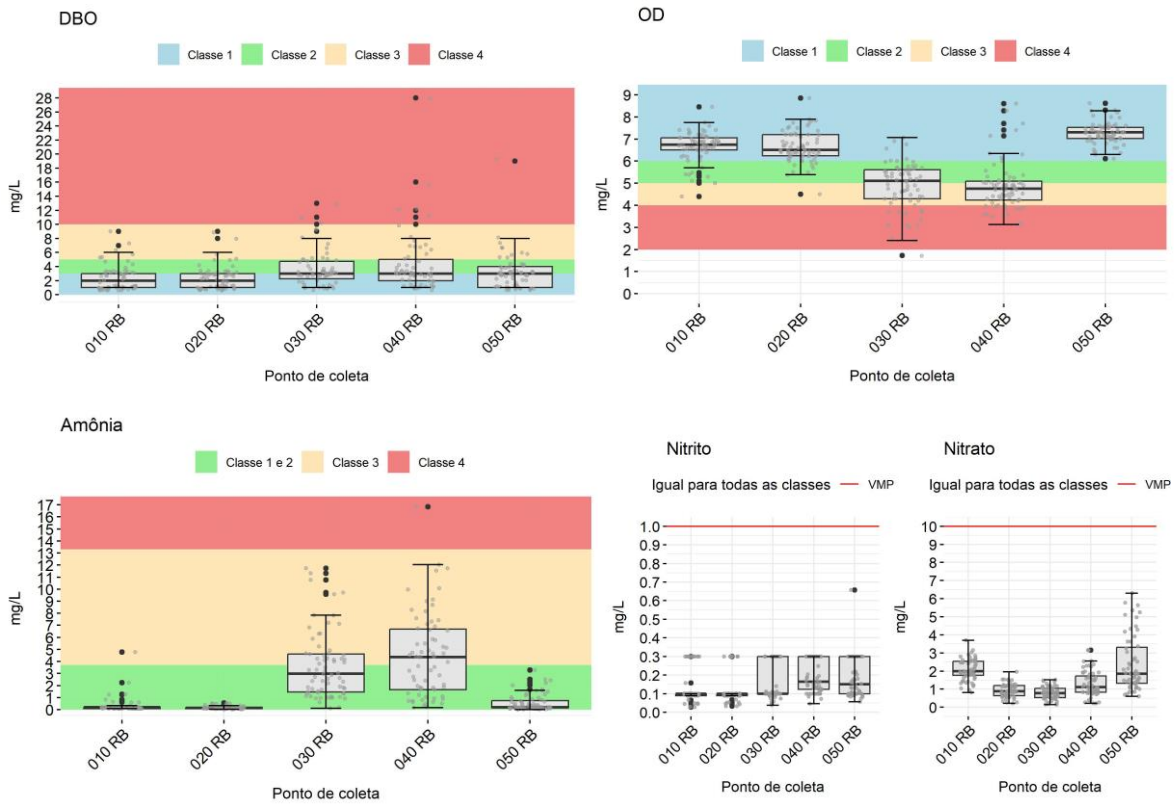



Figura 5. 3 - Análise dos dados de qualidade da água de cinco estações ao longo do ribeirão Sobradinho (DF) ao longo de 2013 a 2022 (Fonte dos dados - Caesb).

Apesar dos resultados apresentados indicarem adequação parcial à classe de Enquadramento, Classe 3, ressalta-se que, de acordo com Barbosa et al. (2021), a qualidade de água almejada pela comunidade da Bacia Hidrográfica, para a retomada dos usos históricos do Ribeirão, seria Classe 2. Observando-se os resultados, na maior parte do tempo, os parâmetros analisados se comportaram como Classe 3 ou 4. Dessa forma, fica evidente que os conflitos sociais existentes, na atualidade, tendem a se manter e ainda gerando graves riscos à saúde pública. Os altos níveis de E.coli são um risco, especialmente porque uma parte da população ainda utiliza o curso d'água para atividades recreativas. Essa situação se torna ainda mais preocupante para crianças, que são mais vulneráveis a doenças transmitidas pela água contaminada.

Além das outorgas destinadas à irrigação no corpo hídrico, os dados mostram um aumento nos níveis de E. coli em todos os pontos de amostragem. Isso gera preocupações, pois a água utilizada na irrigação pode estar contaminada com patógenos, representando mais um problema relacionado à saúde pública.

## 5.2 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NA QUALIDADE DA ÁGUA

A Figura 5. 4 apresenta o uso e ocupação do solo na bacia do ribeirão Sobradinho, com dados referentes até 10/07/2024. A área total da bacia é de 14.578 hectares, equivalente a 145,78 km².

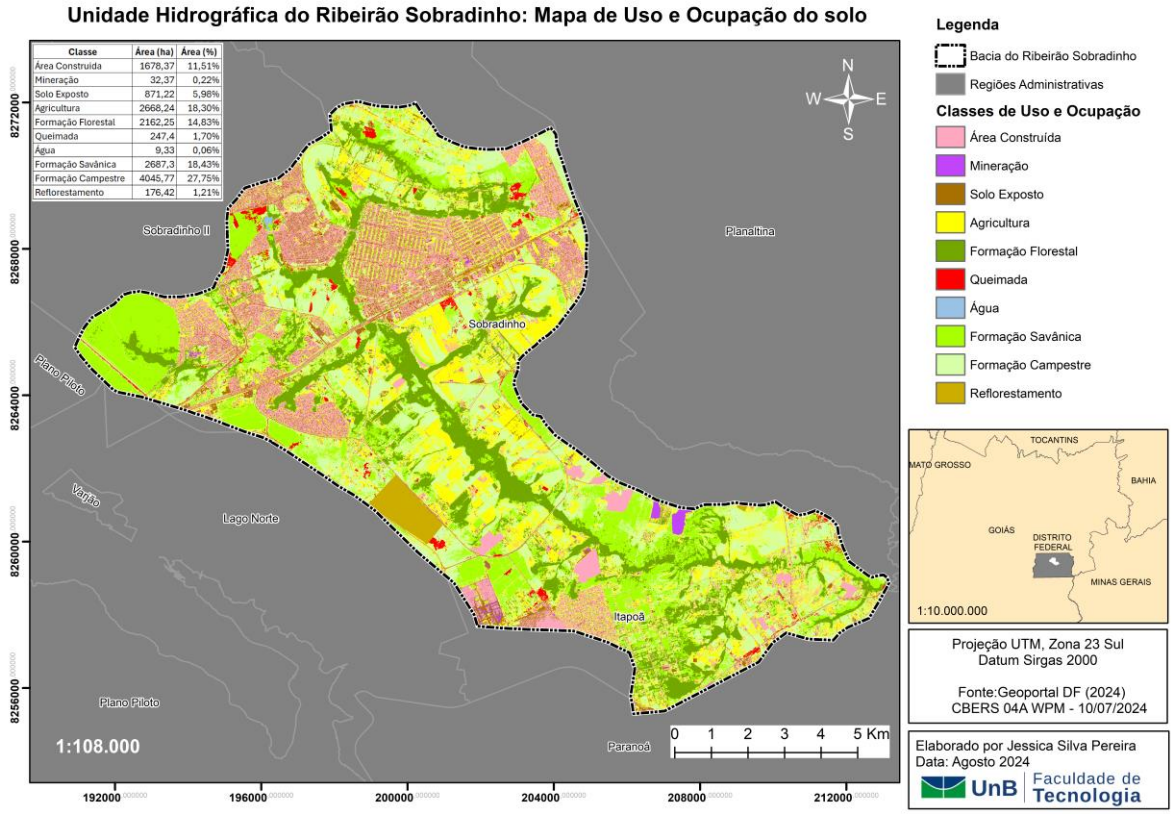



Figura 5. 4 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeiro Sobradinho no ano de 2024.

Devido à diversidade de vegetação presente, foi realizada uma divisão com base na densidade. A vegetação florestal, mais densa, está predominantemente localizada nas margens do ribeirão, desempenhando um papel crucial na proteção do corpo hídrico. As Áreas de Preservação Permanente (APP) são fundamentais para a qualidade da água, pois retêm poluentes, evitando que entrem em maior quantidade no ribeirão, além de prevenir a erosão do solo, o que reduz o assoreamento do corpo hídrico. (Código Florestal, Lei 12.651/2012)

As demais vegetações presentes são a formação savânica e a formação campestre. A formação campestre é caracterizada por campos abertos, enquanto a formação savânica apresenta uma vegetação que pode incluir arbustos e árvores de porte reduzido. No total, a

bacia do ribeirão Sobradinho possui aproximadamente 14% de formação florestal, 18% de formação savânica e 27% de formação campestre. Também se observa uma área de 176 hectares (1%) dedicada ao reflorestamento.

A área construída da bacia corresponde à área urbanizada, representando cerca de 12% da área total. Na Figura 5. 5, é apresentado o uso e ocupação do solo no ano de 2019, conforme o Geoportal - DF. Ao comparar com o cenário atual, observa-se que a área urbanizada aumentou ao longo desses cinco anos, fato confirmado pela implementação de novos empreendimentos dentro da bacia, como o Itapoã Parque.

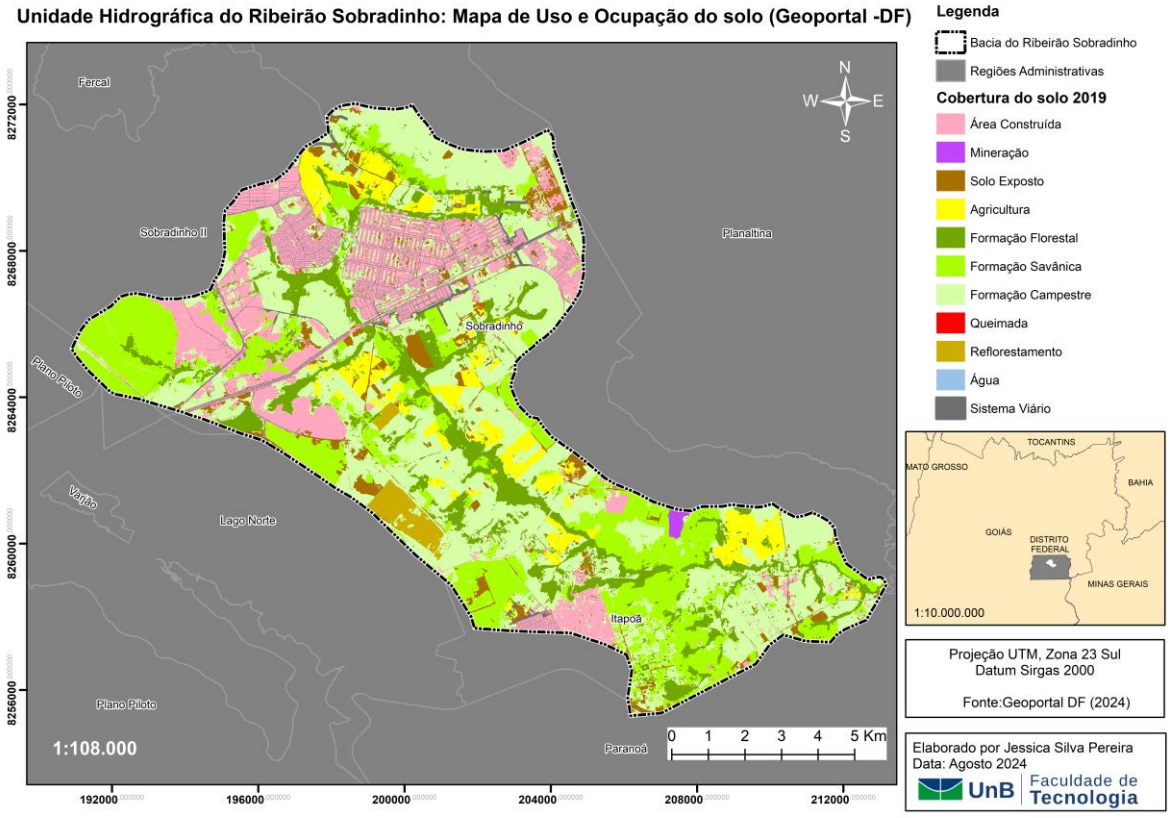



Figura 5. 5 - Mapa de uso e ocupação do solo na bacia do Ribeirão Sobradinho em 2019.

Fonte: Geoportal – DF, 2024.

O estudo de Muniz (2011) demonstra que a poluição oriunda das áreas urbanas impactou negativamente a qualidade da água do Ribeirão, indicando que a expansão urbana, especialmente com novos empreendimentos, pode piorar a qualidade da água. Isso se deve, principalmente, ao lançamento de esgoto sem tratamento e ao escoamento superficial das áreas impermeabilizadas, que acarretam lixo e sedimentos, os quais, por fim, podem chegar ao corpo hídrico. Além do esgoto tratado da ETE Sobradinho que, apesar da redução das

cargas poluidoras pelo tratamento realizado, ainda assim, configura-se como uma fonte pontual de poluição para o Ribeirão.

Foi observada uma quantidade significativa de áreas queimadas, devido à data da imagem coincidir com o período de seca, quando as queimadas são comuns no Distrito Federal. Além disso, em relação ao solo exposto, o sistema viário foi classificado como tal, devido às limitações na classificação.

Na bacia do Ribeirão Sobradinho, há uma área de mineração destinada à extração de areia, localizada a jusante da bacia, na margem esquerda. Esta atividade apresenta potencial de poluição, pois pode aumentar a turbidez da água e dificultar a penetração de luz no corpo hídrico (Jordão, 2011). Esse impacto pode influenciar diretamente os dados monitorados na última estação (050 RB). Na Figura 5. 6, os valores de turbidez nos pontos de monitoramento da Caesb revelam outliers mais elevados nessa estação, sugerindo que a atividade de mineração possa estar contribuindo para esses resultados.

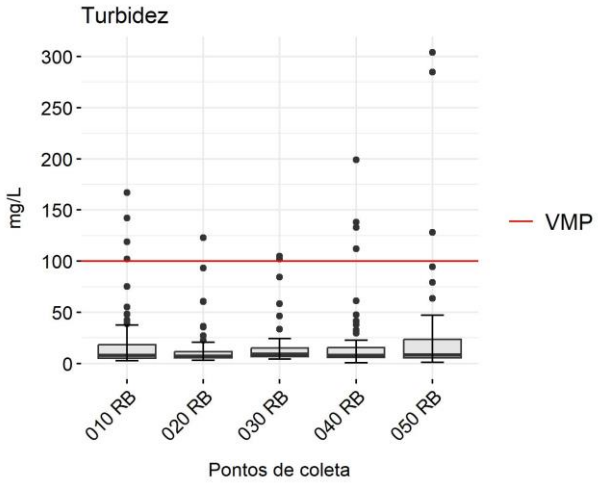



Figura 5. 6 - Gráfico com os valores de turbidez em cada ponto de monitoramento ao longo do ribeirão Sobradinho. VMP: valor máximo permitido para a Classe 3.

Adicionalmente, tanto a montante quanto a jusante da bacia, há extensas áreas agrícolas que, dependendo do tipo de cultivo, podem contribuir para a degradação da qualidade da água do ribeirão. Segundo Jordão (2011), diversos processos associados à agricultura, como a preparação do solo para o plantio, a aplicação de fertilizantes, o uso de agrotóxicos e a colheita, podem gerar poluentes, como o aporte de nutrientes provenientes dos fertilizantes, que podem atingir os corpos hídricos através do deflúvio superficial após as chuvas.

As alterações no uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do ribeirão Sobradinho impactam negativamente na qualidade da água do Ribeirão. Primeiramente, em função do

aumento populacional na área se refletir no aumento das cargas de esgotos tratados lançadas nesse Corpo Hídrico, escolhido como corpo receptor de efluentes tratados para a região. Complementarmente, a maior taxa de áreas urbanizadas impacta negativamente na qualidade da água do Ribeirão, especialmente devido ao escoamento superficial durante as chuvas.

Exemplos de empreendimentos previstos na bacia, como o já citado Urbitá e o Residencial Sobradinho, com expectativa de 96 unidades habitacionais, ilustram o crescimento de construções na região. Esse aumento de empreendimentos pode levar a uma situação em que a poluição se torne impossível de ser mitigada. Destaca-se um conflito, uma vez que, embora o licenciamento desses empreendimentos seja aprovado pelo poder público, os impactos ambientais gerados persistem. Isso levanta a questão: até que ponto o interesse do poder público em promover o desenvolvimento dessa área está sendo priorizado em detrimento da degradação ambiental? É fundamental refletir sobre os custos associados a esse modelo de desenvolvimento e os efeitos que ele pode vir a provocar no meio ambiente.

O instrumento Enquadramento, se devidamente aplicado, deveria servir para coibir o surgimento de novos parcelamentos de solo urbanos na Bacia Hidrográfica, ou serem definidas medidas mitigadoras da poluição que transformem os impactos dos novos loteamentos em impactos nulos para a deterioração da qualidade das águas do Ribeirão.

Além dos problemas associados à expansão das zonas urbanas e da população no território da bacia hidrográfica do ribeirão Sobradinho, existem mais expansões urbanas que poderão ocorrer na bacia do lago Paranoá, na região da Serrinha. Caso isso ocorra, é possível que os esgotos gerados em novas áreas urbanas, na região do Taquari, sejam exportados para a ETE Sobradinho, ou nova ETE a ser construída na BH do Ribeirão Sobradinho, pelo fato do ribeirão ter sido escolhido como corpo receptor de efluentes tratados para a região. Com isso, a expansão urbana na Bacia do Lago Paranoá poderá prejudicar, também, as condições de qualidade de água do ribeirão Sobradinho.

## 5.3 AVALIAÇÃO DOS CENÁRIOS PREVISTOS ATÉ 2040 PARA O RIBEIRÃO SOBRADINHO

Os resultados obtidos dos cenários previstos para o Ribeirão Sobradinho, considerando o PDSB e o enquadramento do corpo hídrico, serão discutidos com base nos seguintes parâmetros: DBO, OD, fósforo, nitrogênio e E. coli. Tendo como cenários o aumento populacional, a melhoria na eficiência do tratamento da ETE Sobradinho e a possibilidade do reúso parcial do efluente da ETE para agricultura, caso esse tipo de reúso

seja aprovado no Conselho de Meio Ambiente do Distrito Federal (CONAM/DF), no âmbito da Câmara Técnica de Reúso de Água para a Atividade Agrícola e a Irrigação no DF, com trabalhos em andamento desde 29 de julho de 2021.

Para a calibração do modelo, foi necessário simular a situação atual do Ribeirão Sobradinho. Observou-se que, mesmo antes do lançamento da ETE, entre as estações de monitoramento da Caesb com códigos 010 e 020, já há um aumento na DBO, provavelmente devido a fontes de poluição difusa que chegam ao corpo hídrico. No entanto, essa variação foi contemplada nos dados de entrada ao longo do rio. Como esperado, logo após o lançamento da ETE Sobradinho, os valores de DBO aumentam, mas ainda permanecem dentro do valor máximo de 10 mg/L, valor esperado para a Classe 3 de enquadramento do Ribeirão.

Com esses dados, foi possível obter a curva de calibração da DBO, que se aproxima do padrão das concentrações medidas, apesar de algumas superestimações. Isso indica que o modelo está capturando bem as tendências gerais dos dados observados. É importante destacar que, mesmo com essas superestimações, os valores de DBO do modelo se mantiveram dentro da classe do Ribeirão e a concentração no exutório se aproximou bastante dos valores medidos.

Vale ressaltar que o modelo é uma ferramenta para simular a qualidade da água do curso d'água e contribuir com dados que ampliem o entendimento sobre tendências futuras e os impactos simulados em diferentes cenários propostos. A calibração pode não ser perfeitamente precisa devido à qualidade geral dos dados e/ou à seleção dos dados de entrada, mas continua sendo valiosa para análise e planejamento. Na Figura 5. 7, são apresentadas as concentrações de DBO observados após calibração e os medidos.

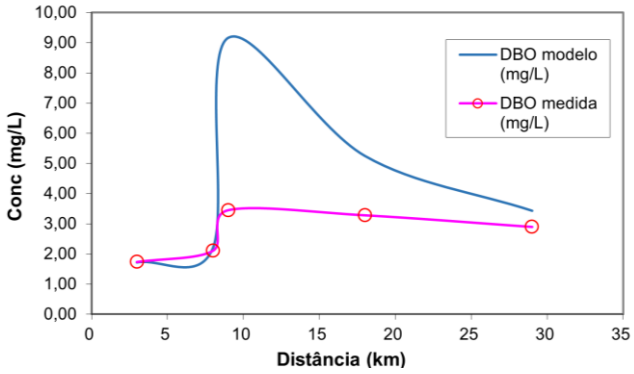


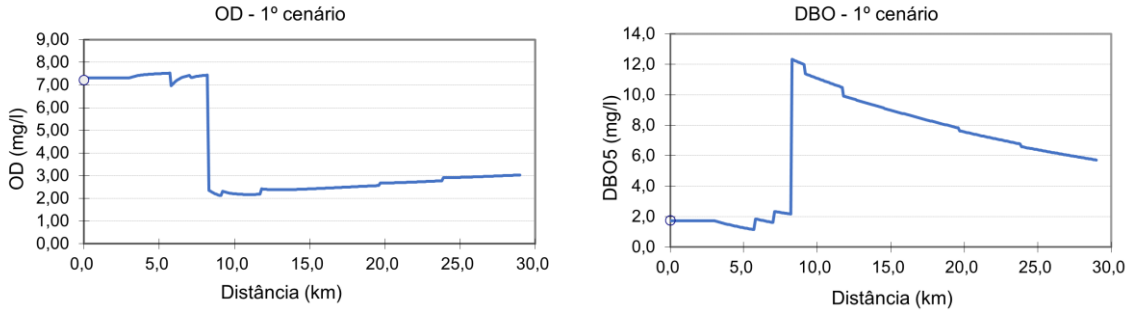

Figura 5. 7 - Concentrações da DBO no ribeirão Sobradinho após a calibração do modelo QUAL-UFMG com curvas da DBO do modelo e DBO medida (Dados medidos pela Caesb).

No primeiro cenário, com a população atual de 150 mil pessoas e um acréscimo de 200 mil, totalizando um cenário hipotético de 350 mil pessoas residindo na bacia hidrográfica, mantendo a eficiência atual da ETE Sobradinho, observou-se que, em relação ao oxigênio dissolvido, do trecho de 8,3 km até o final do ribeirão, os valores de OD variaram entre 2 e 3 mg/L, Classe 4, ficando fora do enquadramento esperado para o ribeirão. Ou seja, apenas 29% do ribeirão atenderia à Classe 3, caso essas condições ocorram no futuro. O valor crítico de OD foi de 2,12 mg/L, próximo ao mínimo necessário para a sobrevivência da biota local, sendo considerado tóxico para algumas espécies de peixes.

Em relação à DBO, nesse mesmo cenário, cerca de 92% do trecho do ribeirão se manteve dentro dos limites esperados para a Classe 3. Apenas em um pequeno trecho, logo após o ponto de lançamento da ETE, o Ribeirão apresentaria valores máximos de DBO de 12 mg/L (Classe 4), reduzindo gradativamente até alcançar 10 mg/L, que é o VMP para a Classe 3.

O fósforo total e a E.coli apresentaram conformidade com a Classe 3 em apenas 29% do trecho analisado, mantendo-se na Classe 4 na maior parte da extensão do Ribeirão após o lançamento das cargas de efluentes tratados pela ETE. As concentrações de ambos os parâmetros permaneceram elevadas até o final do curso do rio, com valores de 2,97 mg/L para fósforo e 3,60E+05 NMP/100mL para E.coli, respectivamente.

Para o nitrogênio e suas formas, o nitrato permaneceu enquadrado na Classe 3 ao longo de todo o trecho analisado. No entanto, a amônia esteve em conformidade com a Classe 3 em apenas 29% do ribeirão, enquanto o nitrito manteve-se dentro dos limites esperados em 50% do trecho. Nos demais segmentos, ambos os parâmetros caíram para a Classe 4. Na Figura 5. 8, é apresentada a simulação realizada para o primeiro cenário.



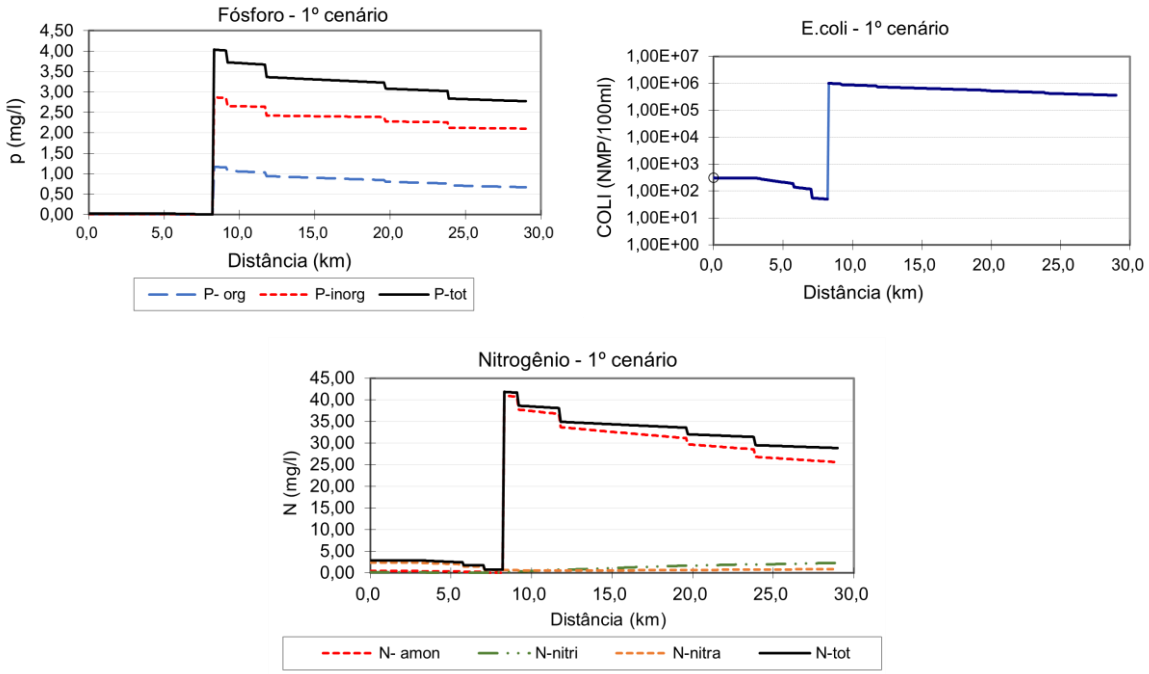



Figura 5. 8 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **1° Cenário**.

No segundo cenário, mantém-se o aumento populacional de 200 mil pessoas, somado à população atual de 150 mil, totalizando 350 mil pessoas no território da bacia hidrográfica, mas as simulações ocorreram considerando uma melhora no tratamento da ETE Sobradinho. A conformidade das concentrações de OD e DBO permaneceu semelhante ao primeiro cenário, considerando que a eficiência atual da ETE na remoção de DBO já supera as expectativas estabelecidas para 2040 pelo PDSB. No entanto, no caso do OD, observou-se um valor crítico de 2,33 mg/L, um pouco superior ao registrado no primeiro cenário.

A E.coli manteve-se em 100% do trecho dentro da Classe 3, porém, apenas 30% do trecho apresentou conformidade com a Classe 3 no caso do fósforo. Mesmo com uma redução nas concentrações de fósforo em comparação ao primeiro cenário e com o aumento da eficiência da ETE, o fósforo ainda excedeu o Valor Máximo Permitido (VMP) de 0,15 mg/L. Nos quilômetros finais do ribeirão, os valores de fósforo chegaram a 0,2 mg/L, próximos ao limite da Classe 3.

No que diz respeito ao nitrogênio, a eficiência de remoção esperada não difere significativamente da atual, resultando em porcentagens de conformidade semelhantes às do primeiro cenário. O nitrato permaneceu dentro dos limites da Classe 3 ao longo de todo o trecho, enquanto a amônia atendeu à Classe 3 em 30% do trecho, e o nitrito apresentou uma

leve melhora, atingindo 52% de conformidade. Na Figura 5. 9, é apresentada a simulação realizada para o segundo cenário.

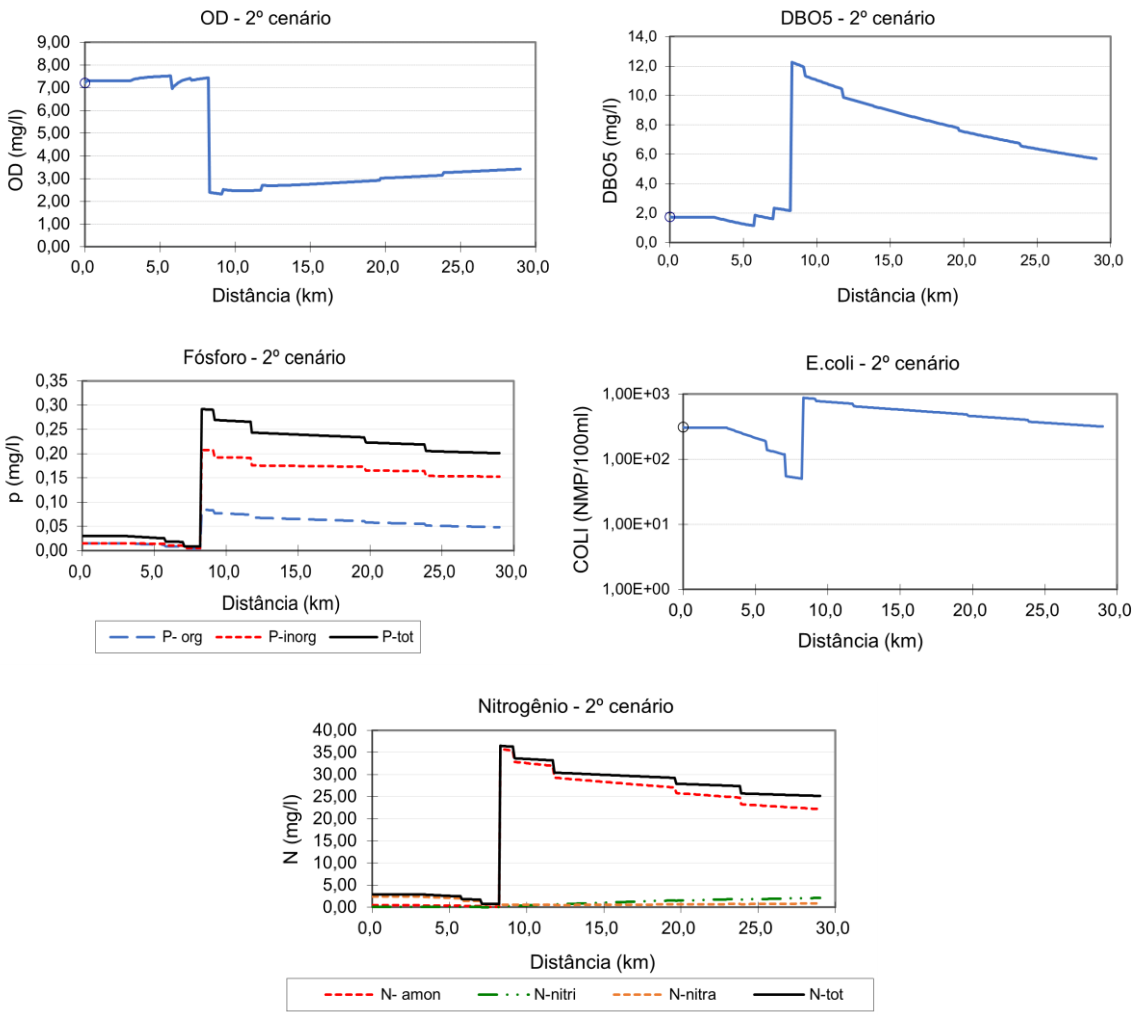



Figura 5. 9 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **2° Cenário**.

O terceiro cenário considera a população atual de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, totalizando 350 mil pessoas no território da bacia hidrográfica, mantendo a eficiência atual da ETE Sobradinho, mas com 75% do efluente sendo destinado ao reúso na agricultura. Nesse cenário, com apenas 25% do efluente tratado sendo lançado no Ribeirão, as concentrações de OD, DBO e nitrogênio (nitrato, nitrito e amônia) mantiveram-se em todo o trecho dentro do enquadramento da Classe 3.

No entanto, o fósforo e a E.coli enquadraram-se na Classe 4 em 60% do trecho após o lançamento da ETE. Isso reforça a necessidade de implementação das melhorias previstas para a ETE, independente da perspectiva de aprovação do reúso agrícola no DF, pois, mesmo

com uma menor vazão de efluente chegando ao ribeirão, os níveis de fósforo e E.coli continuam fora dos limites esperados.

É importante salientar que, para o reúso da água, há exigências específicas de qualidade, e este cenário não considera esses parâmetros. Contudo, ele é fundamental para compreender o impacto do fósforo total e da E.coli no corpo hídrico. Logo, isso mostra o papel essencial da câmara técnica do CONAM-DF, liderada pela SEMA, que promove estudos para regulamentar esse tipo de reúso no Distrito Federal.

Na Figura 5. 10, é apresentada a simulação realizada para o terceiro cenário.

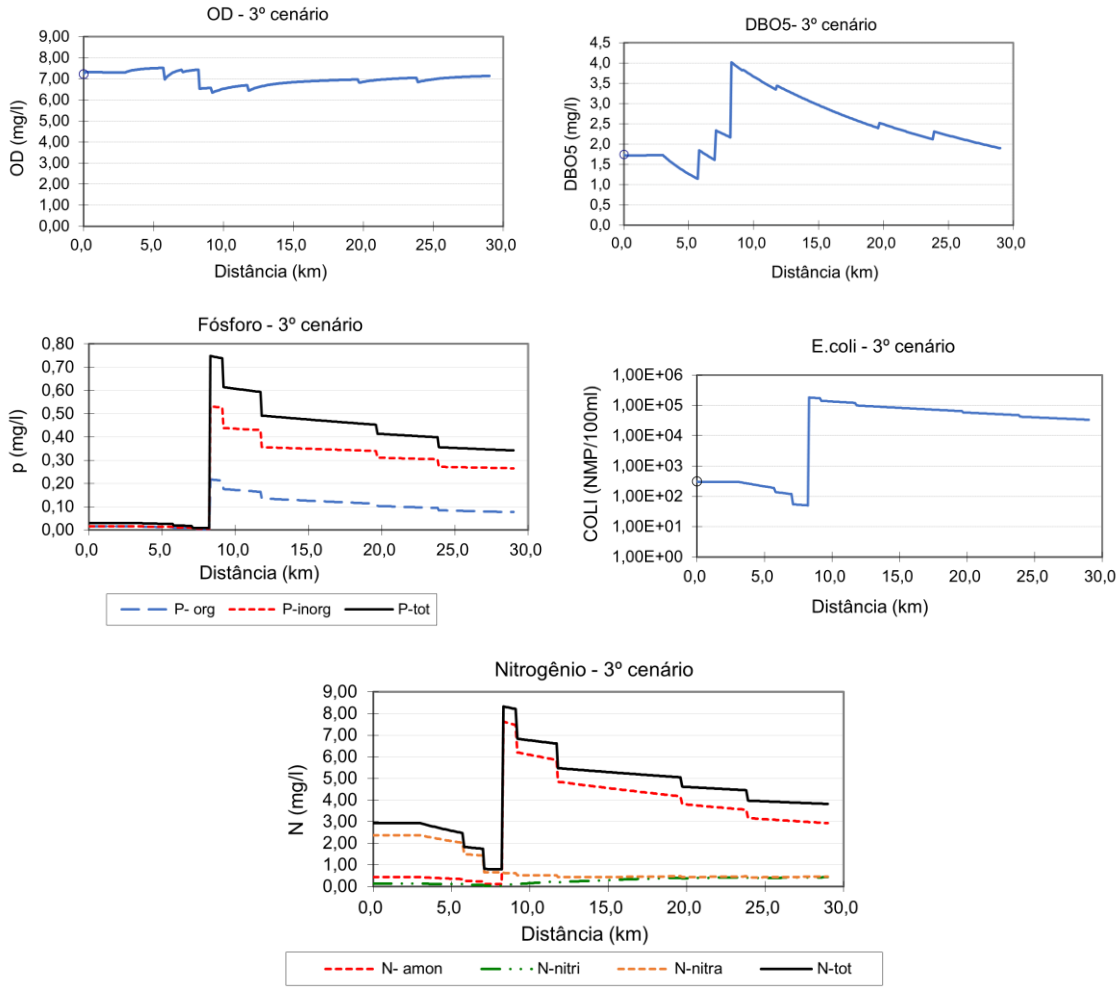



Figura 5.9

Figura 5. 10 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **3° Cenário**.

E, por fim, o quarto cenário representa uma combinação dos anteriores, considerando a população atual de 150 mil pessoas, com um acréscimo de 200 mil, totalizando 350 mil pessoas no território da bacia hidrográfica, a eficiência projetada para 2040 da ETE

Sobradinho e 75% do efluente da ETE destinado ao reúso na agricultura. Nesse cenário, os parâmetros OD, DBO, fósforo e E.coli se enquadram na Classe 3 ao longo de todo o trecho simulado. No caso do nitrogênio, o nitrato mantém-se dentro da Classe 3 em todo o ribeirão, a amônia apresenta 90% de conformidade, e o nitrito, 88%.

Essa simulação representa uma condição ideal, no qual Ribeirão estaria dentro da classe esperada para o enquadramento, com concentrações de todos os parâmetros que poderiam permitir sua classificação na Classe 2, principalmente na parte a jusante da bacia, onde há cachoeiras, atendendo, assim, às demandas da comunidade.

Na Figura 5. 11, é apresentada a simulação realizada para o quarto cenário.

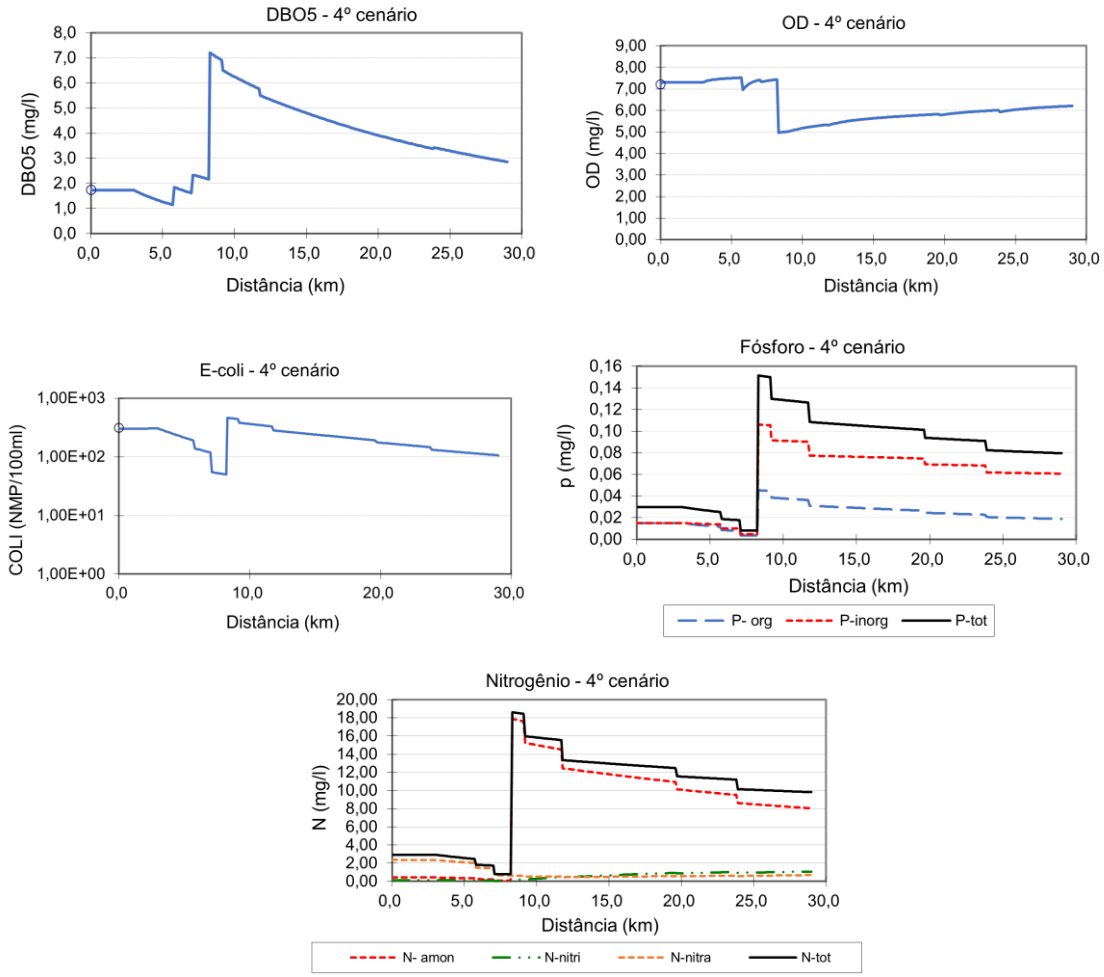



Figura 5. 11 - Resultado da simulação de qualidade de água do ribeirão Sobradinho com o modelo QUAL-UFMG – **4° Cenário**.

Os resultados obtidos com a simulação dos cenários demonstram a importância da melhoria no tratamento da ETE Sobradinho, conforme previsto pelo PDSB, com a

implementação do tratamento terciário para remoção de nutrientes e tratamento avançado, a desinfecção.

Segundo o PDSB, o DF tem uma estimativa até 2037 de ter cerca de 4 milhões de pessoas, além do que a área norte na qual engloba a área da bacia do Ribeirão Sobradinho representa cerca de 12% desse total relativo à área urbana. Ainda no mesmo plano, é alavancado a estimativa de atendimento da ETE Sobradinho em 2037 sendo cerca de 200 mil pessoas atendidas.

Logo, o impacto gerado pelo aumento populacional na bacia é iminente. Frente aos novos parcelamentos de solo para a criação de novos conjuntos habitacionais, a adoção de medidas de mitigação, como o reúso, surgem como alternativas para recuperar a qualidade da água do Ribeirão para os níveis compatíveis com os usos desejados pela população.

Observa-se a necessidade da aplicação do instrumento Enquadramento de Corpos d'Água em Classes de Qualidade com maior efetividade no Distrito Federal, principalmente em casos como a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Sobradinho. Observa-se a facilidade com que os licenciamentos de empreendimentos imobiliários são aprovados no território da Bacia Hidrográfica, sem a devida preocupação com o planejamento da qualidade da água no Ribeirão e o atendimento aos usos requeridos pela comunidade da bacia hidrográfica e da região no futuro, tornando o instrumento ineficaz frente aos seus objetivos.

Os resultados apresentados neste estudo evidenciam a importância dos métodos utilizados como forma de auxiliar na tomada de decisões e no planejamento futuro dos recursos hídricos do Distrito Federal. Destaca-se a importância da regulamentação do reúso como medida crucial para a destinação de parte dos efluentes tratados na ETE Sobradinho no futuro, a necessidade urgente da implementação das melhorias no tratamento realizado na ETE Sobradinho e a importância da continuidade do monitoramento hidrológico e de qualidade de água ao longo do Ribeirão Sobradinho, com maior democratização das informações e dos dados monitorados, propiciando maior facilidade na realização dos estudos relacionados à bacia hidrográfica do Ribeirão Sobradinho.

# 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A qualidade da água do Ribeirão Sobradinho tem diminuído ao longo dos 10 anos avaliados, principalmente devido ao aumento das concentrações de E. coli e fósforo total. Além disso, a previsão de crescimento populacional no território da bacia hidrográfica ou áreas vizinhas representam um desafio adicional, pois implicará em um aumento no volume de esgoto a ser tratado e lançado no Ribeirão, dificultando a possibilidade de as águas do Ribeirão atenderem à classe de enquadramento ou classes superiores, almejadas pela comunidade da Bacia Hidrográfica.

Mesmo que a ETE Sobradinho incorpore, futuramente, níveis melhores de tratamento, como remoção de nutrientes e desinfecção, o Ribeirão Sobradinho pode não se recuperar completamente, devido a sua capacidade de autodepuração frente a altas cargas por ser um rio de baixa vazão.

O crescimento populacional na bacia é um impacto iminente. Por conta disso, mostra-se indispensável que leis voltadas para o reúso de água sejam implementadas no Distrito Federal, possibilitando a redução do aporte da carga poluente no ribeirão Sobradinho, com possível reúso agrícola, melhorando a qualidade da água. No caso da possiblidade do reúso, mantendo-se a eficiência de remoção de nitrogênio em 40%, o nitrogênio poderá ser aproveitado como um nutriente importante na agricultura podendo gerar redução nos custos de melhorias na ETE Sobradinho.

As alterações no uso e cobertura do solo na bacia hidrográfica do Ribeirão Sobradinho têm gerado impactos negativos significativos na qualidade da água, evidenciados pela deterioração dos dados monitorados ao longo das estações. Esses impactos estão principalmente associados ao escoamento superficial proveniente das áreas urbanas, mas também se originam de práticas agrícolas e, em menor escala, da atividade mineradora.

O uso do modelo QUAL-UFMG permitiu constatar que, sem as melhorias previstas para a ETE Sobradinho, conforme estabelecido pelo PDSB, o Ribeirão Sobradinho não conseguirá atingir o enquadramento previsto, especialmente em função do aumento populacional, que intensifica a carga a ser tratada pela ETE. Além disso, o cenário 3 revelou que, mesmo com uma menor vazão no ribeirão, as concentrações de fósforo e E. coli permanecem elevadas, reforçando a necessidade de aprimorar a eficiência de remoção desses parâmetros na ETE.

Portanto, com a possibilidade de reúso da água para agricultura, aliado às melhorias planejadas para aumentar a eficiência de remoção, especialmente de fósforo e E. coli na

ETE, o Ribeirão poderá se manter na Classe 3 e ainda apresentar trechos na Classe 2, especialmente nas áreas com cachoeiras. Esse cenário é destacado como o ideal, pois permite o enquadramento de trechos a jusante da bacia, especialmente nas áreas de cachoeiras, na classe 2, atendendo, assim, às necessidades da população.

Recomenda-se a realização de estudos voltados à viabilidade de implementar o tratamento terciário na ETE Sobradinho, considerando que o PDSB prevê a retomada do tratamento quimicamente assistido para remoção de fósforo, a introdução de biomídia nos reatores e um processo separado de desinfecção. No entanto, a prioridade deve ser a implementação da desinfecção, devido aos altos níveis de E.coli, que representam sérios riscos à saúde pública.

Pesquisas focadas na avaliação dos impactos durante o período chuvoso no ribeirão Sobradinho são imprescindíveis, especialmente no contexto de reúso agrícola, uma vez que a poluição difusa pode intensificar os impactos no Ribeirão, comprometendo ainda mais a qualidade da água e a sustentabilidade do uso.

Diante do exposto, pode-se observar que o enquadramento não está cumprindo seu papel, configurando-se, nesta unidade hidrográfica, como um instrumento enfraquecido que não atende aos objetivos da Política de Recursos Hídricos do Distrito Federal.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional de Águas (ANA). (2009). “Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos - SNIRH no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica.” Cadernos de recursos hídricos. Brasília.

Agência Nacional de Águas (ANA). (2019). “Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2019.” Disponível em: http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_informe_anual_2019-versao_web-0212-1.pdf. Acesso em: 09 jul. 2023.

Agência Nacional de Águas (ANA). (2021). “Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2021.” Disponível em: https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/. Acesso em: 09 jul. 2023.

Agência Nacional de Águas (ANA). (2024). “Portal da Qualidade das Águas.” Disponível em: http://portalpnqa.ana.gov.br/default.aspx. Acesso em: 21 ago. 2024.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). (2015). “Lista de termos para o thesaurus de recursos hídricos da Agência Nacional de Águas.” Brasília.

Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). (2022). “Capacitação em Gestão de Recursos Hídricos. Volume 1. Comitê de bacia hidrográfica: O que é e o que faz?” Brasília.

Agência Reguladora de Águas, Energia e Saneamento Básico do Distrito Federal (ADASA). (2012). “Plano de gerenciamento integrado de recursos hídricos do Distrito Federal (PGIRH/DF): relatório síntese.” Brasília.

Barbosa, R.P., Minoti, R.T., Gomes, L.N.L. e Souza, H.O. (2021). “Bacia Hidrográfica do Ribeirão Sobradinho (DF): o conflito entre o planejamento territorial e os usos de suas águas pela população.” In: Moraes, G.G.B.L., Montezuma, T.F.P.F. e Ferraço, A.A.G. (Orgs.), Estudo de Direito das Águas, volume I: Desafios jurídicos sociais e agravantes climáticas, Volume I. Rio de Janeiro: Lumen Juris, p. 287-320.

Bertollo, M., Albertin, R.M., Bacha, A.L.R. et al. (2021). Pedologia. Porto Alegre: Grupo A. E-book. ISBN 9786556901909. Disponível em:

https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9786556901909/. Acesso em: 07 set. 2024.

Bicudo, C.E., Tundisi, J.G., Scheuenstuhl, M.C. (Ed.). (2010). “Águas do Brasil: análises estratégicas.” Instituto Botânica. Disponível em: https://www.abc.org.br/IMG/pdf/doc-6820.pdf. Acesso em: 09 jul. 2023.

Braga, B. et al. (2005). “Introdução à engenharia ambiental: o deságio do desenvolvimento sustentável.” 2ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/5769440/mod_resource/content/1/Benedito%20Braga.pdf. Acesso em: 01 jul. 2023.

Braga, M.B. e Lima, C.E.P. (2014). Reuso de água na agricultura. Brasília: Embrapa, p.200.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2005). “Resolução CONAMA nº. 54, de 28 de novembro de 2005.” Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2005). “Resolução CONAMA nº. 357, de 17 de março de 2005.” Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. (2005). “Resolução CONAMA nº. 430, de 13 de maio de 2011.” Composição e classificação dos esgotos sanitários.

Brasil. Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional. (2021). “SINGREH.” Brasília. Disponível em: https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/cnrh/cnrh/sistema-nacional-de-gerenciamento-de-recursos-hidricos. Acesso em: 09 jul. 2023.

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. (2006). "Vigilância e controle da qualidade da água para consumo humano." Brasília: Ministério da Saúde, 212 p.

Brega Filho, D. B. e Mancuso, P.C.S. (2003). “Conceito de reúso de água.” In: Mancuso, P.C.S. e Santos, H.F. (eds.), Reúso de água, Barueri: Manole, p. 21-36.

Brundtland, G.H. Nosso Futuro Comum. (1987). “Relatório Brundtland.” Our Common Future: United Nations.

Codeplan – Companhia de Planejamento do Distrito Federal. (2020). Atlas do Distrito Federal. Brasília, GDF. 145 p.

Costa, D.J.L. e Teixeira, D. (2010). "Aplicação de modelo de autodepuração para avaliação da qualidade da água do Ribeirão do Ouro, Araraquara-SP." Revista Brasileira Multidisciplinar, v.13, n.1, p 49-62.

De Brites, C.R.C. et al. (2019). "IV-307-Autodepuração de esgotos domésticos tratados em cursos d'águas de altiplano." 30º Congresso ABES.

De Rezende, G.R. (2009). "Aplicação do modelo matemático de qualidade da água qual2e para o estudo do comportamento dos nutrientes nitrogênio e fósforo no rio Monjolinho, São Carlos-SP." Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Domingues, J.C.C.F. et al. (2023). "Avaliação de alternativas para a destinação de efluentes sanitários tratados em cinco municípios do estado de São Paulo: ênfase no potencial de reúso de água." Saneamento ambiental: desafios para a universalização e a sustentabilidade-anais.

Fleck, L., Tavares, M.H.F., Eyng, E. (2013). "Principais modelos matemáticos de qualidade da água e suas aplicações: uma revisão." Revista Eletrônica Científica Inovação e Tecnologia, v. 4, n. 8, p. 46-61.

Fundação Nacional da Saúde (FUNASA). (2014). "Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS." Brasília. Disponível em: http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS+2014.pdf/85bbdcbc-8cd2-4157-940b-90b5c5bcfc87. Acesso em: 09 jul. 2023.

Gasque, M.D. (2019). Monitoramento da qualidade da água do Ribeirão Sobradinho e sua correspondência com o enquadramento vigente. 74 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) — Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

GDF – Governo do Distrito Federal. (2012). Grupo de Trabalho Ribeirão Sobradinho: Relatório de Diagnósticos e Soluções para a Recuperação Ambiental do Ribeirão Sobradinho. 36 p.

GDF - Governo do Distrito Federal. (2017). “Plano Distrital de Saneamento Básico do Distrito Federal (PDSB/DF): relatório síntese.” Brasília.

Gomes, S.H.R. et al. (2018). “Modelagem sazonal da qualidade da água do Rio dos Sinos/RS utilizando o modelo QUAL-UFMG.” Engenharia Sanitaria e Ambiental, v.23, p. 275-285.

Hespanhol, I. (2003). “Potencial de reúso de água no Brasil-Agricultura. Indústria, Municípios e Recarga de Aqüíferos.” In: Mancuso, P.C.S. e Santos, H.F. (eds.), Reúso de água, Barueri: Manole, p. 38-96.

Ibrahim, F.I.D. (2014). Introdução ao Geoprocessamento Ambiental. Rio de Janeiro: Grupo GEN. E-book. ISBN 9788536521602. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536521602/. Acesso em: 07 set. 2024.

INPE. (2024). CBERS 04A. Disponível em: http://www.cbers.inpe.br/sobre/cbers04a.php. Acessado em 14 de agosto de 2024.

Jordão, E.P. e Pessôa, C.A. (2011). Tratamento de Esgotos Domésticos. 6. ed. São Paulo: ABES.

Knapik, H.G. (2009). Reflexões sobre monitoramento, modelagem e calibração na gestão de recursos hídricos: estudo de caso da qualidade da água da Bacia do Alto Iguaçu. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

Kubler, H., Fortin, A. e Molleta, L. (2015). “Reúso de água nas crises hídricas e oportunidades no Brasil.” ABES-Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Lima, R.M. (2021). Avaliação da eficiência de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) operadas pela Caesb: estudo de caso da ETE Sobradinho. 81 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) — Universidade de Brasília, Brasília.

Melo, C.E. (2022). “Análise da qualidade da água de cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio Alagado (DF/GO) com a aplicação do Modelo QUAL - UFMG.” Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental). Universidade de Brasília, Brasília.

Ministério Público Federal (MPF). (2018). 8º Fórum Mundial da Água. “Declaração do Ministério Público.” Brasília. Disponível em: https://www.mpf.mp.br/pgr/documentos/Declaracao_do_Ministerio_Publico.pdf. Acesso em: 03 de junho de 2023.

Muniz, D.H.F. et al. (2011). “Avaliação dos impactos urbano e agrícola sobre a qualidade da água de rios do Distrito Federal.” XIX SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

Organização das Nações Unidas (ONU). (2010). “O direito humano à água e ao saneamento”. Resolução A/RES/64/292. Disponível em: http://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_media_brief_por.pdf. Acesso em: 01 de setembro de 2024.

Organização das Nações Unidas (ONU). (2015). “Transformando nosso mundo: a agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável.” Nova York.

Paula, L.M. et al. (2011). “Avaliação da qualidade da água e autodepuração do rio Jordão, Araguari (MG).” Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

PNUD-BR - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento - Brasil. (2023). “Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, Objetivo 6: ÁGUA POTÁVEL E SANEAMENTO.” Disponível em: https://www.undp.org/pt/brazil/objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel/%C3%81gua-pot%C3%A1vel%20-saneamento. Acesso em: 03 de junho de 2023.

Ritzen, M., Binda, A.L. (2005). “Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: Cidade, hidrologia e impactos no ambiente.” Ateliê Geográfico, v. 5, n. 3, p. 239-254.

Schaer, M. B., Santos, M.E.P. dos e Medeiros, Y.D.P. (2014). “Viabilidade do reúso de água como elemento mitigador dos efeitos da seca no semiárido da Bahia.” Ambiente & Sociedade, v.17, n.2, p 17-32.

Silva, J.S., Utsumi, A.G. e dos Santos, C.E.D. (2023). “Potencial de utilização de água de reúso em polo nacional de agricultura irrigada.” Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 3, p. 1175-1185.

Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). (2023). “Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgoto – ano de referência 2022.” Ministério do Desenvolvimento Regional, Brasília.

Souza, H.O. (2021). “Avaliação do enquadramento dos corpos de água na contribuição para a sustentabilidade dos usos múltiplos da água”. 2021. 106 f., il. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2021.

Tavares, F.A. (2008). Reúso de água e polimento de efluentes de lagoas de estabilização por meio de cultivo consorciado de plantas da família Lemnaceae e tilápias. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental.

Teixeira, M.R. (2016). “A utilização do geoprocessamento na análise ambiental e sua importância na tomada de decisões: um estudo sobre o uso do geoprocessamento em pesquisas sobre ocupação desordenada do solo.” Trabalho de Pós-graduação Lato Senso em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável. Centro Universitário de Brasília (UniCEUB/ICPD), Brasília. 41 p.

Teodoro, V.L.I. et al. (2007). “O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local.” Revista Brasileira Multidisciplinar, v. 11, n. 1, p. 137-156.

Tucci, C. E. M.; Mendes, C. A. B. (2006). “Avaliação ambiental integrada de bacia hidrográfica”. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 302 p.

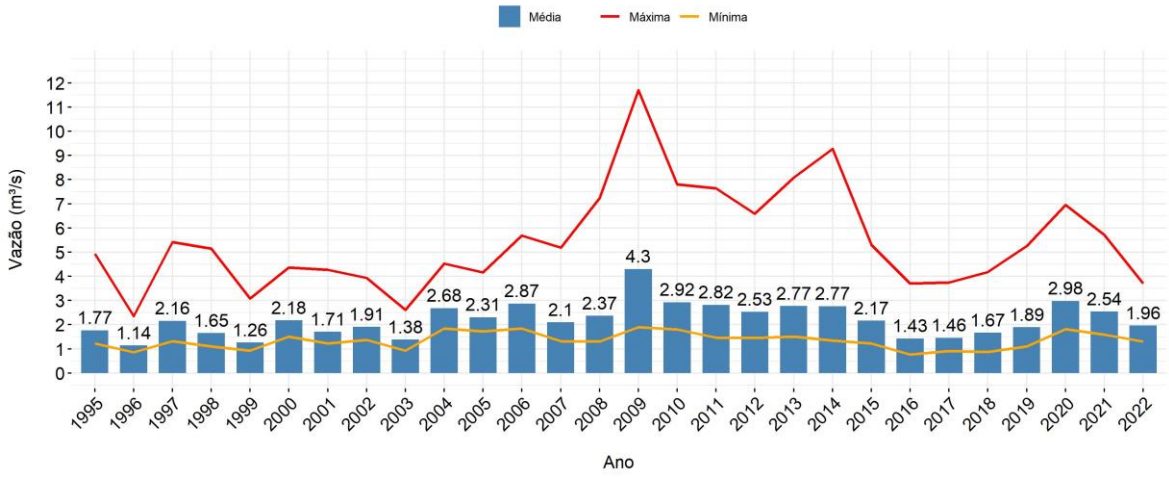
Tucci, C.E.M. (2001). “Hidrologia: Ciência e Aplicação.” 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS. 40p.

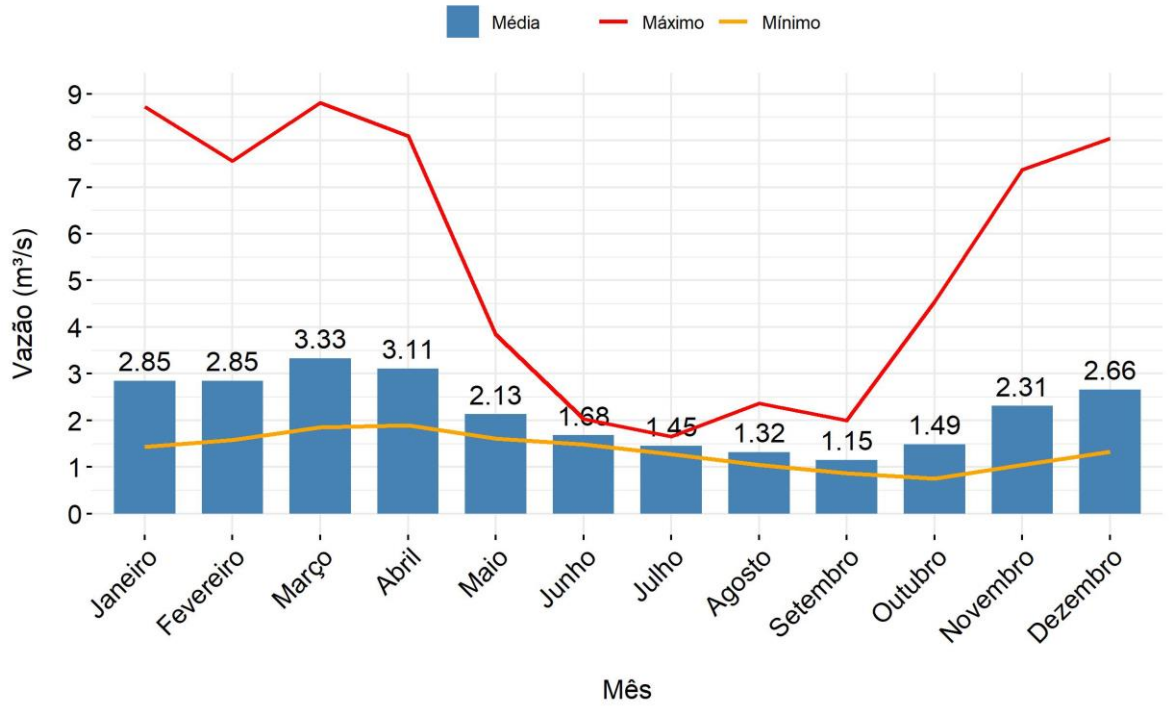
Von Sperling, M. (1996). “Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.” 2ª ed. Editora UFMG. 243p.

Von Sperling, M. (2014). “Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Volume 7. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios.” 2ª ed. Editora UFMG. 592 p.

Zorzin, F.M. et al. (2011). “Análise da qualidade da água do Ribeirão Sobradinho – contaminação ambiental e qualidade de vida, Distrito Federal.” Tempus–Actas de Saúde Coletiva, v. 5, p. 107-118.

# APÊNDICE A - GRÁFICOS COM AS VARIAÇÕES ANUAIS E MENSAIS DOS DADOS DE VAZÃO DA ESTAÇÃO 60474100



# APÊNDICE B - SÍNTESE DE DADOS DE CONCENTRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA QUALIDADE DO RIBEIRÃO SOBRADINHO NO PONTO 010 (DADOS DE ENTRADA DO QUAL-UFMG)

| | DBO (mg/L) | OD (mg/L) | Amônia (mg/L) | Ecoli (NMP/100ml) | Fósforo Total (mg/L) | Nitrato (mg/L) | Temperatura (ºC) | Nitrito (mg/L) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **n** | 19 | 20 | 19 | 19 | 19 | 32 | 20 | 17 |
| **Média** | 1,74 | 7,22 | 0,43 | 2042,16 | 0,03 | 2,37 | 19,72 | 0,10 |
| **Mediana** | 1,00 | 7,22 | 0,21 | 310,00 | 0,02 | 2,47 | 19,95 | 0,10 |
| **Moda** | 1,00 | 7,40 | 0,21 | 100,00 | 0,02 | 2,00 | 20,00 | 0,10 |
| **Mínimo** | 1,00 | 6,54 | 0,08 | 12,20 | 0,01 | 1,16 | 17,30 | 0,03 |
| **Máximo** | 3,00 | 8,46 | 4,78 | 20000,00 | 0,05 | 3,70 | 21,40 | 0,30 |
| **Quartil 1 (25%)** | 1,00 | 6,93 | 0,09 | 100,00 | 0,02 | 1,94 | 19,13 | 0,09 |
| **Quartil 3 (75%)** | 7,15 | 7,41 | 0,21 | 1017,00 | 0,04 | 2,77 | 20,30 | 0,10 |
| **Desvio padrão** | 0,93 | 0,44 | 1,06 | 4886,42 | 0,01 | 0,61 | 0,89 | 0,05 |

# ÂPENDICE C - SÍNTESE DOS DADOS DO EFLUENTE FINAL DA ETE SOBRADINHO

| | DBO (mg/L) | Ptot (mg/L) | E coli (NMP/100ml) | NH3 (mg/L) | NO3 (mg/L) | NO2 (mg/L) | PO4 (mg/L) | Vazão ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **n** | 122 | 118 | 67 | 121 | 54 | 11 | 111 | 2127 |
| **Média** | 46,02 | 3,97 | 3263442,55 | 45,41 | 0,45 | 0,15 | 2,97 | 95,50 |
| **Mediana** | 37,90 | 4,07 | 1986300,00 | 45,70 | 0,50 | 0,10 | 2,96 | 94,05 |
| **Moda** | 28,00 | 4,17 | 2419600,00 | 42,30 | 0,50 | 0,10 | 2,83 | 99,00 |
| **Mínimo** | 7,20 | 0,45 | 24196,00 | 26,10 | 0,10 | 0,10 | 0,02 | 31,02 |
| **Máximo** | 164,00 | 7,83 | 24196000,00 | 66,50 | 1,00 | 0,60 | 8,96 | 347,30 |
| **Quartil 1 (25%)** | 21,88 | 2,62 | 1299700,00 | 40,10 | 0,50 | 0,10 | 1,63 | 67,94 |
| **Quartil 3 (75%)** | 64,43 | 5,10 | 3255000,00 | 51,15 | 0,50 | 0,10 | 4,20 | 109,10 |
| **Desvio padrão** | 32,27 | 1,83 | 4017685,54 | 8,01 | 0,18 | 0,15 | 1,74 | 34,51 |