



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DOCE NO PERÍODO DE 2020 A
2024 APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA SAMARCO NO MUNICÍPIO DE
MARIANA – MG**

Jéssica de Oliveira Barbosa

Belo Horizonte

2025

Jéssica de Oliveira Barbosa

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DOCE NO PERÍODO DE 2020 A
2024 APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA SAMARCO NO MUNICÍPIO DE
MARIANA – MG**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental e Sanitarista

Orientador: Professor Doutor Wagner Guadagnin Moravia

Belo Horizonte

2025

JÉSSICA DE OLIVEIRA BARBOSA

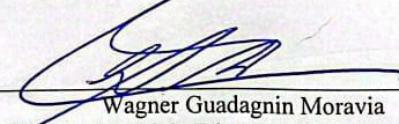
**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO DOCE PARA ABASTECIMENTO
NO PERÍODO DE 2020 A 2024 APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DA
SAMARCO NO MUNICÍPIO DE MARIANA – MG**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção de
título de Engenheira Ambiental e Sanitarista.

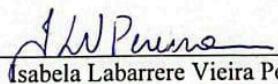
Orientador: Prof. Dr. Wagner Guadagnin Moravia

Data de aprovação: 12 / 12 / 2025

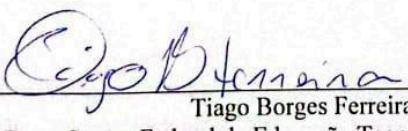
Banca examinadora:



Wagner Guadagnin Moravia
Prof. Dr. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Isabela Labarrere Vieira Pereira
Prof. Dr. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais



Tiago Borges Ferreira
Prof. Dr. – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de desenvolver este trabalho, pela proteção constante e pela força concedida ao longo de cada etapa. Manifesto também minha gratidão ao meu orientador, Professor Doutor Wagner Guadagnin Moravia, pela orientação e demais membros presentes na banca.

Não poderia deixar de agradecer aos demais professores que me ensinaram e inspiraram nessa jornada, aos amigos que fiz durante meu trajeto que me ajudaram a não desistir nos momentos mais desafiadores, aos meus pais que sempre acreditaram nos meus sonhos e sempre investiram neles.

“Não haverá borboletas se a vida não passar por longas e silenciosas metamorfoses.” Rubem Alves.

RESUMO

OLIVEIRA, Jéssica. **Avaliação da qualidade da água do rio Doce no período de 2020 a 2024 após o rompimento da barragem da Samarco no município de Mariana, MG.** 2024. 105 páginas. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

Em novembro de 2015, ocorreu um dos desastres ambientais mais emblemáticos do Brasil: o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), que liberou aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração na bacia do rio Doce, provocando severos impactos ambientais, sociais e econômicos ao longo de todo o curso do rio até sua foz, no Espírito Santo. Diante desse cenário, este trabalho avalia a qualidade da água do rio Doce no período de 2020 a 2024, com foco em trechos utilizados para captação destinada ao abastecimento público. Para isso, foram analisadas séries históricas de monitoramento fornecidas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), considerando parâmetros físico-químicos e metais estabelecidos nas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e DN COPAM/CERH nº 08/202 para águas de Classe 2. A metodologia empregada envolveu análises temporais, boxplots comparativos entre períodos chuvoso e seco, e agrupamentos hierárquicos (dendrogramas), construídos com apoio do software R e de planilhas complementares. Os resultados evidenciaram variações sazonais marcantes, especialmente para turbidez, sólidos totais, ferro dissolvido, manganês total e alumínio dissolvido, que apresentaram picos em períodos chuvosos, possivelmente associados à mobilização de sedimentos remanescentes do desastre e ao aumento do carreamento superficial. Alguns parâmetros ultrapassaram os limites legais em diferentes anos e estações, indicando persistência de efeitos relacionados à alteração da dinâmica sedimentar na bacia do rio Doce. Os resultados evidenciam que, embora diversos parâmetros permaneçam dentro dos limites estabelecidos para águas de Classe 2, a variabilidade e os picos observados em indicadores diretamente relacionados ao abastecimento público demonstram que o sistema hídrico ainda apresenta instabilidades relevantes. Essa condição reforça a necessidade de manter um monitoramento sistemático e de adotar estratégias de gestão que assegurem a qualidade e a segurança da água captada ao longo do rio Doce, sobretudo diante da suscetibilidade do manancial à mobilização de sedimentos e às oscilações sazonais.

Palavras-chave: Qualidade da água; Rio Doce; Abastecimento público.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Jéssica. **Assessment of the water quality of the Doce River from 2020 to 2024 after the collapse of the Samarco dam in the municipality of Mariana, MG.** 2024. 105 pages. Undergraduate Thesis (Bachelor's Degree in Environmental and Sanitary Engineering) – Department of Environmental Science and Technology, Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2025.

In November 2015, one of the most emblematic environmental disasters in Brazil occurred: the collapse of the Fundão tailings dam in Mariana (MG), which released approximately 60 million cubic meters of mining waste into the Doce River basin, causing severe environmental, social, and economic impacts along the entire course of the river until its mouth in the state of Espírito Santo. In this context, this study evaluates the water quality of the Doce River from 2020 to 2024, focusing on segments used for public water supply. Historical monitoring data provided by the Minas Gerais Water Management Institute (IGAM) were analyzed, considering physicochemical parameters and metals established by CONAMA Resolution No. 357/2005 and COPAM Resolution No. 08/2022 for Class 2 freshwater bodies. The methodology involved time-series analyses, comparative boxplots for rainy and dry seasons, and hierarchical clustering (dendrograms), developed using the R software and complementary spreadsheets. The results revealed marked seasonal variations, especially for turbidity, total solids, dissolved iron, manganese, and aluminum, which showed peaks during the rainy season, possibly associated with the mobilization of sediments remaining from the disaster and increased surface runoff. Some parameters exceeded legal limits in different years and stations, indicating the persistence of effects related to changes in the sediment dynamics of the Doce River basin. The findings indicate that although several parameters remained within the limits established for Class 2 waters, the variability and peak values observed in indicators directly related to public supply demonstrate that the water system still presents relevant instabilities. This condition reinforces the need for continuous monitoring and the adoption of management strategies that ensure the quality and safety of the water abstracted along the Doce River, especially considering the susceptibility of the system to sediment mobilization and seasonal fluctuations.

Keywords: Water quality; Doce River; Public water supply.

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Coordenadas geográficas dos pontos de amostragem no rio Doce	24
Tabela 3.2 - Concentrações médias (mgL^{-1}) e desvios padrão dos metais pesados analisados para as amostras de água coletadas no rio Doce, Mariana, Minas Gerais.	25
Tabela 3.3 - Comparativo entre a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008 e a DN COPAM/CERH nº 08/2022.	28
Tabela 3.4 - Padrões de Qualidade de Água, Tabela II - Classe 1 - Águas Doces.	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Vista aérea da Barragem de Fundão em Mariana - MG antes e após o rompimento.	18
Figura 3.2 - Localização das estações meteorológicas automáticas do INMET na bacia do rio Doce, Minas Gerais	22
Figura 4.1 - Localização das estações de amostragem do monitoramento especial, bacia do rio Doce, Minas Gerais	35
Figura 5.1 - Resultados do Parâmetro pH em Água Superficial da Estação RD033 e RD045	41
Figura 5.2 - Resultados do Parâmetro pH em Água Superficial da Estação RD059 e RD067	42
Figura 5.3 – Boxplots dos valores de pH em água superficial para as quatro estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2020 a 2024	44
Figura 5.4 – Dendrogramas dos valores de pH em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2020 e 2021, considerando os períodos chuvoso e seco	45
Figura 5.5 – Dendrogramas dos valores de pH em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2022, 2023 e 2024, considerando os períodos chuvoso e seco	46
Figura 5.6 - Resultados do Parâmetro Oxigênio dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).	48
Figura 5.7 - Resultados do Parâmetro Oxigênio dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).	49
Figura 5.8 - Boxplots dos valores de oxigênio dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2021.	50
Figura 5.9 - Dendrogramas dos valores de Oxigênio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021, considerando os períodos chuvoso e seco	51
Figura 5.10 - Dendrogramas dos valores de Oxigênio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	52
Figura 5.11 - Resultados do Parâmetro nitrogênio total em Água Superficial da Estação RD033	
54	

Figura 5.12 - Boxplots dos valores de nitrogênio total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 e 2021.	55
Figura 5.13 - Dendrogramas dos valores de nitrogênio total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020, 2021 e 2022 considerando os períodos chuvoso e seco	56
Figura 5.14 - Dendrogramas dos valores de nitrogênio total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2023 e 2024, considerando os períodos chuvoso e seco	57
Figura 5.15 - Resultados do parâmetro fósforo total em Água Superficial das estações	59
Figura 5.16 - Boxplots dos valores de fósforo total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020. a 2024	60
Figura 5.17 - Dendrograma dos valores de fósforo total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco	61
Figura 5.18 - Dendrograma dos valores de fósforo total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 considerando o período chuvoso	62
Figura 5.19 - Resultados do parâmetro sólidos totais em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).	64
Figura 5.20 - Resultados do parâmetro sólidos totais em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).	65
Figura 5.21 - Boxplots dos valores de sólidos totais em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024.	66
Figura 5.22 - Dendrograma dos valores de sólidos totais em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco	67
Figura 5.23 - Dendrograma dos valores de sólidos totais em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 a 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	68
Figura 5.24 - Resultados da turbidez em Água Superficial da Estação RD033 e RD045	70
Figura 5.25 - Resultados da turbidez em Água Superficial da Estação RD059 e RD067	71

Figura 5.26 - Boxplots dos valores de turbidez em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024	72
Figura 5.27 - Dendrograma dos valores de turbidez em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco	73
Figura 5.28 - Dendrograma dos valores de turbidez em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	74
Figura 5.29 - Resultados do ferro dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045	76
Figura 5.30 - Resultados do ferro dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067	77
Figura 5.31 – Boxplots dos valores de ferro dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024	78
Figura 5.32 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco	79
Figura 5.33 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 a 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	80
Figura 5.34 - Resultados do manganês total em Água Superficial da Estação RD033 e RD045	82
Figura 5.35 - Resultados do manganês total em Água Superficial da Estação RD059 a RD067	83
Figura 5.36 - Boxplots dos valores de manganês total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024	84
Figura 5.37 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020, 2021 e 2023 considerando os períodos chuvoso e seco	85
Figura 5.38 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	86
Figura 5.39 - Resultados do alumínio dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024)	88

Figura 5.40 - Resultados do alumínio dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024)	89
Figura 5.41 - Boxplots dos valores de alumínio dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024	90
Figura 5.42 - Dendrograma dos valores de alumínio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco	91
Figura 5.43 - Dendrograma dos valores de alumínio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco	92

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
- CBH-Doce – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce
- CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
- CIF – Comitê Interfederativo
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental
- COPAM/CERH-MG – Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais
- DN – Deliberação Normativa
- FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas
- INMET – Instituto Nacional de Meteorologia
- IQA – Índice de Qualidade da Água
- LQ – Limite de Quantificação
- LD – Limite de Detecção
- MG – Minas Gerais
- MPMG – Ministério Público de Minas Gerais
- PIRH-Doce – Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce
- PMQQS – Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento
- PMQACH – Plano de Monitoramento da Qualidade da Água para Consumo Humano
- QGIS – Sistema de Informações Geográficas Livre para Processamento Espacial
- R – Software estatístico utilizado para análises e geração de gráficos
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
- UTM – Universal Transverse Mercator (Sistema de Coordenadas)
- VMP – Valor Máximo Permitido
- °C – Grau Celsius
- mg/L – Miligrama por litro
- NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez
- km² – Quilômetro quadrado
- m³ – Metro cúbico

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivo específicos	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 A importância da Bacia do rio Doce e os principais usos da água	16
3.2 Rompimento da Barragem de Fundão e Santarém	18
3.3 As prováveis causas do rompimento	19
3.4 Plano de amostragem e rede de monitoramento do rio Doce	20
3.5 Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde	23
3.6 Legislação Ambiental	26
3.6.1 Lei nº 9.433: Lei das águas	27
3.6.2 Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH: nº 08/2022 e Resolução Conama: nº 357/2005	28
4 METODOLOGIA	36
4.1 Área de estudo	36
4.2 Procedimentos metodológicos	38
4.2.1 Coleta de Dados	38
4.3 Parâmetros de análise de qualidade da água	39
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Resultados e discussões dos Parâmetros de qualidade da água	42
5.2 pH	43
5.3 Oxigênio Dissolvido	49
5.4 Nitrogênio total	55
5.5 Fósforo total	61
5.6 Sólidos totais	67
5.7 Turbidez	73
5.8 Ferro dissolvido	79
5.9 Manganês total	85
5.10 Alumínio dissolvido	91
6 CONCLUSÕES	98
7 RECOMENDAÇÕES	100
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água é um dos principais indicadores da saúde humana e do meio ambiente. A crescente interferência humana nos recursos hídricos, especialmente por meio de atividades industriais e mineradoras, têm gerado sérios impactos sobre rios, lagos e aquíferos, comprometendo a biodiversidade aquática, o abastecimento humano e o equilíbrio dos ciclos naturais.

Em novembro de 2015 ocorreu um dos casos mais emblemáticos de desastre ambiental causado pela ação humana no Brasil, o rompimento da barragem de Fundão, no município de Mariana, Minas Gerais. Segundo o Ministério Público de Minas Gerais (MPMG, 2016), a estrutura, pertencente à mineradora Samarco, liberou cerca de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração, que atingiram diretamente a bacia do rio Doce, causando destruição ambiental, prejuízos socioeconômicos e comprometimento da qualidade da água ao longo de centenas de quilômetros até sua foz, no Espírito Santo. Dez anos após o ocorrido, permanece o desafio de compreender os efeitos de longo prazo do desastre sobre a qualidade da água do rio Doce. Embora ações de monitoramento e mitigação tenham sido implementadas por órgãos ambientais e instituições responsáveis, ainda há incertezas sobre o grau de recuperação do ecossistema aquático afetado, especialmente em relação à presença de contaminantes e à alteração dos parâmetros físico-químicos da água. Atualmente, o monitoramento para acompanhar o cenário pós-rompimento conta com coletas mensais de águas superficiais e semestrais de sedimentos, realizadas em 14 estações de amostragem localizadas nos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce (IGAM, 2023), os quais foram afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão em 2015.

O tema em questão foi escolhido com vistas a uma avaliação, mais recente, das condições da qualidade da água visando o abastecimento público do rio Doce, a partir dos dados de monitoramento realizado pelo IGAM, no período de 2020 a 2024.

Os estudos a serem desenvolvidos pretendem analisar e discutir os dados de qualidade da água do rio Doce com base nos monitoramentos realizados pelo IGAM, comparando-os com os padrões da CONAMA 357/2005 a nível Federal e da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 8/2022, a nível Estadual, bem como da literatura pertinente. A análise será realizada com base na interpretação de parâmetros físico-químicos, bem como na aplicação de índices integrados, como o Índice de Qualidade da Água (IQA).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como objetivo analisar e discutir os dados sobre a qualidade da água do rio Doce, nas proximidades das captações para consumo humano monitoradas pelo IGAM, após rompimento da barragem de contenção de rejeitos Fundão, ocorrido no dia 5 de novembro de 2015, sob responsabilidade da empresa SAMARCO, localizada no município de Mariana, Minas Gerais.

2.2 Objetivo específicos

1. Fazer um levantamento comparativo dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água monitorados pelo IGAM com os dados de classificação segundo Resolução CONAMA 357/2005 e Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 8/2022;
2. Verificar se o rompimento da barragem de contenção de rejeitos Fundão no município Mariana, Minas Gerais, ocasionou em alterações significativas quanto aos usos preponderantes do trecho que será analisado na calha do rio Doce e afluentes afetados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção aborda a revisão da literatura, fornecendo uma apresentação dos conceitos fundamentais que serão abordados neste estudo.

3.1 A importância da Bacia do rio Doce e os principais usos da água

A bacia hidrográfica do rio Doce possui área de drenagem de 86.715 quilômetros quadrados, sendo que 86% estão no Leste mineiro e 14% no Nordeste do Espírito Santo (CBH-DOCE, 2025). Se tratando do estado de Minas Gerais, os principais afluentes do rio Doce são os rios Xopotó, Casca, Matipó, Cuieté e Manhuaçu, localizados à margem direita, enquanto à margem esquerda destacam-se os rios Piracicaba, Santo Antônio, Corrente Grande e Suaçuí Grande (CETEC, 1983; MORAES, 1974). Entre os afluentes que estão localizados à margem esquerda, no Espírito Santo, encontram-se os rios Pancas, Mutum e São João Grande, e da margem direita, os rios Guandu, Santa Joana e Santa Maria do Rio Doce.

A população da bacia é estimada em aproximadamente 3,5 milhões de pessoas, distribuídas por 229 municípios, dos quais 203 estão localizados em Minas Gerais e 26 no Espírito Santo (ANA, 2025). A maioria desses municípios possui até 20 mil habitantes e cerca de 73% da população vive em áreas urbanas, com destaque para os municípios com até 10 mil habitantes, onde quase metade da população reside na zona rural. As sub-bacias dos rios Piranga e Piracicaba, por sua vez, concentram cerca de 48% da população total da bacia e apresentam os maiores índices de PIB industrial (CBH-DOCE, 2025).

A bacia do rio Doce apresenta um relevo predominantemente montanhoso, com áreas onduladas e acidentadas. Atualmente, os cursos d'água continuam exercendo papel essencial na economia local, sendo amplamente utilizados para abastecimento doméstico, atividades agropecuárias, processos industriais e geração de energia. Além dessas funções, os rios da bacia também atuam como receptores de efluentes e rejeitos oriundos de diferentes usos antrópicos (CBH-DOCE, 2025).

Nesse contexto, os usos múltiplos da água estão diretamente relacionados à disponibilidade hídrica da região. Conforme aponta o Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (PIRH-DOCE), cerca de 50% da água é destinada à irrigação, configurando-se como a principal atividade consumidora. Os usos urbanos e industriais, com demandas de 22% e 17%, respectivamente (SOUZA et al., 2010). A água utilizada no setor industrial abrange desde a

produção de alimentos, bebidas e papel até a mineração, fabricação de produtos químicos e biocombustíveis. No meio urbano, o recurso é fundamental para residências, escolas, comércios e instituições públicas. Já os menores percentuais são destinados à dessedentação de animais (7%) e ao abastecimento rural (4%) (IGAM, 2020).

Quanto ao abastecimento de água, a bacia do rio Doce apresenta índices positivos de cobertura, atendendo cerca de 96,01% da população da bacia, valor superior às médias de Minas Gerais (83,84%) e do Brasil (84,24%) (IBGE, 2022). Apesar do bom desempenho em cobertura, o sistema apresenta desafios relacionados à eficiência. Aproximadamente 30% da água captada é perdida na distribuição, por vazamentos, ligações irregulares ou falhas de medição, valor ainda abaixo das perdas médias do estado (36,77%) e do país (36,24%). Outro destaque é o elevado consumo médio per capita, que atinge 231,1 litros por habitante/dia, ultrapassando a média estadual (167,53 L/hab.dia) e nacional (153,26 L/hab.dia).

A Deliberação Normativa CBH-Doce nº 113, aprovada em agosto e publicada oficialmente em Outubro de 2023, marcou um importante avanço na gestão dos recursos hídricos da bacia do Rio Doce. Essa normativa teve como principal objetivo revisar o Plano Integrado de Recursos Hídricos e estabelecer o novo enquadramento dos corpos d'água superficiais federais da bacia, conforme os usos prioritários projetados para o período de 2023 a 2042 (CBH-DOCE, 2023). Esse enquadramento segue os critérios definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, que classifica as águas doces em cinco categorias com base na qualidade exigida para seus principais usos. No caso da bacia do Rio Doce, a maior parte dos cursos d'água foi enquadrada nas Classes 1 e 2, conforme estabelecido no PIRH-Doce e nos Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos da região (SOUZA et al., 2010).

A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece, no artigo 4º, a classificação das águas doces conforme seus usos preponderantes e os níveis de qualidade necessários para cada finalidade. As águas de Classe 1 são aquelas que podem ser utilizadas para abastecimento humano após tratamento simplificado, além de atenderem à proteção das comunidades aquáticas, à recreação de contato primário (como natação e mergulho), à irrigação de hortaliças consumidas cruas e frutas cultivadas próximas ao solo, e ainda à proteção de comunidades aquáticas em Terras Indígenas. Já as águas enquadradas como Classe 2 admitem usos mais amplos, como o abastecimento humano após tratamento convencional, à proteção da biota aquática, a recreação

de contato primário, à irrigação de culturas alimentares e áreas de lazer com contato direto com o público, além de servirem à aquicultura e à pesca (CONAMA, 2005).

O rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, desencadeou um desastre socioambiental sem precedentes na história da mineração brasileira, cujos efeitos ainda são sentidos em toda a bacia do rio Doce. Conforme destacado pelo órgão ambiental competente, o evento gerou impactos agudos de escala regional, como a destruição de ecossistemas e prejuízos à fauna, flora e às condições socioeconômicas das comunidades afetadas, desestruturando a resiliência do sistema hídrico local (BRASIL, 2015, apud LOPES, 2020). Entre as consequências mais graves, destaca-se a contaminação dos corpos d'água, comprometendo diretamente o abastecimento humano.

3.2 Rompimento da Barragem de Fundão e Santarém

Em 5 de novembro de 2015, ocorreu o colapso da barragem de Fundão, situada no município de Mariana, em Minas Gerais, resultando em um dos maiores desastres ambientais já registrados no Brasil. A estrutura, pertencente à mineradora Samarco S/A, controlada pelas empresas Vale S.A. e BHP Billiton, havia sido construída com o objetivo de armazenar os rejeitos oriundos da atividade de extração de minério de ferro na região (LOPES, 2020). O colapso da barragem de Fundão (Figura 3.1) resultou na liberação de cerca de 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos de mineração (MPMG, 2016).

Figura 3.1 - Vista aérea da Barragem de Fundão em Mariana - MG antes e após o rompimento.



Fonte: Google Earth Pro (2015).

As barragens construídas pela mineradora Samarco S/A tinham como função armazenar os rejeitos gerados durante a extração do minério de ferro. De acordo com estudos iniciais (BRASIL, 2015), somente a barragem de Fundão continha cerca de 50 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Esses materiais eram classificados, conforme a norma NBR 10.004, como resíduos sólidos, não perigosos e não inertes, compostos principalmente por areia e metais como ferro e manganês.

Conforme Gonçalves, Vespa e Fusco (2015), o funcionamento das barragens do complexo se dava por meio de um método amplamente adotado no setor: o aterro hidráulico. Nesse processo, os rejeitos separados do ferro durante a mineração são transportados até as barragens pela ação da gravidade, e a areia presente na parte frontal dessas estruturas atua como filtro natural para a água.

Apesar de o aterro hidráulico ainda ser o método mais amplamente utilizado no mundo, atualmente existem tecnologias mais avançadas que possibilitam a drenagem dos rejeitos de forma mais segura, com o uso de filtros específicos. No entanto, como essas técnicas podem elevar os custos de produção em até seis vezes, a maioria das empresas opta por não adotá-las. Segundo Edilson Pissato, professor de geologia de engenharia da Universidade de São Paulo (USP), as mineradoras acabam optando por métodos tradicionais e mais baratos, mesmo com os riscos associados (GONÇALVES; VESPA; FUSCO, 2015).

Logo após o desastre, a captação de água para abastecimento humano foi imediatamente comprometida em diversos municípios ribeirinhos, levando à interrupção do fornecimento e à necessidade de alternativas emergenciais (LOPES, 2020; IGAM, 2023). Estudos apontam que os cursos d'água atingidos apresentaram degradação significativa, com aumento de turbidez, presença de metais como ferro, manganês e arsênio, além da alteração dos parâmetros físico-químicos da água, que deixou de atender aos padrões da classe 2 definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (FERREIRA et al., 2021).

3.3 As prováveis causas do rompimento

Logo após o rompimento da barragem de Fundão, diversas instituições públicas iniciaram investigações paralelas com o objetivo de apurar as causas, responsabilidades e consequências do desastre. A Polícia Civil de Minas Gerais instaurou um inquérito criminal para investigar possíveis crimes ambientais, contra a vida e outras infrações associadas à tragédia (Lopes, 2020).

Essas apurações revelaram uma complexa rede de fatores que contribuíram para o colapso da estrutura, envolvendo desde falhas técnicas até negligência institucional.

Entre as principais causas técnicas identificadas estão a adoção do método de alteamento a montante, reconhecido como menos seguro, a drenagem ineficiente dos rejeitos, a deposição inadequada de materiais, o uso da barragem acima de sua capacidade e a redução da largura da praia de rejeitos. Adicionalmente, a instalação insuficiente de instrumentos de monitoramento e modificações não autorizadas na geometria da estrutura agravaram ainda mais os riscos (Barbosa; Filgueira; Silva, 2023).

Do ponto de vista geológico, a liquefação dos rejeitos, processo em que materiais saturados perdem resistência e se comportam como fluidos, foi um dos fatores determinantes para o rompimento. A geomorfologia do local, caracterizada por relevo que favorece o acúmulo de água, associada à ocorrência de sismos naturais ou induzidos, também contribuiu para a instabilidade da barragem. Soma-se a isso a influência de interesses econômicos, que levaram ao contingenciamento de recursos e à contratação de consultorias com baixa autonomia técnica, muitas vezes impedidas de reportar falhas graves por receio de retaliações ou substituição (Barbosa; Filgueira; Silva, 2023).

3.4 Plano de amostragem e rede de monitoramento do rio Doce

Após o rompimento da barragem de Fundão, foi estabelecido um sistema para o acompanhamento ambiental na bacia do rio Doce. Nesse contexto, foi instituído o Programa de Monitoramento da Bacia do Rio Doce (PG-38), que engloba ações contínuas para avaliar a qualidade da água e dos sedimentos da região atingida. Entre as principais iniciativas do programa, destaca-se o Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS), criado em 2017 e executado sob responsabilidade da Fundação Renova, com a supervisão do Grupo Técnico de Acompanhamento (GTA-PMQQS) e do Comitê Interfederativo (CIF) (IGAM, 2023; Fundação Renova, 2024).

O PMQQS substituiu o monitoramento emergencial implantado logo após o desastre e passou a operar com foco em padronização, transparência e continuidade dos dados gerados, visando orientar ações de recuperação ambiental (IGAM, 2023). Além disso, o Plano de Monitoramento da Qualidade da Água para Consumo Humano (PMQACH) também foi estruturado no âmbito do PG-38, em parceria com as secretarias estaduais e municipais de saúde, bem como com o

Ministério da Saúde, com foco na prevenção de riscos à saúde da população e na vigilância da qualidade da água destinada ao consumo humano (Fundação Renova, 2024).

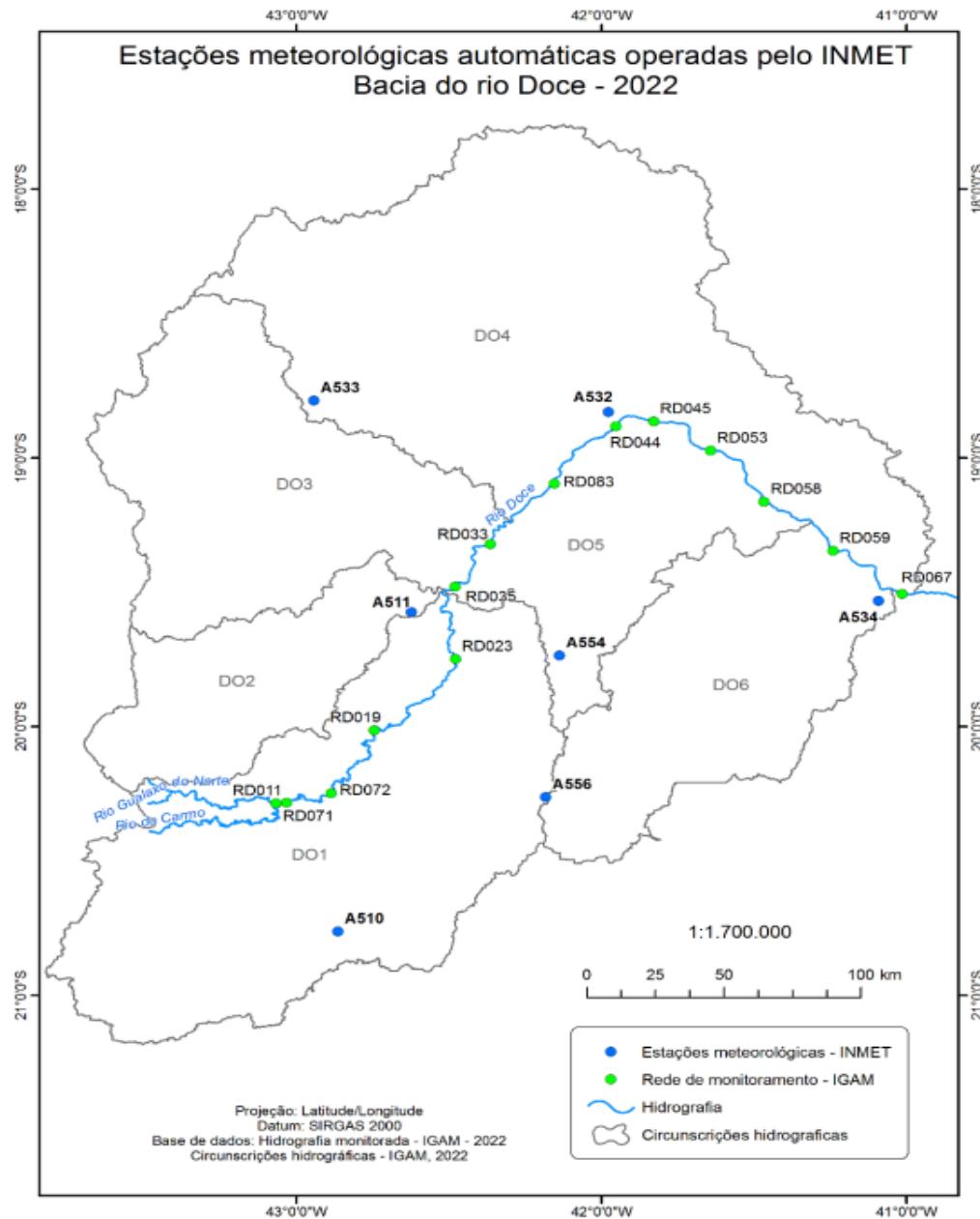
A rede de monitoramento implantada pelo PMQQS cobre uma extensão de aproximadamente 920 km, incluindo cerca de 690 km de rios e lagoas e mais de 230 km de áreas estuarinas e costeiras. A estrutura é composta por 80 pontos de amostragem convencionais e 22 estações automáticas, sendo que parte destas é equipada com sondas multiparamétricas que registram informações em tempo real (IGAM, 2023).

Os dados coletados abrangem mais de 100 parâmetros físico-químicos e biológicos na água, além de 53 parâmetros nos sedimentos, totalizando anualmente mais de 1,5 milhão de registros ambientais. As amostragens manuais ocorrem mensalmente, enquanto os sedimentos são analisados trimestralmente, e os dados provenientes das estações automáticas são transmitidos de forma contínua (Fundação Renova, 2024; IGAM, 2023).

Além dos parâmetros diretamente relacionados à qualidade da água e dos sedimentos, o monitoramento da bacia também considera fatores climáticos que influenciam significativamente os resultados. De acordo com o IGAM (2023), a precipitação pluviométrica exerceu papel relevante na intensidade dos impactos causados pelo rompimento da barragem de Fundão nos corpos hídricos da bacia do rio Doce.

A Figura 3.2 ilustra a localização das estações de monitoramento dentro da bacia do rio Doce, em Minas Gerais, evidenciando a cobertura representativa da rede meteorológica utilizada na análise.

Figura 3.2 - Localização das estações meteorológicas automáticas do INMET na bacia do rio Doce, Minas Gerais



Fonte: IGAM, 2023

Após o rompimento da barragem de Fundão, foi necessário estabelecer um regime rigoroso de monitoramento da bacia hidrográfica do rio Doce, com o objetivo de acompanhar os impactos ambientais causados e orientar ações de mitigação. Em um primeiro momento, durante a fase emergencial, as coletas de água e sedimentos foram realizadas com maior frequência,

considerando a necessidade de avaliar rapidamente as alterações nos corpos hídricos afetados (IGAM, 2023).

Com o avanço do Programa de Monitoramento Quali-quantitativo Sistemático de Água e Sedimento (PMQQS), a partir de 2017, a frequência das amostragens passou por adaptações conforme os resultados obtidos e o comportamento ambiental da bacia. Atualmente, o monitoramento da água ocorre de forma mensal, enquanto a análise de sedimentos é realizada trimestralmente, refletindo um cenário mais estável em termos de variações nos parâmetros analisados (IGAM, 2023).

De acordo com o IGAM (2023), essas frequências são continuamente reavaliadas, levando em consideração não apenas os dados ambientais coletados, mas também fatores como as intervenções promovidas pela Fundação Renova, o regime hidrológico da região e os efeitos das condições climáticas. Essa abordagem adaptativa garante maior eficiência no processo de monitoramento e permite respostas mais precisas a eventuais alterações na qualidade dos recursos hídricos.

3.5 Metais pesados provenientes de rejeitos de mineração e seus efeitos sobre a saúde

A presença de metais pesados na bacia do rio Doce, especialmente após o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana (MG), representa um dos principais impactos ambientais decorrentes da atividade mineradora. O rejeito proveniente do beneficiamento do minério de ferro é composto por partículas de diferentes granulometrias, entre elas a argila, que, ao entrar em contato com a água, adquire características de lama, com elevada capacidade de dispersão (Luz e Lins, 2010). Esse tipo de sedimento coloidal possui alta mobilidade nos corpos hídricos e grande potencial de adsorver metais pesados, como ferro, manganês, alumínio, cádmio, chumbo e cobre, promovendo sua difusão ao longo do leito fluvial (Polignano e Lemos, 2020).

A introdução desses contaminantes ao ambiente aquático gera riscos significativos para a fauna, flora e saúde humana. Conforme apontam Pacheco et al. (2023), mesmo em baixas concentrações, metais pesados podem se acumular em organismos vivos, sendo transferidos ao longo da cadeia alimentar. Esse processo de bioacumulação eleva a toxicidade ambiental e pode comprometer a qualidade da água utilizada para consumo e irrigação.

Duarte (2008) destaca que a contaminação por rejeitos minerais não se limita a acidentes como o de Mariana, mas pode ocorrer também por descarte inadequado de resíduos e processos erosivos em áreas mineradas, especialmente durante períodos de chuvas intensas. Embora a geologia local, em especial o Quadrilátero Ferrífero, contribua naturalmente para a presença de alguns metais na bacia, os níveis atingidos após o desastre evidenciam a predominância de uma carga antrópica sobre o sistema hídrico, superando os padrões de equilíbrio ecológico.

Após o rompimento da barragem de Fundão, no distrito de Bento Rodrigues, foram realizadas coletas de amostras de água em três pontos distintos do rio Doce, com o objetivo de avaliar a concentração de metais pesados e os efeitos da lama de rejeitos liberada. O ponto P1, situado a montante do local do desastre, serviu como controle, enquanto os pontos P2 e P3, localizados a montante e a jusante de um dique de contenção, respectivamente, foram diretamente impactados pela lama (Miranda, 2015). As coordenadas geográficas dos pontos de amostragem, conforme descrito na Tabela 3.1 evidenciam a distribuição espacial das coletas e a elevação relativa de cada local em relação ao nível do mar.

Tabela 3.1 - Coordenadas geográficas dos pontos de amostragem no rio Doce

COORDENADAS UTM*			
Ponto	E(m)	N (m)	Elevação (m)
P1	662.820	7.756.661	673
P2	664.527	7.760.264	695
P3	664.953	7.761.310	661

*Datum WGS-84, fuso 23K.

Fonte: Carvalho et al. (2017)

A análise espectrofotométrica revelou que mesmo o ponto P1, teoricamente não impactado, já apresentava concentrações de níquel, cobre e alumínio acima dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA 357/2005 para águas de Classe 3, o que pode ser explicado pelas características geológicas da região, rica em mineralizações sulfetadas (Mendes, 2012). Nos pontos P2 e P3, os níveis de todos os metais analisados, Chumbo (Pb), Arsênio (As), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Alumínio (Al) e Manganês (Mn), superaram os valores máximos permitidos, demonstrando o impacto da contaminação da lama de rejeitos na qualidade da água (Ribeiro, 2016).

Essas elevadas concentrações levantam preocupações quanto ao uso da água para abastecimento humano. Elementos como chumbo e arsênio são bioacumulativos e tóxicos mesmo em baixas concentrações, podendo causar sérios danos à saúde, como distúrbios neurológicos e câncer (GUIMARÃES, 2013; D'OLIVEIRA et al., 2007). Além disso, os metais cobre e níquel podem afetar diretamente a fauna aquática, danificando estruturas branquiais de peixes e contribuindo para a morte da ictiofauna (Freitas et al., 2016).

De acordo com a Tabela 3.2 do estudo de Carvalho et al. (2017), os níveis de contaminação foram significativamente maiores nos pontos P2 e P3. Em ambos os locais, as concentrações de todos os metais analisados (Pb, As, Ni, Cu, Al e Mn) estavam acima dos limites legais. Isso evidencia a influência direta da lama de rejeitos nas alterações da qualidade da água, reforçando a necessidade de medidas de mitigação (Carvalho et al. 2017).

Tabela 3.2 - Concentrações médias (mgL^{-1}) e desvios padrão dos metais pesados analisados para as amostras de água coletadas no rio Doce, Mariana, Minas Gerais.

Metal	PONTOS DE AMOSTRAGEM			VMP*
	P1	P2	P3	
Pb	$0,013 \pm 0,0aA$	$0,097 \pm 0,01bA$	$0,089 \pm 0,00bA$	0,033
As	$0,012 \pm 0,00aA$	$0,911 \pm 0,01cB$	$0,736 \pm 0,02bB$	0,033
Ni	$0,051 \pm 0,01aB$	$1,078 \pm 0,04bC$	$1,056 \pm 0,02bC$	0,025
Cu	$0,062 \pm 0,03aB$	$1,115 \pm 0,02bC$	$1,427 \pm 0,04cC$	0,013
Al	$0,465 \pm 0,01aC$	$9,432 \pm 0,09cE$	$8,914 \pm 0,07bD$	0,2
Mn	$0,041 \pm 0,02aB$	$1,638 \pm 0,17bD$	$0,655 \pm 0,58aB$	0,5

Médias seguidas pela mesma letra minúscula nas linhas e pela mesma letra maiúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de significância. *VMP = Valor máximo permitido pela Resolução CONAMA 357/05 para Classe 3 de qualidade das águas.

Fonte: Carvalho et al. (2017)

Entre os elementos analisados, o alumínio (Al) foi o que apresentou os maiores valores, com níveis acima de 9 mg/L em P2 e P3, mais de 45 vezes acima do valor máximo permitido. Concentrações elevadas de alumínio afetam o sabor da água e, segundo estudos epidemiológicos realizados no Reino Unido, podem estar associadas ao aumento na incidência da Doença de Alzheimer (Di Bernardo; Paz, 2008).

Em relação ao manganês (Mn), embora o ponto P1 tenha registrado um valor compatível com a Classe 1 da CONAMA (0,041 mg/L), os pontos P2 e P3 apresentaram valores bastante elevados. A ingestão contínua de manganês em excesso pode ocasionar distúrbios neuropsiquiátricos semelhantes ao Parkinson (D’Oliveira et al., 2007).

Apesar de alguns estudos indicarem que o rejeito seria formado majoritariamente por sílica e, portanto, não tóxico, os dados apontam para uma realidade distinta. A lama contém partículas finas de argila com alta capacidade de adsorver metais pesados, aumentando a mobilidade e o risco de contaminação a longas distâncias, especialmente em períodos de maior vazão do rio. (LOPES, 2016; POLIGNANO; LEMOS, 2020).

Portanto, os dados confirmam que os rejeitos lançados no rio Doce alteraram significativamente sua qualidade hídrica, principalmente no que se refere à presença de metais pesados em concentrações superiores às permitidas pelas normas ambientais brasileiras e internacionais, o

que compromete seu uso para abastecimento e ameaça a saúde dos ecossistemas aquáticos e humanos a jusante do local do rompimento.

3.6 Legislação Ambiental

A legislação ambiental brasileira constitui um conjunto articulado de normas, leis e regulamentos voltados à preservação do meio ambiente, à sustentabilidade das ações humanas e à proteção da saúde pública. Ela estabelece parâmetros para o controle da poluição, a conservação da biodiversidade e o uso racional dos recursos naturais. Através dessa estrutura normativa, busca-se garantir que empreendimentos industriais, comerciais e atividades cotidianas se desenvolvam com o menor impacto ambiental possível. Além disso, a legislação define responsabilidades e mecanismos de fiscalização, contribuindo diretamente para o alcance do desenvolvimento sustentável e para a proteção dos ecossistemas, de modo a assegurar condições ambientais adequadas às atuais e futuras gerações (Silva, 2024).

3.6.1 *Lei nº 9.433: Lei das águas*

Um marco importante no contexto jurídico ambiental foi a promulgação da Lei nº 9.433/1997, conhecida como Lei das Águas, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e organizou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Antes de sua vigência, a gestão da água no Brasil era tratada por meio de normas fragmentadas de caráter sanitário, econômico ou fundiário. Com a nova legislação, a água passou a ser reconhecida como um bem de domínio público, finito e dotado de valor econômico, priorizando-se, em situações de escassez, seu uso para consumo humano e dessedentação de animais (BRASIL, 1997).

A promulgação da Lei nº 9.433/1997 estabeleceu um novo paradigma na gestão dos recursos hídricos no Brasil ao adotar uma abordagem descentralizada e participativa. Essa legislação definiu as bacias hidrográficas como unidades fundamentais para o planejamento e a execução das ações de gestão, incorporando a atuação conjunta de representantes do poder público, da sociedade civil organizada e dos usuários da água. Esses atores passaram a compor os Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs), espaços nos quais as decisões são construídas de forma colaborativa. Entre os principais objetivos da política instituída pela lei estão a garantia de disponibilidade hídrica com qualidade e em quantidade adequada para as gerações atuais e futuras, o incentivo ao uso racional e múltiplo da água e a adoção de medidas preventivas frente a eventos hidrológicos adversos, sejam eles de origem natural ou decorrentes da ação antrópica (BRASIL, 1997).

A lei das águas tem como base a gestão descentralizada e integrada dos recursos hídricos, incentivando a participação ativa dos usuários, da sociedade civil e dos entes governamentais. Dentre seus objetivos centrais, destacam-se a garantia do acesso à água em condições adequadas de qualidade e quantidade para as gerações atuais e futuras, a promoção do uso múltiplo e sustentável da água, além da implementação de ações preventivas e corretivas diante de eventos hidrológicos extremos, sejam eles naturais ou provocados por interferências humanas (SILVA, 2024).

3.6.2 Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH: nº 08/2022 e Resolução Conama: nº 357/2005

Em Minas Gerais, a regulamentação referente à classificação dos corpos hídricos e às diretrizes ambientais para seu enquadramento esteve, por muitos anos, disposta na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº 01, de 5 de maio de 2008 (MINAS GERAIS, 2008). No entanto, essa norma foi revogada e substituída pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08, de 21 de novembro de 2022, que passou a estabelecer novos critérios para a classificação dos corpos de água, bem como diretrizes para o seu enquadramento e condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos no estado. A seguir, na Tabela 3.3, é possível visualizar um comparativo entre a legislação anterior e a atual sobre o enquadramento dos corpos de água em Minas Gerais, destacando os principais avanços normativos.

Tabela 3.3 - Comparativo entre a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 01/2008 e a DN COPAM/CERH nº 08/2022.

Aspecto	DN COPAM/CERH nº 01/2008 (Revogada)	DN COPAM/CERH nº 08/2022 (Vigente)
Base legal de referência	Resolução CONAMA nº 357/2005	Resoluções CONAMA nº 357/2005, CONAMA nº 430/2011 e CONAMA nº 274/2000,
Objetivo principal	Estabelecer critérios de enquadramento e padrões de qualidade	Estabelecer novos critérios para classificação, enquadramento e padrões de lançamento
Classificação dos corpos d'água	Classes definidas pela CONAMA 357/2005	Mantém a classificação por classes, mas com maior detalhamento técnico e operacional
Padrões de lançamento de efluentes	Não estabelecia normas específicas sobre efluentes	Inclui condições e padrões específicos de lançamento de efluentes líquidos nos corpos d'água
Instrumentos de gestão	Diretrizes gerais para planos de bacia	Articulação direta com o Plano Estadual de Recursos Hídricos, SINGREH e outros planos ambientais
Integração com políticas públicas	Pouco detalhada	Promove integração entre gestão ambiental e de recursos hídricos
Participação social	Previa participação, mas com mecanismos limitados	Reforça o papel dos CBHs, conselhos e audiências públicas
Avaliação e revisão periódica	Não exigia prazos definidos	Exige monitoramento e revisão periódica do enquadramento dos corpos d'água

Fonte: Adaptado de Minas Gerais (2008, 2022).

Em nível federal, os parâmetros de qualidade das águas superficiais continuam sendo definidos pela Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que trata da classificação dos corpos de água e dispõe sobre os padrões de qualidade exigidos para diferentes usos (BRASIL, 2005).

As diretrizes definidas pelas resoluções ambientais, como a Resolução CONAMA nº 357/2005 e a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08/2022, apresentam elementos fundamentais para a proteção dos recursos hídricos no Brasil. Entre os principais pontos abordados, destacam-se:

Estabelecimento de Padrões de Qualidade: As resoluções definem limites máximos para a presença de substâncias químicas, além de parâmetros físicos e microbiológicos na água. Esses padrões buscam assegurar a qualidade da água destinada a diferentes usos, como o abastecimento público, atividades de lazer, irrigação e a manutenção da vida aquática (SILVA, 2024).

Salvaguarda da Saúde Humana e dos Ecossistemas: Os limites definidos também têm como função proteger a saúde da população que utiliza os corpos hídricos, bem como preservar os ecossistemas aquáticos, evitando os efeitos nocivos resultantes da poluição (SILVA, 2024).

Classificação dos Corpos d'Água: Os cursos d'água são classificados com base nos usos predominantes e nas condições ambientais. Essa categorização vai desde classes mais restritivas, como as águas de Classe Especial, até a Classe IV, que admite usos menos exigentes em termos de qualidade (SILVA, 2024).

Diretrizes para Monitoramento e Fiscalização: As normativas preveem ações contínuas de monitoramento da qualidade da água, além de atribuírem responsabilidades aos órgãos ambientais competentes. Tais ações incluem o controle da poluição e a aplicação de medidas corretivas em caso de descumprimento dos parâmetros estabelecidos (SILVA, 2024).

Ferramenta de Gestão Ambiental: Os dispositivos legais também funcionam como instrumentos estratégicos para o planejamento e a gestão ambiental. Orientam a formulação de políticas públicas, planos de bacia hidrográfica e processos de licenciamento ambiental de empreendimentos com potencial de impacto sobre os recursos hídricos (SILVA, 2024).

Segundo a legislação ambiental vigente, os corpos hídricos do rio Doce são, predominantemente, enquadrados como Classe 2, o que significa que suas águas são aptas para o abastecimento público, desde que submetidas a tratamento convencional, além de permitirem o uso para

recreação de contato primário, como natação, e para irrigação de hortaliças e culturas que são consumidas cruas (CONAMA, 2005; COPAM/CERH, 2022).

Entretanto, cabe destacar que a qualidade da água pode apresentar variações significativas ao longo da bacia, especialmente após o rompimento da barragem de Fundão. Em razão dessas variações, a adequação dos corpos hídricos às classes de enquadramento estabelecidas pode ser comprometida em determinados trechos (IGAM, 2023).

Ressalta-se que, de acordo com ambas as legislações atualmente em vigor, a Resolução CONAMA nº 357/2005 e a Deliberação Normativa COPAM nº 08/2022, os limites máximos permitidos para as substâncias avaliadas são equivalentes no que se refere à classe 2 dos corpos d'água. Dessa forma, os parâmetros utilizados neste estudo para o monitoramento da qualidade das águas superficiais seguem os mesmos critérios estabelecidos por essas normativas.

Em seu Art. 15º, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece que, para as águas doces de Classe 2, aplicam-se as condições e padrões definidos para a Classe 1 indicados na tabela 3.4 a seguir, com exceção dos parâmetros especificados no próprio Art. 15, que deverão ser observados conforme disposto.

Não será permitida a presença de corantes provenientes de fontes antrópicas que não sejam removíveis por processo de coagulação, sedimentação e filtração convencionais;

Coliformes termotolerantes: para uso de recreação de contato primário deverá ser obedecida a Resolução CONAMA no 274, de 2000. Para os demais usos, não deverá ser excedido um limite de 1.000 coliformes termotolerantes por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos 6 (seis) amostras coletadas durante o período de um ano, com frequência bimestral. A E. coli poderá ser determinada em substituição ao parâmetro coliforme termotolerantes de acordo com limites estabelecidos pelo órgão ambiental competente;

III - cor verdadeira: até 75 mg Pt/L;

IV - Turbidez: até 100 UNT;

V - DBO 5 dias a 20°C até 5 mg/L O₂;

VI - OD, em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L O₂;

VII - clorofila a: até 30 µg/L;

VIII - densidade de cianobactérias: até 50000 cel/mL ou 5 mm³/L; e,

IX - fósforo total:

a) até 0,030 mg/L, em ambientes lênticos; e,

b) até 0,050 mg/L, em ambientes intermediários, com tempo de residência entre 2 e 40 dias, e tributários diretos de ambiente lêntico.

Tabela 3.4 - Padrões de Qualidade de Água, Tabela II - Classe 1 - Águas Doces.

PARÂMETRO	VALOR MÁXIMO
Clorofila a	10 µg/L
Densidade de cianobactérias	20.000 cel/mL ou 2 mm ² /L
Sólidos dissolvidos totais	500 mg/L
PARÂMETRO INORGÂNICO	VALOR MÁXIMO
Alumínio dissolvido	0,1 mg/L Al
Antimônio	0,005 mg/L Sb
Arsênio total	0,01 mg/L As
Bário total	0,7 mg/L Ba
Berílio total	0,04 mg/L Be
Boro total	0,5 mg/L B
Cádmio total	0,001 mg/L Cd
Chumbo total	0,01 mg/L Pb
Cianeto livre	0,005 mg/L CN
Cloreto total	250 mg/L Cl
Cloro residual total (combinado + livre)	0,01 mg/L Cl
Cobalto total	0,05 mg/L Co
Cobre dissolvido	0,009 mg/L Cu
Cromo total	0,05 mg/L Cr
Ferro dissolvido	0,3 mg/L Fe
Fluoreto total	1,4 mg/L F
Fósforo total (ambiente lêntico)	0,020 mg/L P
Fósforo total (ambiente intermediário)	0,025 mg/L P
Fósforo total (ambiente lótico)	0,1 mg/L P
Lítio total	2,5 mg/L Li
Manganês total	0,1 mg/L Mn
Mercúrio total	0,0002 mg/L Hg
Níquel total	0,025 mg/L Ni
Nitrato	10,0 mg/L N
Nitrito	1,0 mg/L N
Nitrogênio amoniacial total	ver tabela de faixas
Prata total	0,01 mg/L Ag
Selênio total	0,01 mg/L Se
Sulfato total	250 mg/L SO ₄
Sulfeto (H ₂ S não dissociado)	0,002 mg/L S
Urânio total	0,02 mg/L U
Vanádio total	0,1 mg/L V
Zinco total	0,18 mg/L Zn

Tabela 3.4 – continua

PARÂMETRO ORGÂNICO	VALOR MÁXIMO
Acrilamida	0,5 µg/L
Alacloro	20 µg/L
Aldrin + Dieldrin	0,005 µg/L
Atrazina	2 µg/L
Benzeno	0,005 mg/L
Benzidina	0,001 µg/L
Benzo(a)antraceno	0,05 µg/L
Benzo(a)pireno	0,05 µg/L
Benzo(b)fluoranteno	0,05 µg/L
Benzo(k)fluoranteno	0,05 µg/L
Carbaril	0,02 µg/L
Clordano (cis + trans)	0,04 µg/L
2-Clorofenol	0,1 µg/L
Criseno	0,05 µg/L
2,4-D	4,0 µg/L
Demeton (Demeton-O + Demeton-S)	0,1 µg/L
Dibenzo(a,h)antraceno	0,05 µg/L
1,2-Dicloroetano	0,01 mg/L
1,1-Dicloroeteno	0,003 mg/L
2,4-Diclorofenol	0,3 µg/L
Diclorometano	0,02 mg/L
DDT (soma)	0,002 µg/L
Dodecacloropentaciclododecano	0,001 µg/L
Endossulfan (α + β + sulfato)	0,056 µg/L
Endrin	0,004 µg/L
Estireno	0,02 mg/L
Etilbenzeno	90,0 µg/L
Fenóis totais	0,003 mg/L
Glifosato	65 µg/L
Gution	0,005 µg/L
Heptacloro epóxido + Heptacloro	0,01 µg/L
Hexaclorobenzeno	0,0065 µg/L
Indeno(1,2,3-cd)pireno	0,05 µg/L
Lindano (γ-HCH)	0,02 µg/L
Malation	0,1 µg/L
Metolacloro	10 µg/L
Metoxicloro	0,03 µg/L
Paration	0,04 µg/L
Pentaclorofenol	0,002 mg/L

Tabela 3.4 – continuação

PARÂMETRO ORGÂNICO	VALOR MÁXIMO
PCBs - Bifenilas policloradas	0,001 µg/L
Simazina	2,0 µg/L
Substâncias tensoativas (LAS)	0,5 mg/L
2,4,5-T	2,0 µg/L
Tetracloreto de carbono	0,002 mg/L
Tetracloroeteno	0,01 mg/L
Tolueno	2,0 µg/L
Toxafeno	0,01 µg/L
2,4,5-TP	10,0 µg/L
Tributilestanho	0,063 µg/L
Triclorobenzeno (1,2,3 + 1,2,4)	0,02 mg/L
Tricloroeteno	0,03 mg/L
2,4,6-Triclorofenol	0,01 mg/L
Trifluralina	0,2 µg/L
Xileno	300 µg/L

Tabela 3.4 – conclusão

Fonte: Resolução CONAMA 357/2005 e DN Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 8/2022.

4 METODOLOGIA

4.1 Área de estudo

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) realiza o monitoramento da bacia hidrográfica do rio Doce desde 1997, por meio do Programa Águas de Minas. No entanto, após o rompimento da barragem de Fundão, ocorrido em 2015 no município de Mariana (MG), foi implementado um plano especial de monitoramento para avaliar os impactos na qualidade das águas e sedimentos dos corpos hídricos afetados.

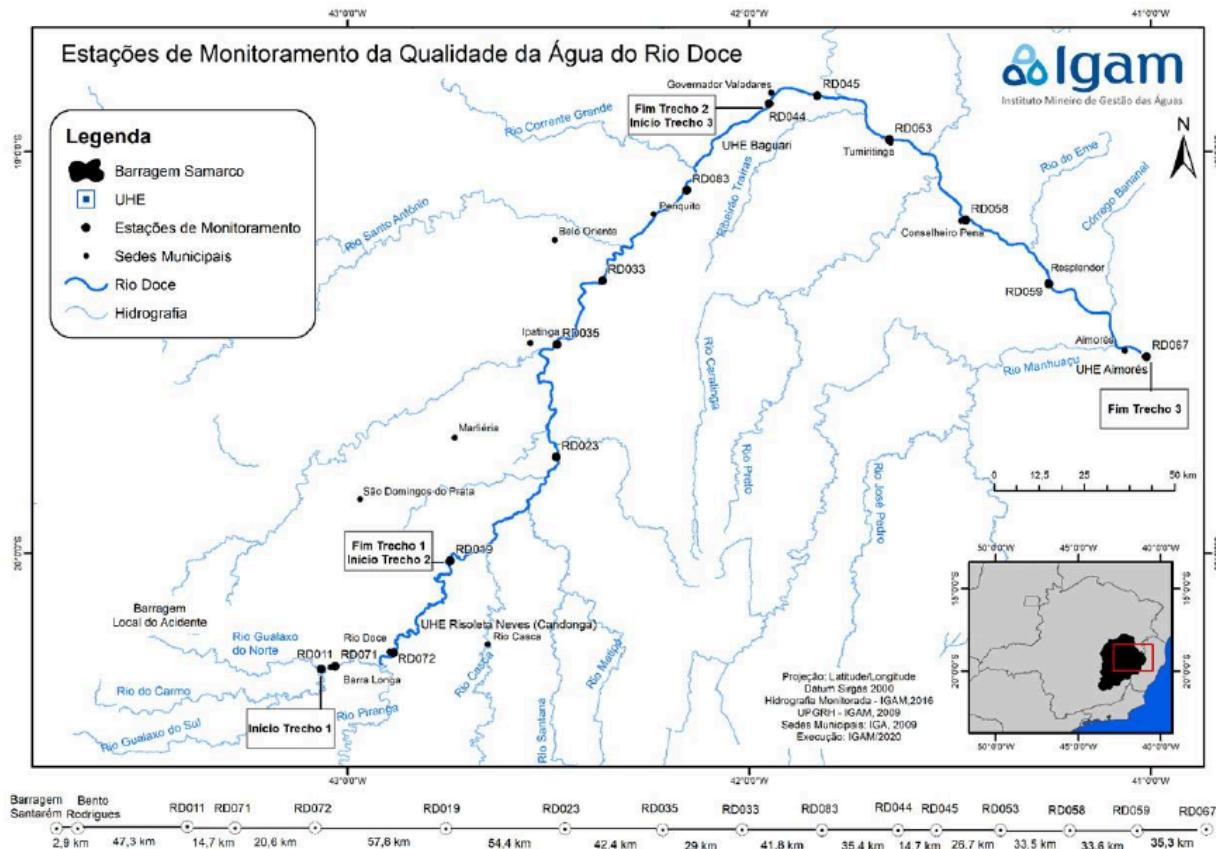
Atualmente, esse monitoramento especial é realizado em 14 estações de amostragem distribuídas ao longo dos rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce. As coletas de água superficial são feitas mensalmente, e as de sedimentos, semestralmente, contemplando cerca de 18 parâmetros, entre eles turbidez, metais pesados, oxigênio dissolvido e pH. Nos primeiros dias após o rompimento, o monitoramento das águas chegou a ocorrer de forma diária (IGAM, 2023).

Para fins de organização espacial, as estações de amostragem foram divididas em três trechos principais, com base na localização entre as Usinas Hidrelétricas de Risoleta Neves e Baguari. O Trecho 1 compreende os rios Gualaxo do Norte, do Carmo e o início do rio Doce; o Trecho 2 se estende entre os municípios de São Domingos do Prata e Periquito; e o Trecho 3 abrange o rio Doce de Governador Valadares até a divisa com o estado do Espírito Santo (IGAM, 2023).

Para essa análise, foram utilizados os dados de precipitação anual fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com base em registros de oito estações meteorológicas automáticas localizadas em pontos estratégicos da bacia. As estações selecionadas estão distribuídas nos municípios de Aimorés, Caratinga, Governador Valadares, Guanhães, Manhuaçu, Timóteo e Viçosa, cobrindo adequadamente as diversas sub-bacias e oferecendo uma série histórica consistente. A escolha dessas estações se deve tanto à sua localização representativa quanto à robustez dos dados disponíveis, o que assegura maior confiabilidade na correlação entre as variáveis hidrometeorológicas e os indicadores de qualidade da água (IGAM, 2023).

A Figura 4.1 ilustra a localização geográfica das estações de amostragem da rede de monitoramento especial na bacia do rio Doce, facilitando a visualização dos pontos acompanhados e suas respectivas distâncias ao longo do curso hídrico impactado.

Figura 4.1 - Localização das estações de amostragem do monitoramento especial, bacia do rio Doce, Minas Gerais



Fonte: IGAM (2023).

As estações de amostragem selecionadas para este estudo priorizam a proximidade com pontos de captação de água destinados ao abastecimento público. Essa abordagem visa avaliar os possíveis impactos sobre a qualidade da água ofertada às populações ribeirinhas e urbanas da bacia do rio Doce. Dentre as estações analisadas, destacam-se:

RD033 (Belo Oriente – rio Doce): Localizada nas proximidades do ponto de captação da COPASA para o abastecimento do município de Belo Oriente, sendo fundamental para verificar a segurança hídrica local.

RD045 (Governador Valadares – rio Doce): situada a montante da captação da COPASA no município de Governador Valadares, representa um dos pontos mais relevantes do monitoramento, tanto pela relevância populacional quanto pela série histórica de dados ambientais disponíveis.

RD059 (Resplendor – rio Doce): próxima à captação do sistema público local, é importante para avaliar a recuperação da qualidade da água nas regiões mais distantes da área de impacto direto.

RD067 (Aimorés – rio Doce): também associada a captação para abastecimento, essa estação permite acompanhar a qualidade da água na transição para a região de divisa com o Espírito Santo.

As coletas nessas estações são realizadas mensalmente para água superficial e semestralmente para sedimentos, incluindo a análise de parâmetros como turbidez, metais pesados, oxigênio dissolvido, coliformes termotolerantes, entre outros. A seleção desses pontos reflete a preocupação com o uso prioritário da água para o consumo humano, conforme previsto nas legislações ambientais vigentes, como a Resolução CONAMA nº 357/2005 e a Deliberação Normativa COPAM nº 08/2022.

4.2 Procedimentos metodológicos

4.2.1 Coleta de Dados

A metodologia adotada consistiu na utilização de séries históricas de monitoramento da qualidade da água superficial no estado de Minas Gerais, com o objetivo de identificar, comparar e interpretar os dados referentes à calha do rio Doce no intervalo de 2020 a 2024. A abordagem é longitudinal, permitindo observar tendências, padrões de variação e possíveis recuperações dos indicadores ao longo do tempo. O foco principal está na análise de pontos de monitoramento situados nas proximidades de captações para abastecimento público, avaliando-se a conformidade dos resultados com os padrões de enquadramento da classe 2, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 357/2005 e na Deliberação Normativa COPAM nº 08/2022.

Os dados analisados nesta pesquisa foram obtidos por meio da Gerência de Monitoramento de Qualidade das Águas (GEMOQ) do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM-MG), priorizando pontos de monitoramento estrategicamente distribuídos na bacia hidrográfica do rio Doce, em trechos anteriores à barragem de Fundão, com o objetivo de estabelecer uma referência comparativa menos impactada pelos rejeitos e pontos de coleta próximos às Estações de Tratamento de Água (ETAs), que realizam captação diretamente no rio para fins de abastecimento público.

O acesso às informações será viabilizado mediante solicitação formal à instituição, permitindo assim a obtenção de séries temporais completas e organizadas, referentes aos principais

parâmetros de qualidade da água do Rio Doce no período de janeiro de 2020 a dezembro de 2024.

Esses parâmetros são relevantes na caracterização da qualidade da água e por estarem entre os exigidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 8 /2022, aplicando-se às águas doces de classe 2, que estabelecem os padrões de enquadramento dos corpos d'água e define diretrizes ambientais para o controle e o monitoramento da qualidade hídrica no território nacional e estadual, respectivamente. De acordo com tais normas, os corpos d'água de Classe 2 são destinados ao abastecimento público após tratamento convencional.

4.3 Parâmetros de análise de qualidade da água

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de fontes oficiais do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), incluindo o *Caderno Especial de Avaliação da Qualidade das Águas do Rio Doce* e uma planilha complementar com resultados atualizados de monitoramento fornecida diretamente pela equipe da Gerência de Monitoramento da Qualidade (GEMOQ). O conjunto de dados abrange o período de 2020 a 2024 e contempla diversos pontos de amostragem ao longo do rio Doce, com ênfase em trechos destinados à captação de água para abastecimento público. Os parâmetros analisados foram selecionados com base nas substâncias avaliadas mensalmente pelo IGAM e nos componentes utilizados no Índice de Qualidade da Água (IQA) aplicado a mananciais de abastecimento, complementados por elementos traço relevantes para caracterização da qualidade da água. Dessa forma, foram considerados pH in loco, oxigênio dissolvido, nitrogênio total, fósforo total, sólidos totais, turbidez, além dos metais manganês total, alumínio dissolvido e ferro dissolvido, permitindo uma avaliação abrangente das condições físico-químicas e químicas do corpo hídrico. função da frequência de coleta adotada pelo IGAM e da disponibilidade de dados consolidados para o período de 2020 a 2024.

Além da seleção dos parâmetros, as análises estatísticas e gráficas foram conduzidas utilizando diferentes abordagens metodológicas, de modo a proporcionar uma avaliação abrangente da qualidade da água no período de 2020 a 2024. Inicialmente, realizou-se a construção de séries temporais no software R Studio, contemplando todos os parâmetros e todas as estações monitoradas. Essa técnica permitiu observar a evolução dos indicadores ao longo do tempo,

identificar tendências, padrões sazonais e episódios pontuais de elevação associados, sobretudo, às variações hidrológicas e aos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos d'água de Classe 2. A análise temporal é fundamental para mananciais de abastecimento, pois possibilita detectar a persistência de contaminação, episódios críticos e eventuais recuperações da qualidade da água após eventos de impacto.

Complementarmente, foram elaborados boxplots anuais, no software Microsoft Excel, separados entre os períodos chuvoso e seco para cada estação. Essa abordagem possibilitou a comparação direta da distribuição dos valores, amplitude, mediana e presença de outliers entre as estações e entre as sazonalidades. Os boxplots são essenciais para destacar diferenças significativas entre períodos hidrológicos, especialmente em mananciais sujeitos a aporte de sedimentos, introdução de metais e variações físico-químicas decorrentes das chuvas, o que impacta diretamente o tratamento da água destinada ao abastecimento público.

Adicionalmente, empregou-se a análise de agrupamento hierárquico por meio de dendrogramas elaborados no R Studio, permitindo avaliar a semelhança entre as estações de monitoramento com base nos valores observados para cada parâmetro. O dendrograma é uma ferramenta importante para identificar estações com comportamentos semelhantes ou discrepantes, distinguindo áreas mais vulneráveis, trechos críticos ou padrões de contaminação que tendem a se repetir. No contexto do Rio Doce, essa interpretação auxilia na compreensão espacial do impacto das chuvas, da dinâmica de sedimentos e do transporte de contaminantes ao longo do curso d'água.

O presente estudo adotou a divisão sazonal do regime pluviométrico do Rio Doce com base nas informações climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), considerando como período chuvoso os meses de outubro a março e como período seco os meses de abril a setembro. Segundo o INMET, a Região Sudeste, incluindo Minas Gerais, apresenta início das chuvas na segunda quinzena de setembro, com estabelecimento efetivo do período úmido ao longo de outubro, enquanto a estação seca predomina nos meses anteriores (INMET, 2017). Essa classificação foi utilizada para organizar e interpretar as séries temporais e os boxplots gerados,

permitindo compreender as variações sazonais dos parâmetros de qualidade da água monitorados no Rio Doce.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resultados e discussões dos Parâmetros de qualidade da água

A análise dos resultados do presente estudo, conduzido no rio Doce em Minas Gerais, foi realizada a partir da avaliação contínua dos parâmetros de qualidade da água ao longo do período de 2020 a 2024, utilizando diferentes ferramentas estatísticas e gráficos que permitem interpretar a dinâmica temporal e espacial do sistema.

Os valores para Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) disponibilizados pelo IGAM para todo o período analisado (2020–2024) permaneceram consistentemente inferiores a 2 mg/L, indicando boa condição orgânica do corpo hídrico segundo os critérios estabelecidos para águas de Classe 2. Dessa forma, a DBO não foi incluída entre os parâmetros discutidos em maior profundidade, uma vez que não apresentou variações significativas capazes de influenciar a interpretação da qualidade da água no intervalo estudado.

Ressalta-se também que não houve disponibilidade de dados referentes a coliformes termotolerantes nas séries históricas fornecidas pela GEMOQ/IGAM para o período de 2020 a 2024. Por se tratar de um parâmetro microbiológico essencial para fins de enquadramento e potabilidade, sua ausência impede análises comparativas ou conclusão sobre riscos sanitários associados a esse indicador, motivo pelo qual o mesmo não foi abordado nos resultados.

A variável temperatura não foi apresentada graficamente neste estudo porque apresentou baixa variação ao longo do período analisado e não influenciou de maneira significativa a interpretação dos demais parâmetros de qualidade da água. Além disso, esse parâmetro não constitui foco central dos objetivos propostos, de modo que sua representação gráfica não acrescentaria informações relevantes para a avaliação da qualidade da água no contexto das captações do rio Doce.

Com relação aos metais, os dados fornecidos apresentaram concentrações muito baixas, típicas de níveis próximos ao limite de quantificação analítica. Os valores médios observados foram de aproximadamente 0,005 mg/L para chumbo total, 0,004 mg/L para níquel total e 0,001 mg/L para arsênio total, permanecendo inferiores aos limites estabelecidos para Classe 2 ao longo de todo o

período monitorado. Em razão dessa baixa variabilidade e da ausência de excedências, esses parâmetros não foram discutidos como contaminantes críticos, embora tenham sido considerados na avaliação global da qualidade da água.

Para todos os parâmetros analisados foram feitos gráficos de análise temporal do período de 2020 a 2024, boxplots e dendrogramas considerando os períodos seco e chuvoso. Para variáveis com maior dispersão, presença de valores abaixo do limite de detecção ou registros irregulares, foram aplicados gráficos do tipo Box-Whisker, contemplando a distribuição dos dados por meio dos percentis de 10%, 25%, 50%, 75% e 90%, além dos valores mínimos e máximos observados. Complementarmente, a estrutura de similaridade entre as estações monitoradas foi investigada por meio de análises de agrupamento hierárquico (dendrogramas), utilizando o método *hclust* com critério *complete linkage*, permitindo identificar padrões comuns e diferenças associadas às condições hidrológicas.

Os parâmetros avaliados, especialmente os metais como ferro dissolvido, foram discutidos em relação às concentrações identificadas ao longo do rio Doce e às variações decorrentes de processos naturais e possíveis influências antrópicas. Assim, a abordagem adotada permite uma interpretação abrangente e integrada do comportamento dos parâmetros de qualidade da água no rio Doce, considerando suas flutuações sazonais e tendências ao longo da série histórica monitorada.

5.2 pH

O pH corresponde a um indicador essencial para avaliar a acidez ou alcalinidade de soluções aquosas, determinado pela concentração relativa de íons hidrogênio e hidroxila presentes, e expresso em escala logarítmica que varia de 0 a 14, na qual cada unidade representa uma mudança de dez vezes na intensidade da acidez ou basicidade (USGS, 2024). Assim, valores inferiores a 7 caracterizam meios ácidos e superiores a 7 indicam condições alcalinas, sendo um parâmetro sensível às substâncias dissolvidas e amplamente utilizado para detectar alterações químicas na água. No contexto do tratamento e abastecimento, o pH afeta diretamente a solubilidade de compostos, a eficiência de etapas como coagulação, filtração e desinfecção, e o comportamento corrosivo ou incrustante da água nas redes de distribuição, podendo causar danos

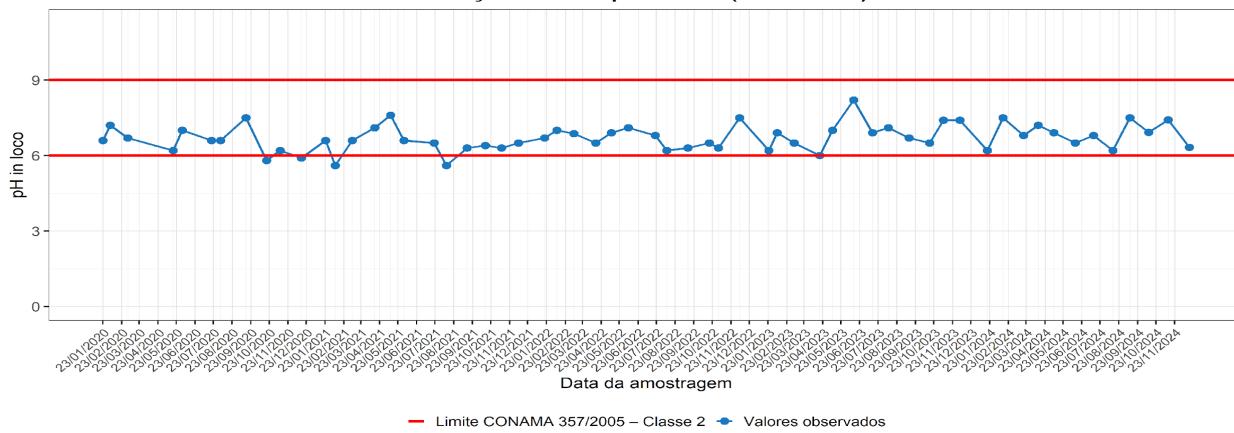
em materiais quando muito baixo ou favorecer depósitos quando elevado (ADAMS, 1990; DI BERNARDO, 2017).

Os gráficos a seguir ilustram a variação do pH em águas superficiais nas estações monitoradas, contemplando integralmente o intervalo temporal definido para este estudo (Figura 5.1 e Figura 5.2).

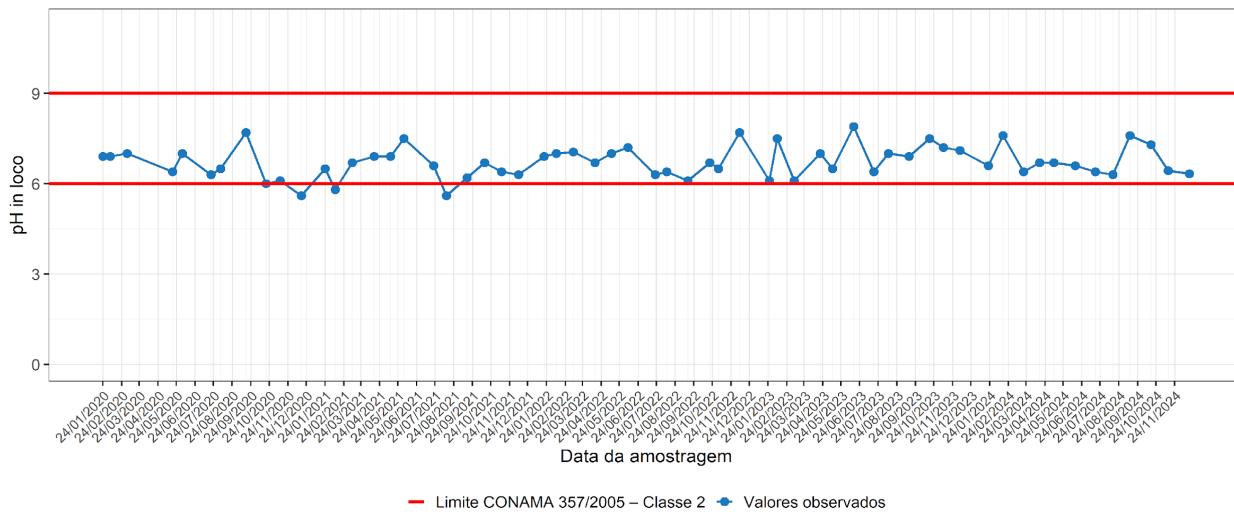
Figura 5.1 - Resultados do Parâmetro pH em Água Superficial da Estação RD033 e RD045

(2020 – 2024).

Estação RD033 - pH in loco (2020 - 2024)

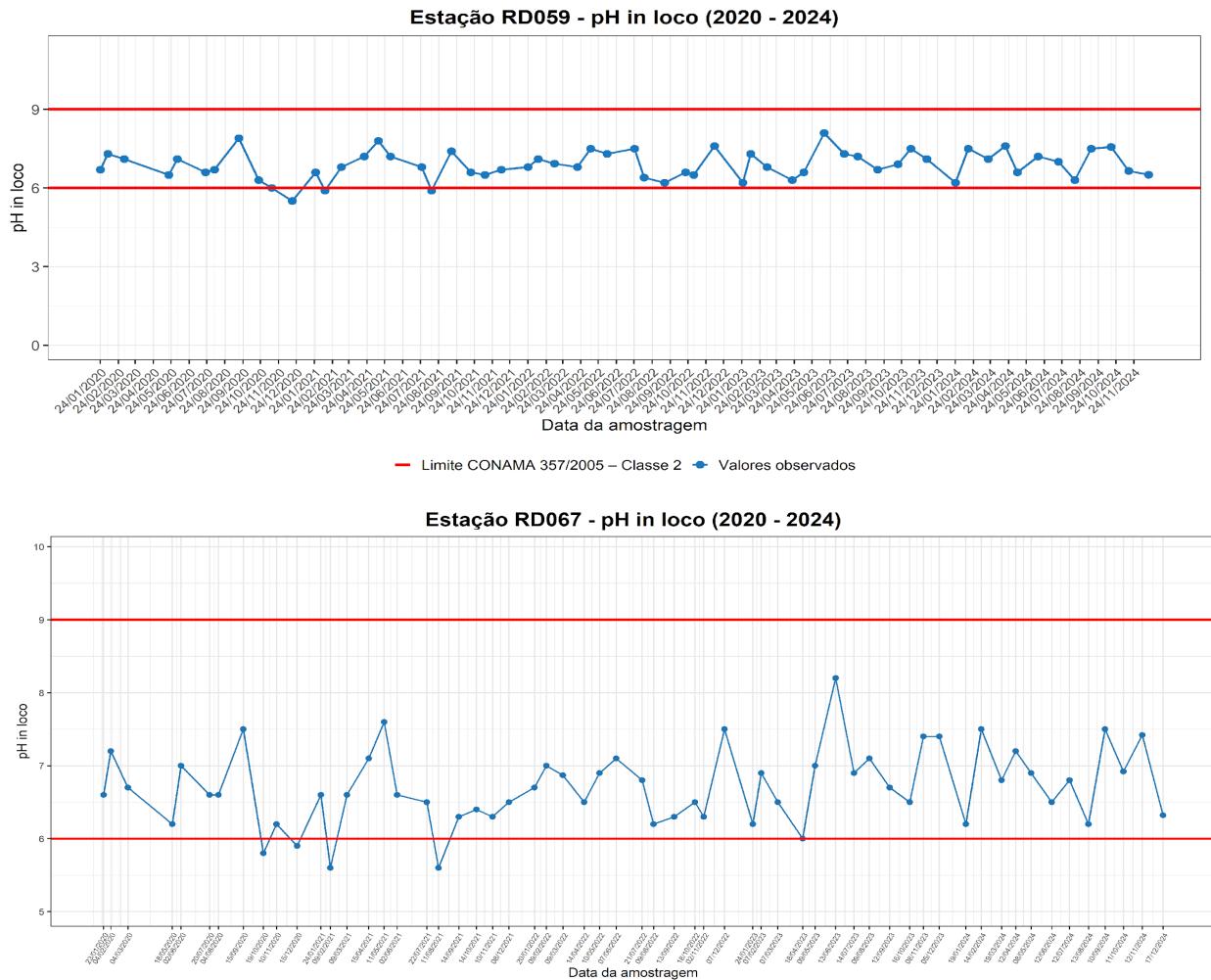


Estação RD045 - pH in loco (2020 - 2024)



Fonte: Autora (2025).

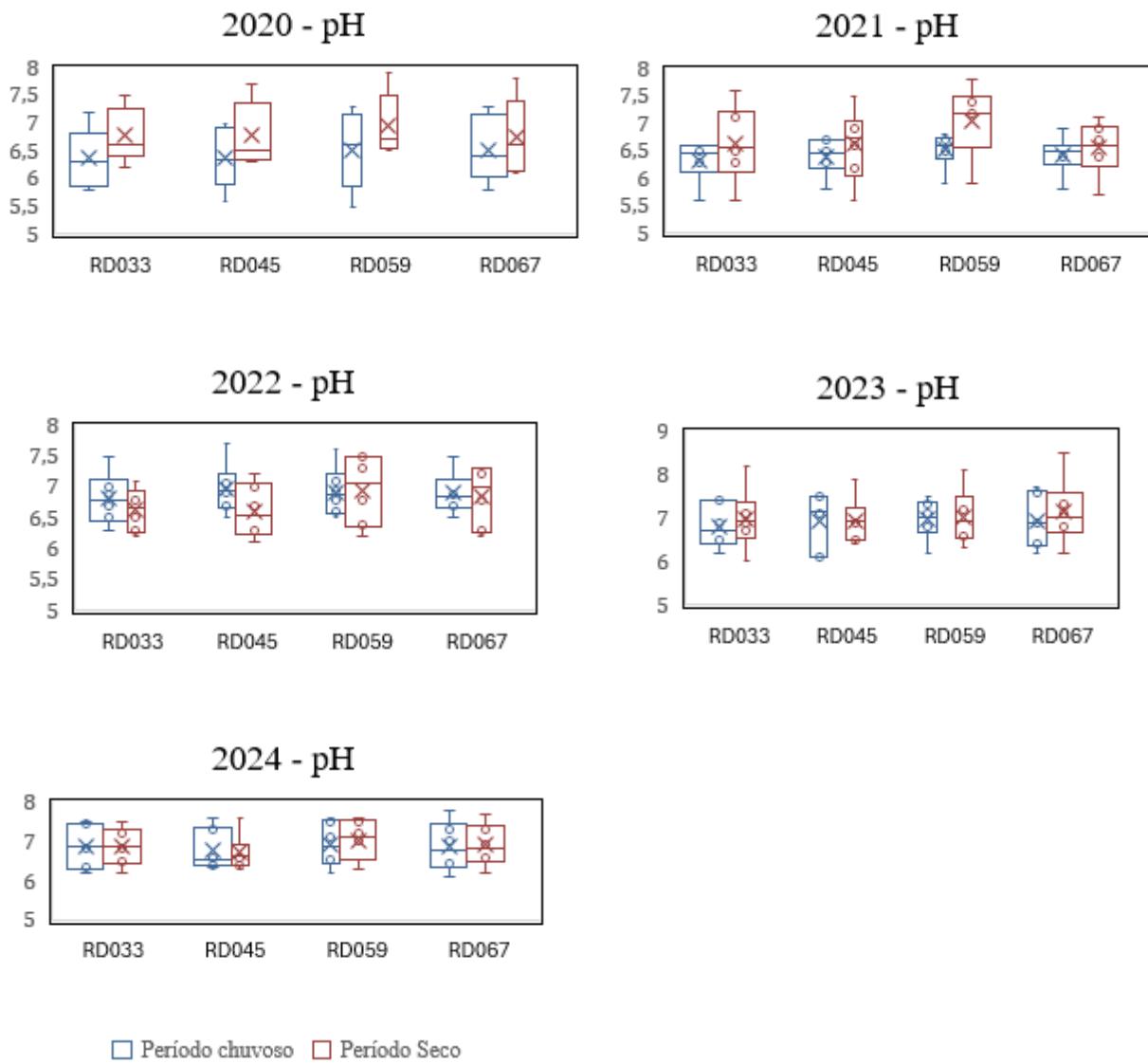
Figura 5.2- Resultados do Parâmetro pH em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

Os boxplots a seguir representam a distribuição e a variabilidade dos valores de pH em águas superficiais nas estações monitoradas, abrangendo integralmente o período de análise estabelecido neste estudo (Figura 5.3).

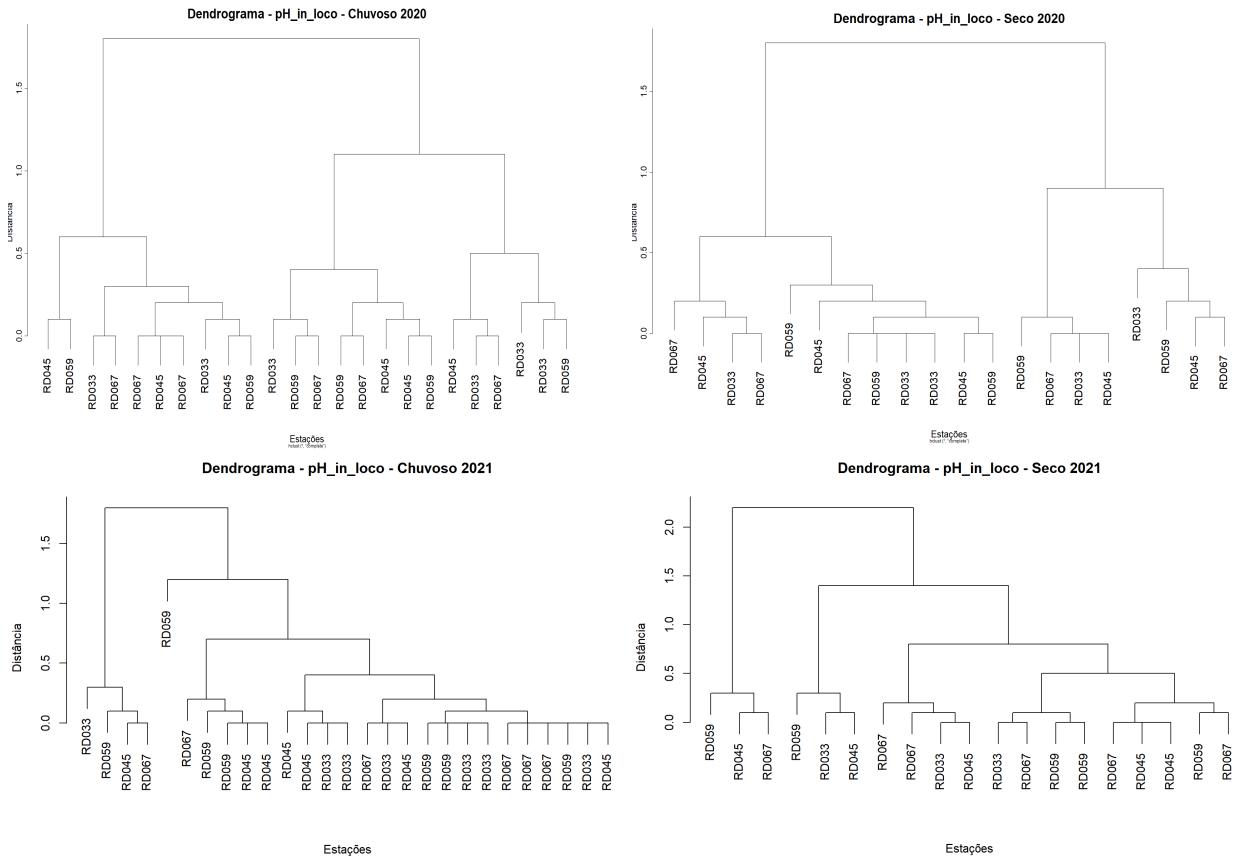
Figura 5.3 – Boxplots dos valores de pH em água superficial para as quatro estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2020 a 2024



Fonte: Autora (2025).

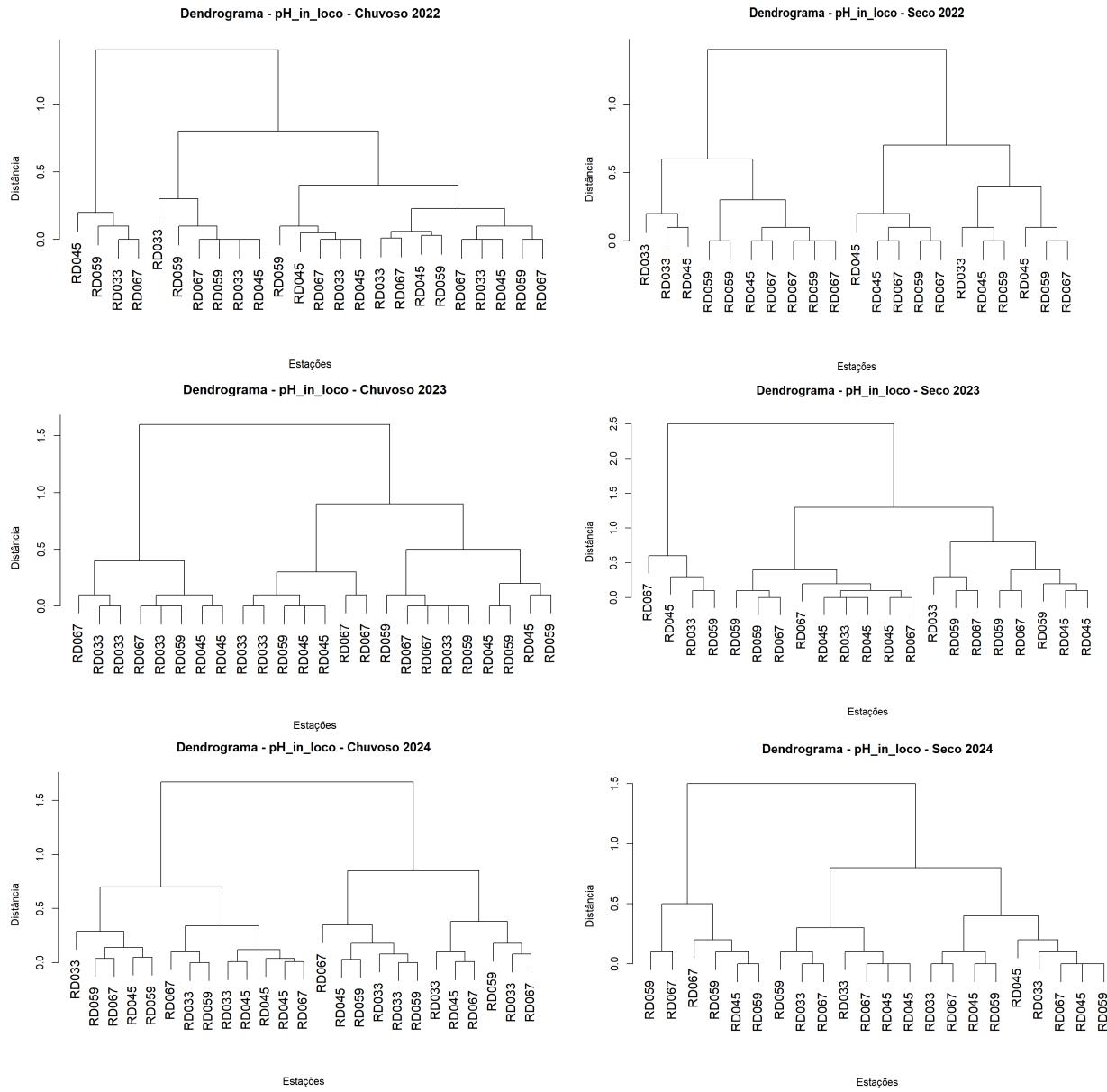
Os dendrogramas a seguir ilustram os padrões de similaridade entre as estações monitoradas a partir dos valores de pH, considerando separadamente os períodos chuvoso e seco e englobando todo o intervalo temporal analisado neste estudo (Figura 5.4 e Figura 5.5).

Figura 5.4 – Dendrogramas dos valores de pH em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2020 e 2021, considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.5 – Dendrogramas dos valores de pH em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no período de 2022, 2023 e 2024, considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

A avaliação conjunta das séries temporais de pH entre 2020 e 2024 evidencia um comportamento predominantemente estável nas quatro estações monitoradas ao longo do rio Doce, sem indícios de alterações estruturais após o rompimento da barragem de Fundão. As variações observadas são compatíveis com a dinâmica hidrológica natural, com pequenas oscilações influenciadas principalmente pela sazonalidade. Em RD033 (Belo Oriente), o pH variou entre 6,0 e 7,2,

enquanto em RD045 (Governador Valadares), considerada uma estação crítica pela relevância populacional, os valores permaneceram entre 6,1 e 7,0. A estação RD059 (Resplendor) apresentou o comportamento mais estável, com oscilações entre 6,2 e 7,3. Já RD067 (Aimorés) exibiu a maior amplitude de variação, entre aproximadamente 5,8 e 7,6, ainda dentro da normalidade hidrológica.

Os boxplots reforçam essa estabilidade, demonstrando que, ao longo de todo o período analisado, os valores de pH permaneceram majoritariamente no intervalo de 6,0 a 7,5. A presença de valores pontuais entre 5,5 e 8,0 ou 8,5 indica episódios isolados de maior amplitude, mas não sugere tendências persistentes de acidificação ou alcalinização. De modo geral, os resultados indicam águas com pH entre levemente ácido e neutro, com eventuais ocorrências de leve alcalinidade, refletindo condições naturais e heterogeneidade espacial típica de sistemas fluviais extensos.

A análise dos dendrogramas complementa essas interpretações ao revelar padrões consistentes de similaridade entre as estações ao longo dos anos. Observa-se a formação recorrente de dois agrupamentos principais: RD033 e RD045, associados a trechos influenciados por maior atividade urbana e industrial, e RD059 e RD067, localizados em trechos médio e inferior do rio, com características físico-químicas mais homogêneas. A repetição desses agrupamentos ao longo dos anos e das estações hidrológicas reforça a estabilidade espacial do pH e indica a ausência de alterações significativas no padrão de similaridade entre os pontos monitorados. Em conjunto, esses resultados confirmam que o pH permaneceu adequado aos usos previstos para a água, sem evidências de anormalidades relacionadas a impactos residuais do desastre de Fundão.

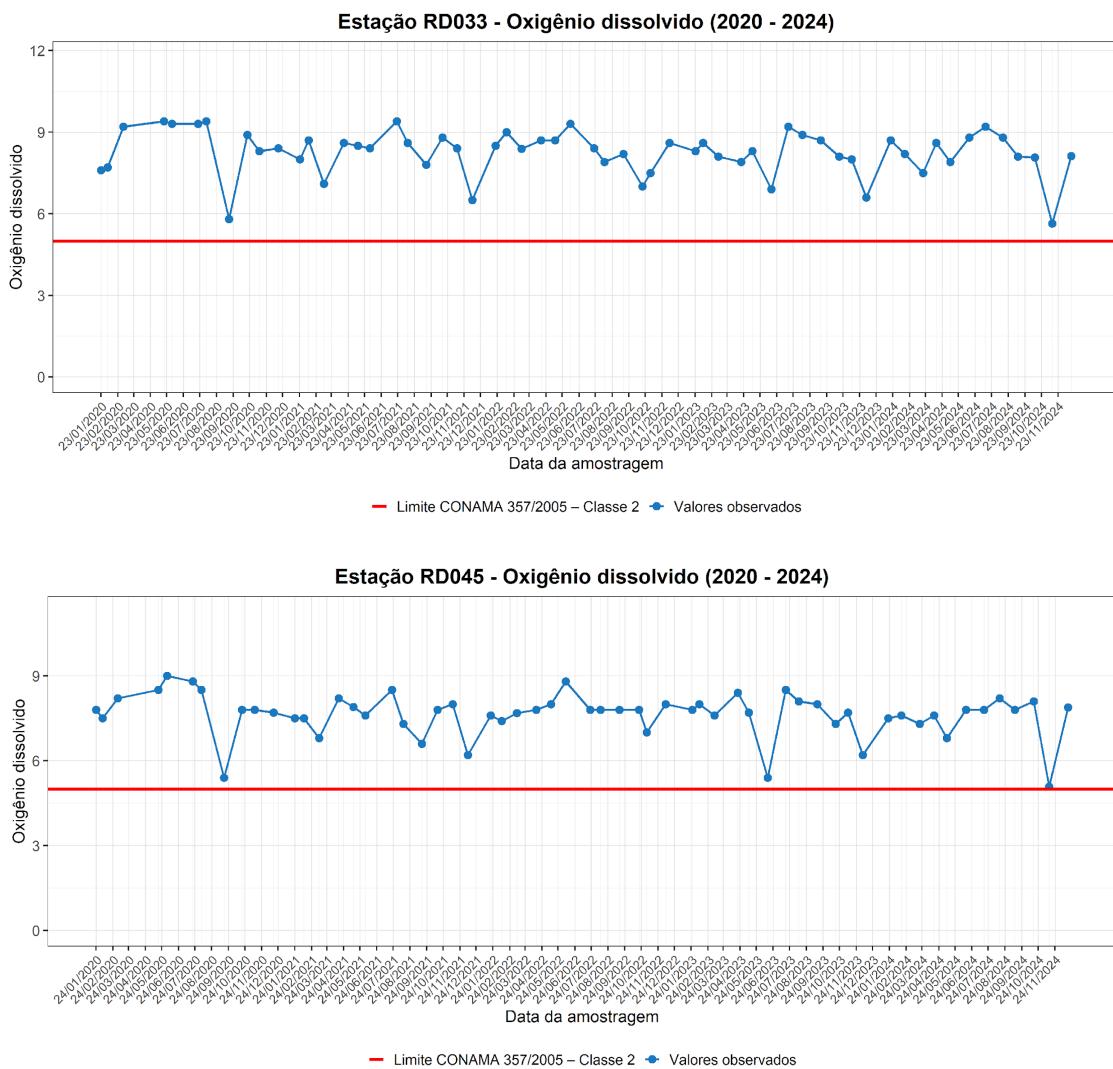
5.3 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é um parâmetro fundamental da qualidade da água, pois sua concentração resulta do equilíbrio entre difusão atmosférica, turbulência e atividade biológica. Valores reduzidos de OD geralmente indicam excesso de matéria orgânica em decomposição ou presença de poluentes, enquanto níveis mais altos podem ocorrer em ambientes com intensa fotossíntese, podendo até gerar supersaturação (CETESB, 2018). Assim, o monitoramento do OD é essencial para avaliar o grau de poluição e orientar ajustes nos processos de tratamento de água

destinados ao abastecimento público. A seguir, são apresentados os resultados de OD nas estações avaliadas neste estudo.

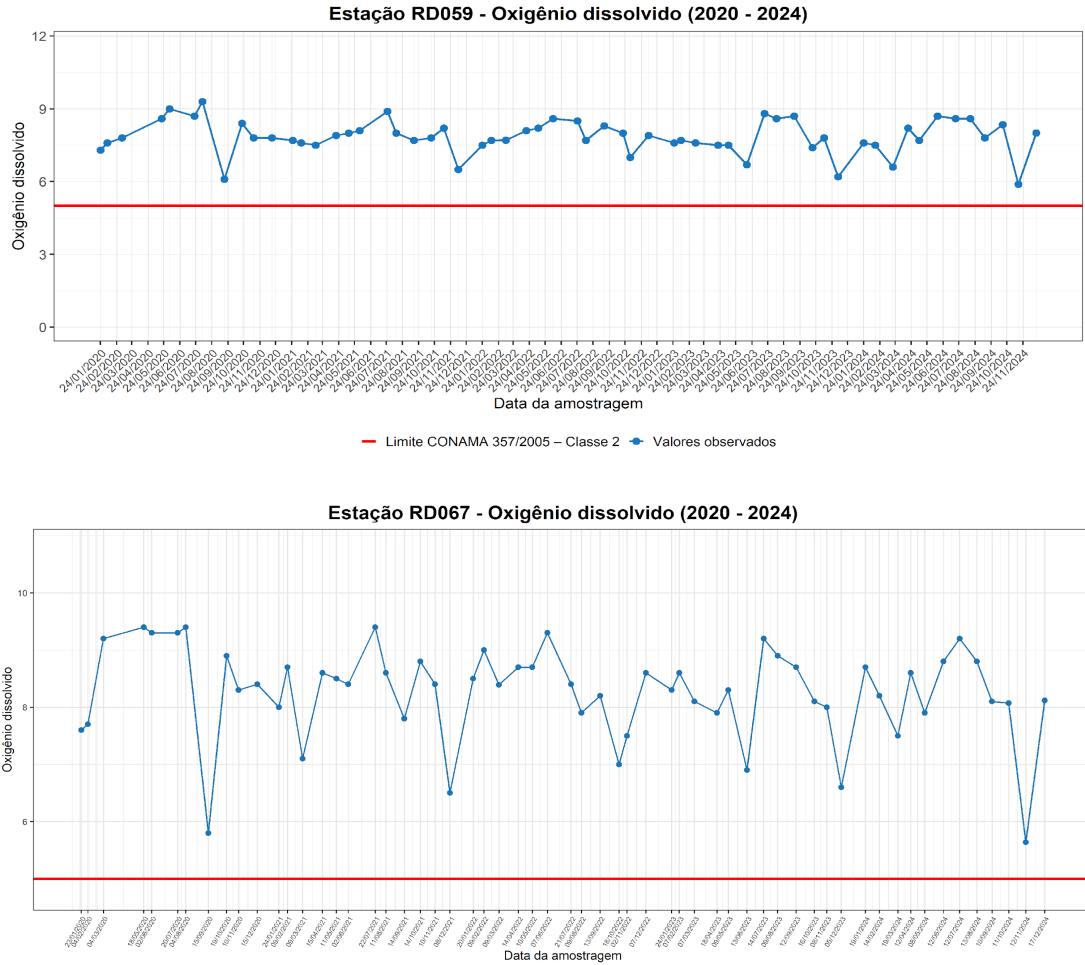
A seguir, são apresentadas as séries temporais do parâmetro oxigênio dissolvido nas águas superficiais das estações avaliadas, abrangendo todo o período considerado neste estudo (Figura 5.6 e Figura 5.7).

Figura 5.6 - Resultados do Parâmetro Oxigênio dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

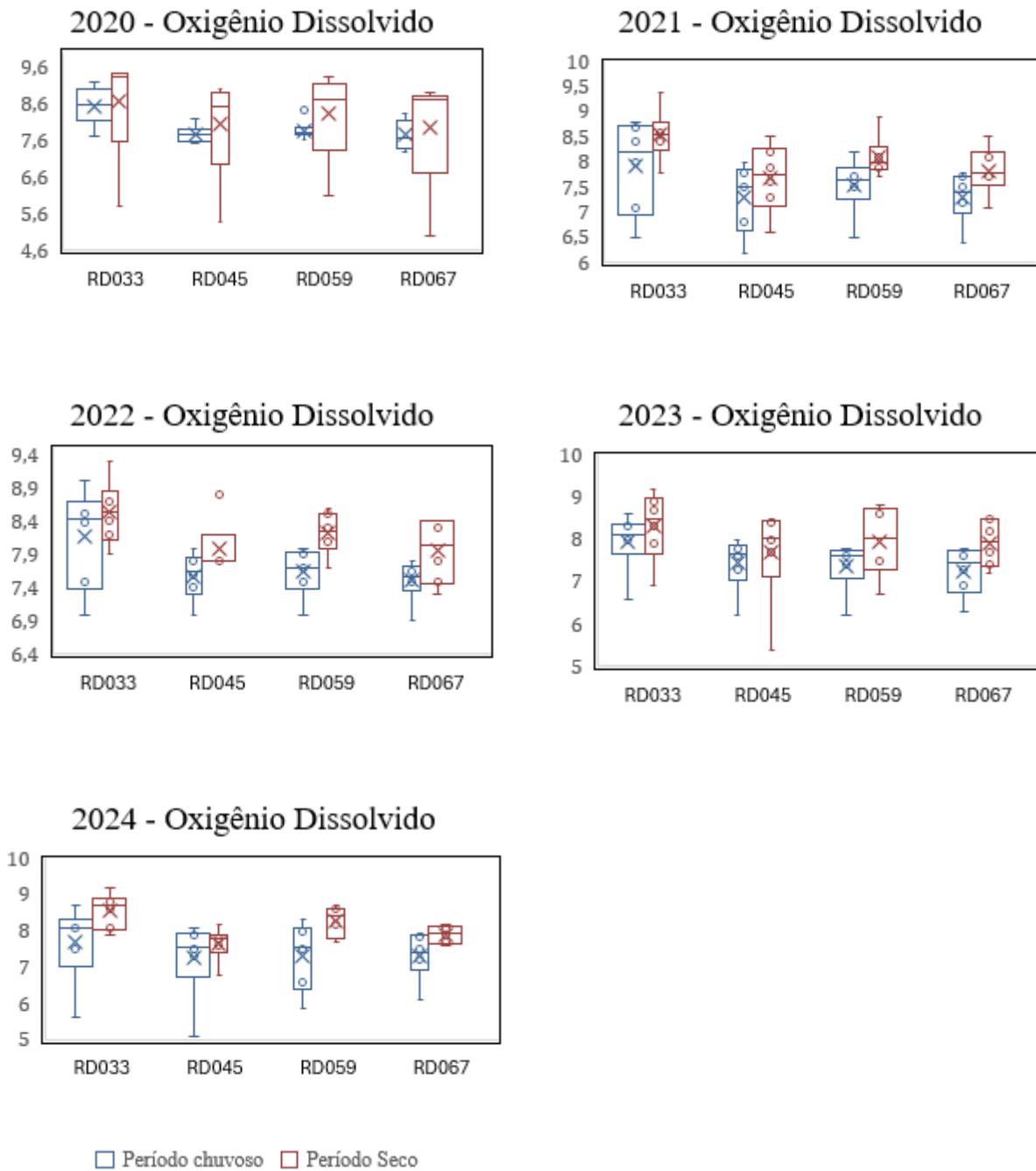
Figura 5.7 - Resultados do Parâmetro Oxigênio dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

Os boxplots apresentados a seguir ilustram a variação e a amplitude dos valores de oxigênio dissolvido nas águas superficiais das estações analisadas, contemplando integralmente o intervalo temporal adotado neste estudo (Figura 5.8).

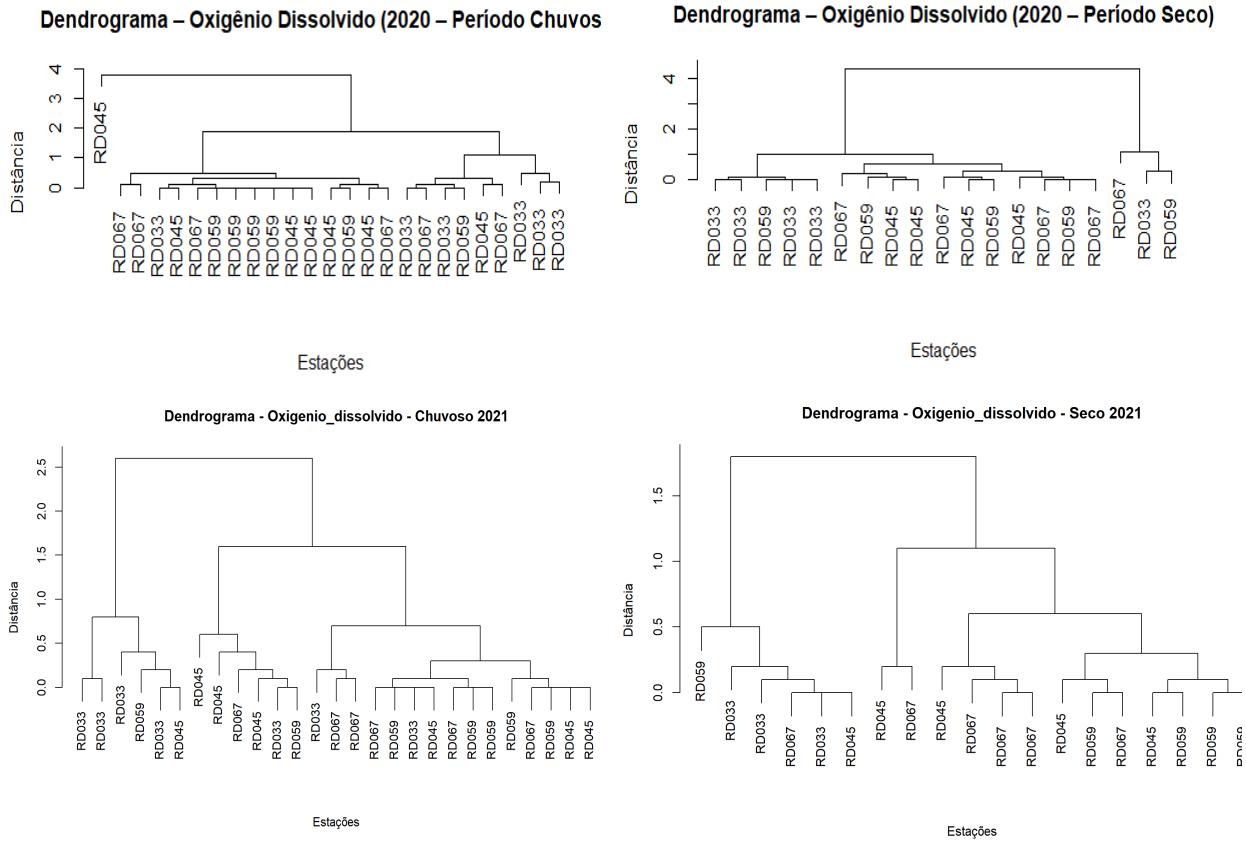
Figura 5.8 - Boxplots dos valores de oxigênio dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024.



Fonte: Autora (2025).

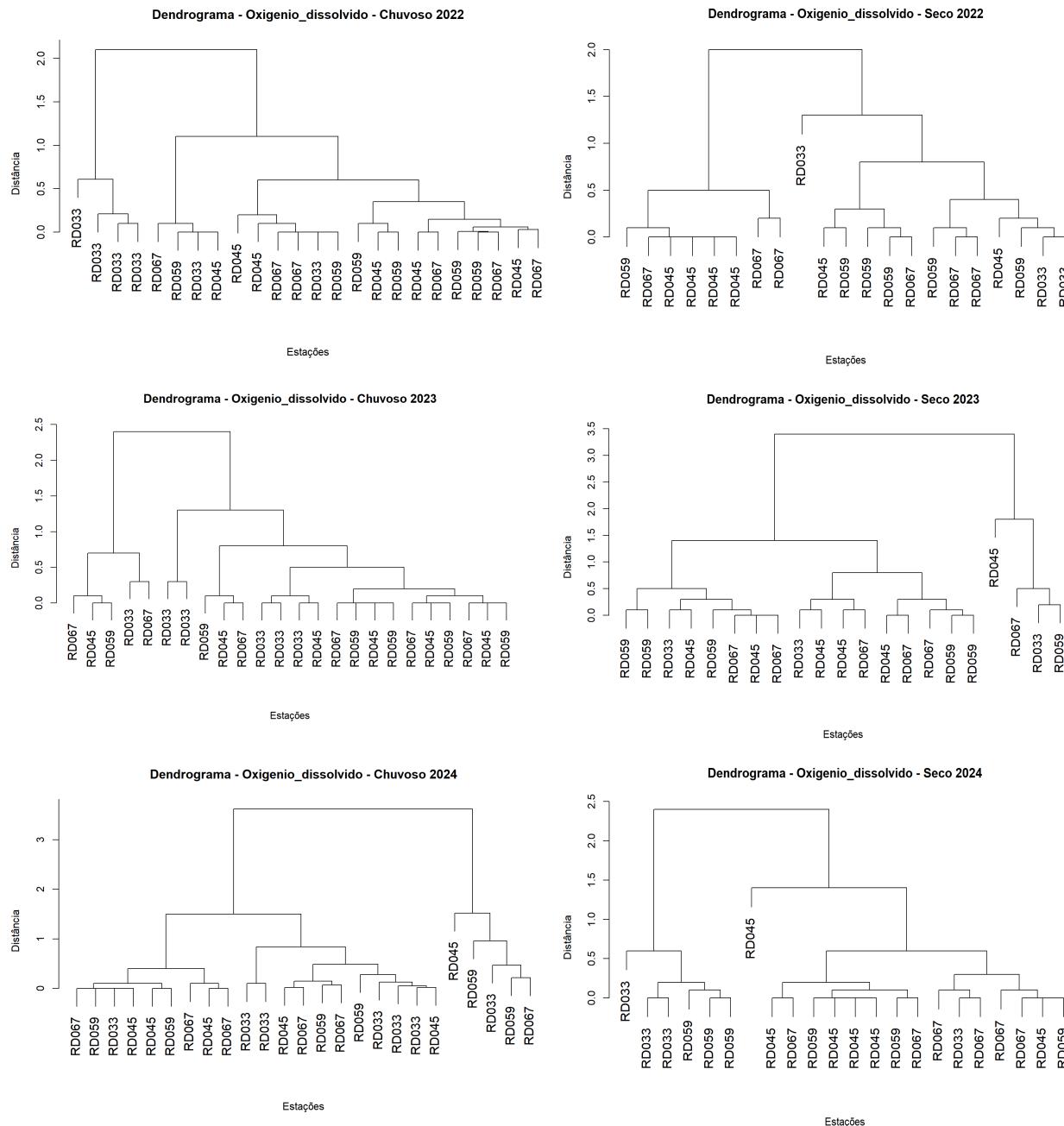
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.9 e Figura 5.10) representam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de oxigênio dissolvido (OD), analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.9 - Dendrogramas dos valores de Oxigênio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021, considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.10 - Dendrogramas dos valores de Oxigênio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025)

As séries temporais de oxigênio dissolvido (OD) entre 2020 e 2024 indicam que todas as estações do rio Doce mantiveram concentrações majoritariamente acima de 5 mg/L, atendendo ao limite

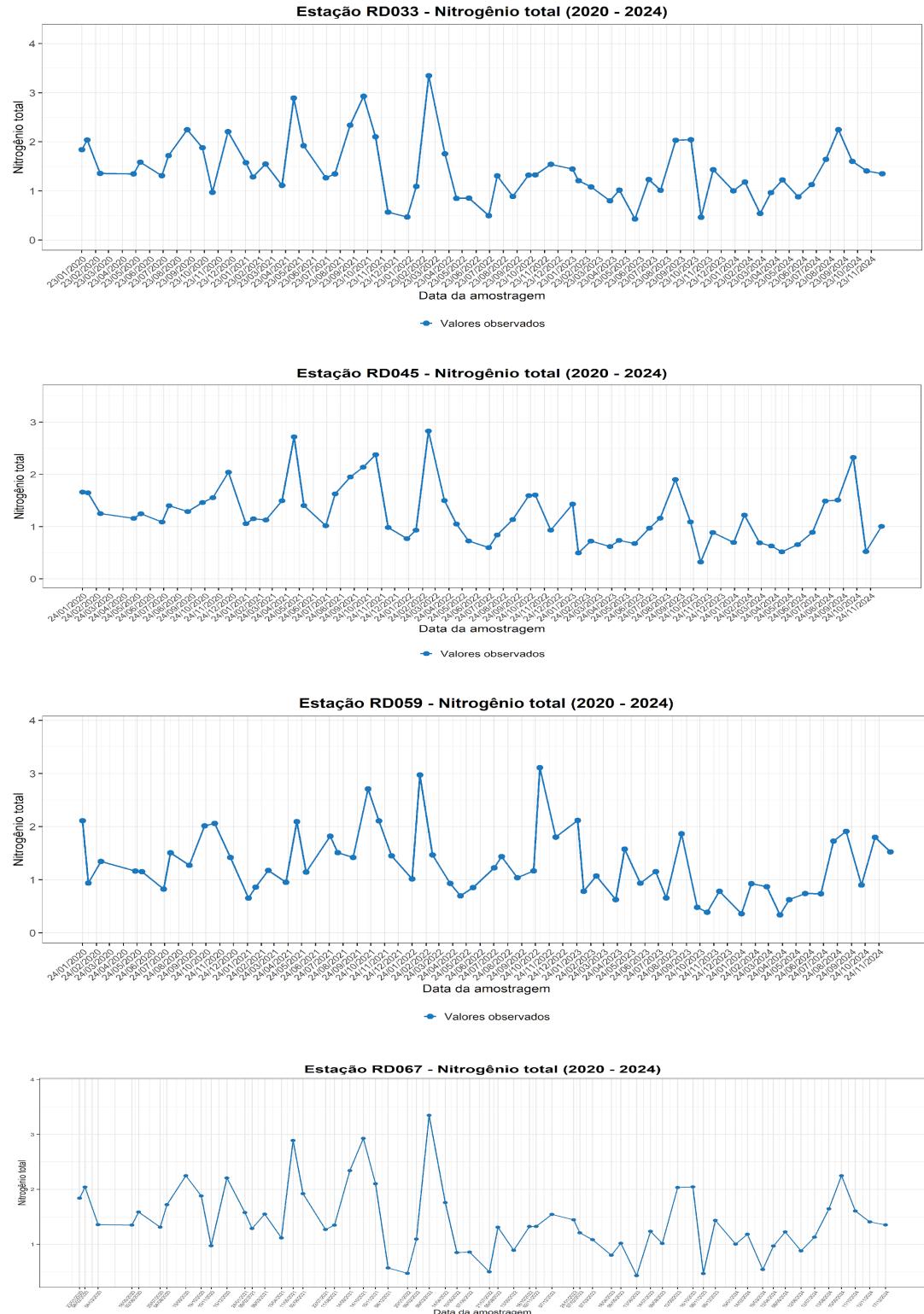
estabelecido para rios de Classe 2 pela Resolução CONAMA nº 357/2005. RD033 (Belo Oriente) e RD059 (Resplendor) apresentaram comportamento estável, com valores predominantemente entre 7 e 9 mg/L, enquanto RD045 (Governador Valadares) registrou quedas pontuais próximas ao limite legal e RD067 (Aimorés) exibiu maior amplitude, incluindo episódios de supersaturação acima de 10 mg/L. Os boxplots reforçam esse padrão, mostrando distribuições concentradas entre 7 e 9 mg/L, com medianas ligeiramente maiores no período seco e maior variabilidade em RD033 e RD045. Já os dendrogramas revelam maior similaridade entre as estações no período chuvoso, especialmente entre RD033, RD059 e RD067, devido ao aumento da vazão e à maior reaeração natural, enquanto no período seco RD045 se destaca como a estação mais dissimilar, refletindo maior influência antrópica. Em conjunto, os resultados confirmam boas condições de oxigenação ao longo do rio Doce e estabilidade do parâmetro durante o período analisado.

5.4 Nitrogênio total

O nitrogênio total é um indicador importante para a água destinada ao abastecimento, pois concentrações elevadas podem sinalizar contaminação por esgotos, efluentes industriais ou escoamento agrícola. A presença excessiva de compostos nitrogenados interfere no tratamento, favorece processos de eutrofização e pode levar à formação de substâncias como amônia, nitrito e nitrato, que representam riscos operacionais e, em alguns casos, à saúde humana. Por isso, o monitoramento do nitrogênio total é essencial para garantir a qualidade da água bruta utilizada nos sistemas de potabilização (CETESB, 2018).

A seguir, são apresentadas as séries temporais do nitrogênio total nas águas superficiais das estações avaliadas, abrangendo todo o período considerado neste estudo (Figura 5.11).

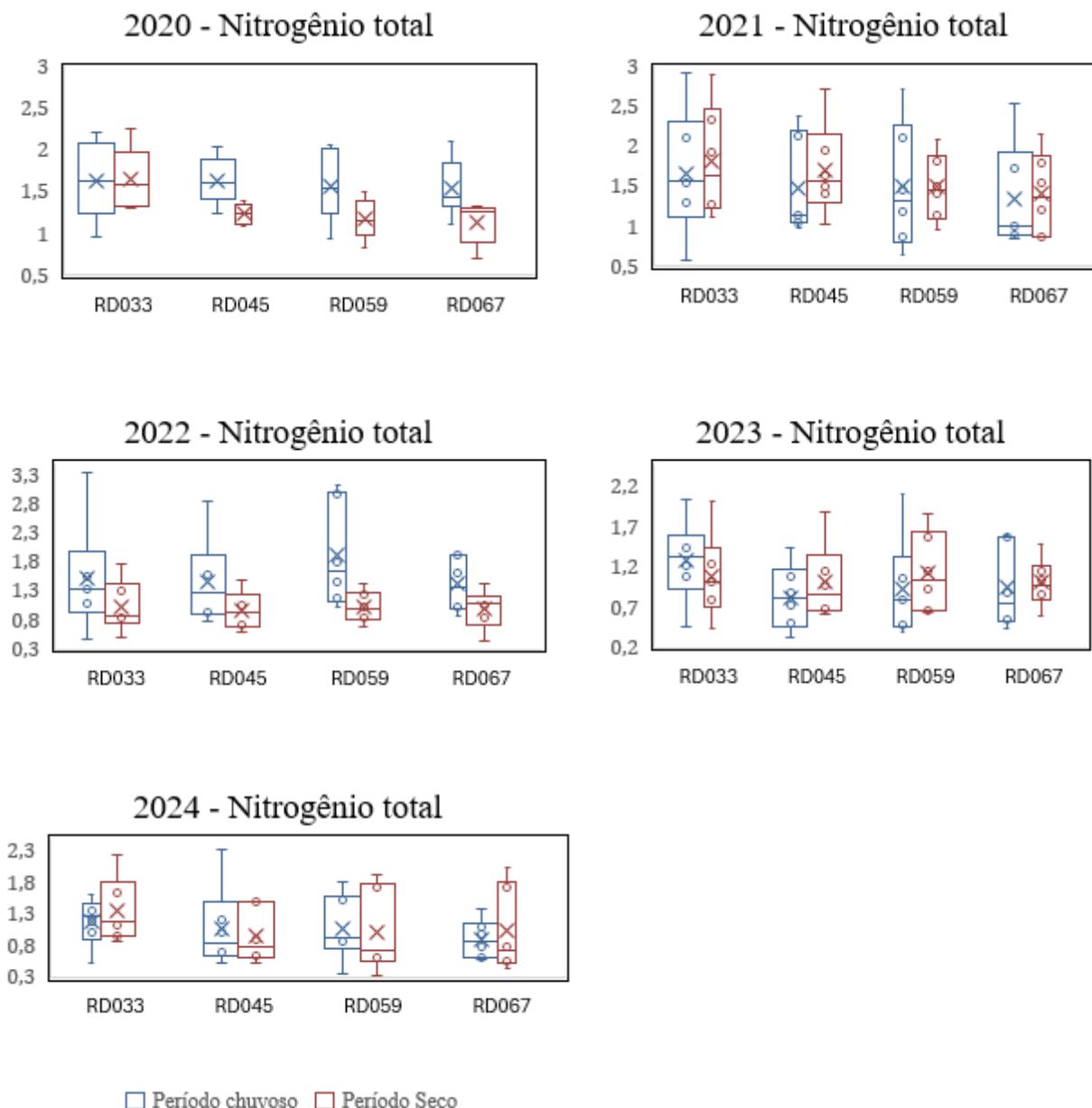
Figura 5.11 - Resultados do Parâmetro nitrogênio total em Água Superficial da Estação RD033 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

Os boxplots apresentados a seguir ilustram a distribuição e a variabilidade dos valores de nitrogênio total nas águas superficiais das estações monitoradas nos períodos chuvoso e seco, representando de forma sintética as diferenças sazonais e a amplitude dos dados ao longo de todo o período analisado neste estudo (Figura 5.12).

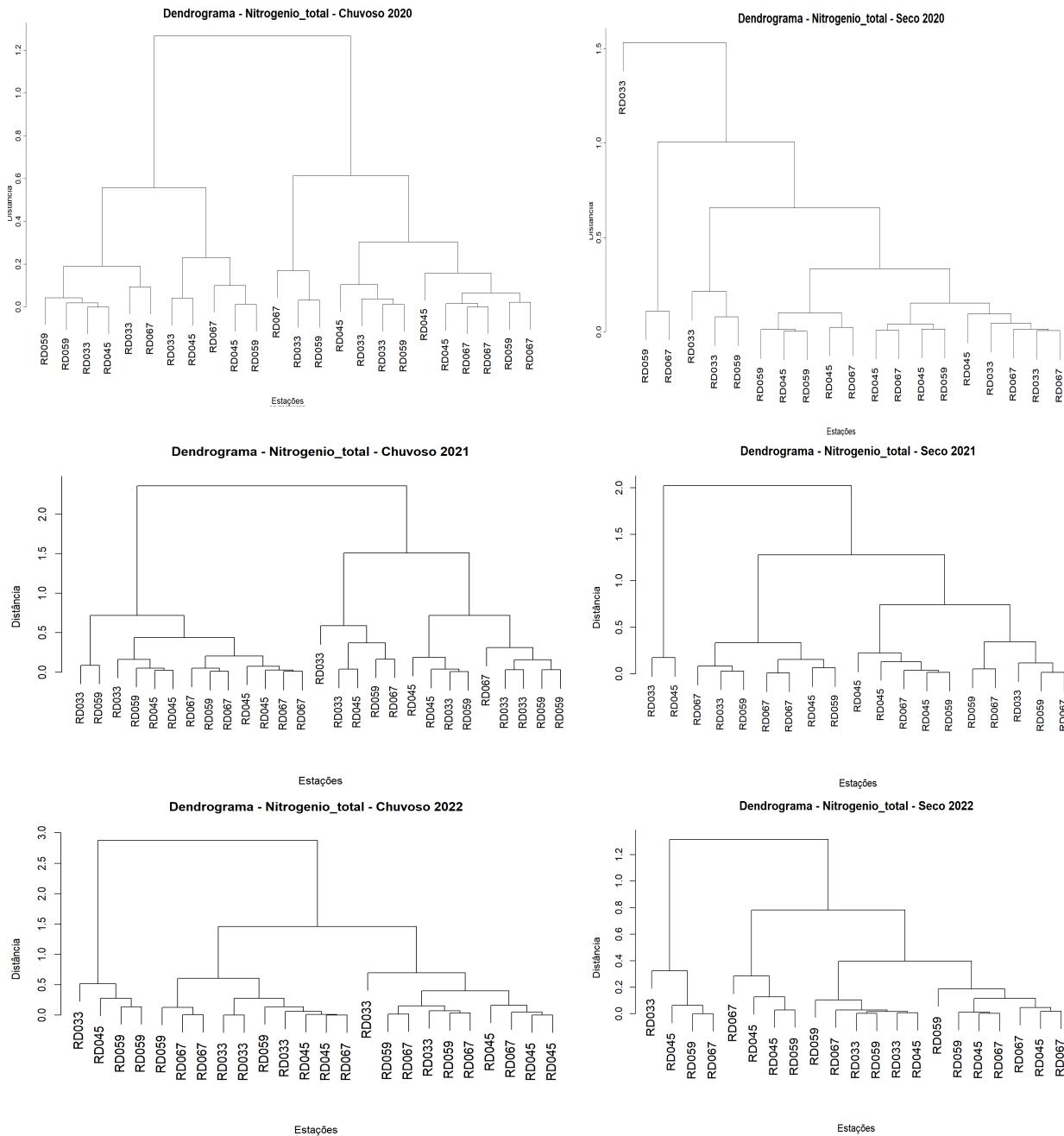
Figura 5.12 - Boxplots dos valores de nitrogênio total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 e 2021.



Fonte: Autora (2025)

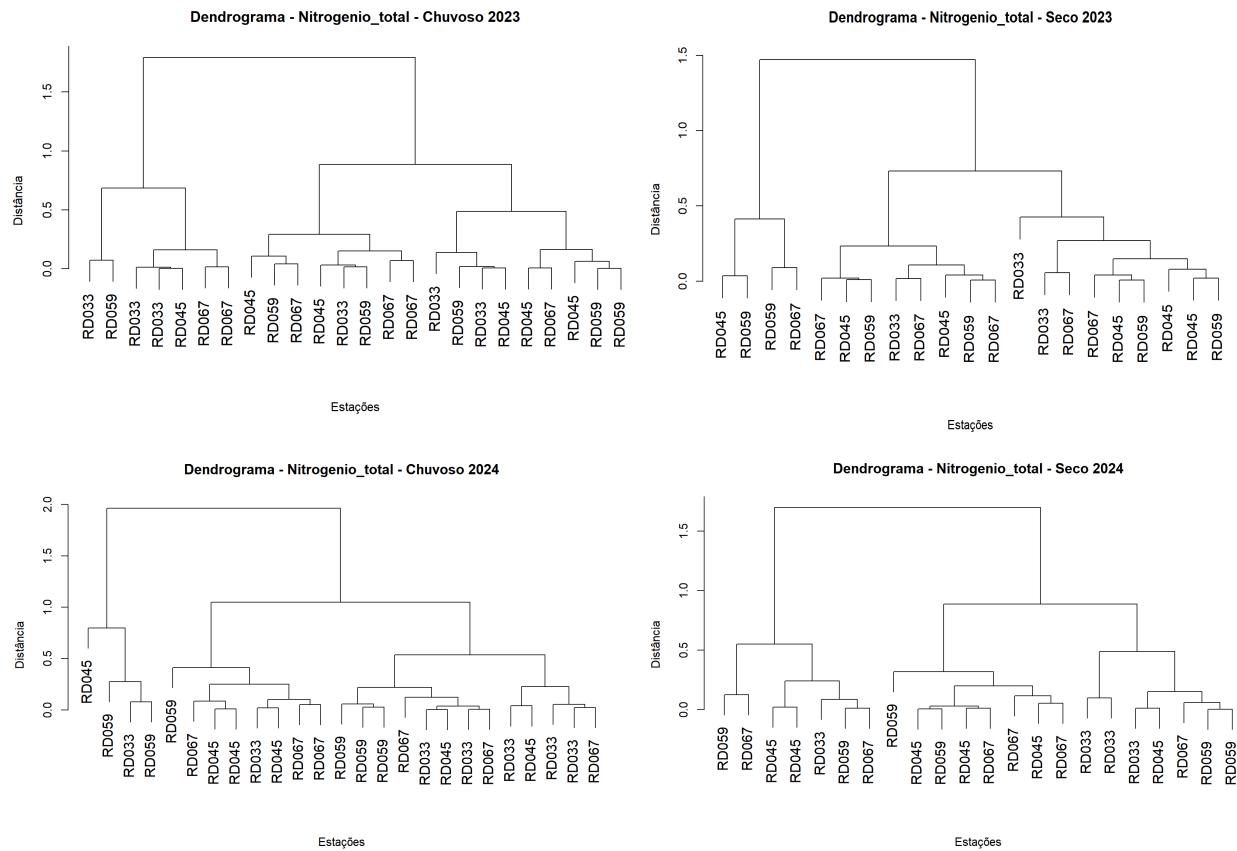
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.13 e Figura 5.14) representam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de nitrogênio total, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.13 - Dendrogramas dos valores de nitrogênio total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020, 2021 e 2022 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.14 - Dendrogramas dos valores de nitrogênio total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2023 e 2024, considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025)

A análise integrada do nitrogênio total entre 2020 e 2024 revela concentrações predominantemente entre 1,0 e 2,0 mg/L nas quatro estações monitoradas, com oscilações moderadas e picos pontuais acima de 3,0 mg/L em RD033 e RD067. RD045 apresenta maior variabilidade, possivelmente devido à influência urbana de Governador Valadares, enquanto RD059 mantém comportamento mais estável ao longo dos anos. Os boxplots reforçam esses padrões, evidenciando amplitudes maiores no período chuvoso em todas as estações, especialmente em 2021 e 2022, quando se observam valores máximos mais elevados e maior dispersão, sugerindo aumento do aporte difuso de nutrientes por escoamento superficial. No período seco, as distribuições tornam-se mais compactas, com medianas mais baixas e menor variabilidade, refletindo a redução das cargas externas e maior estabilidade hidrológica. Os dendrogramas corroboram esses resultados ao mostrar agrupamentos recorrentes entre RD033,

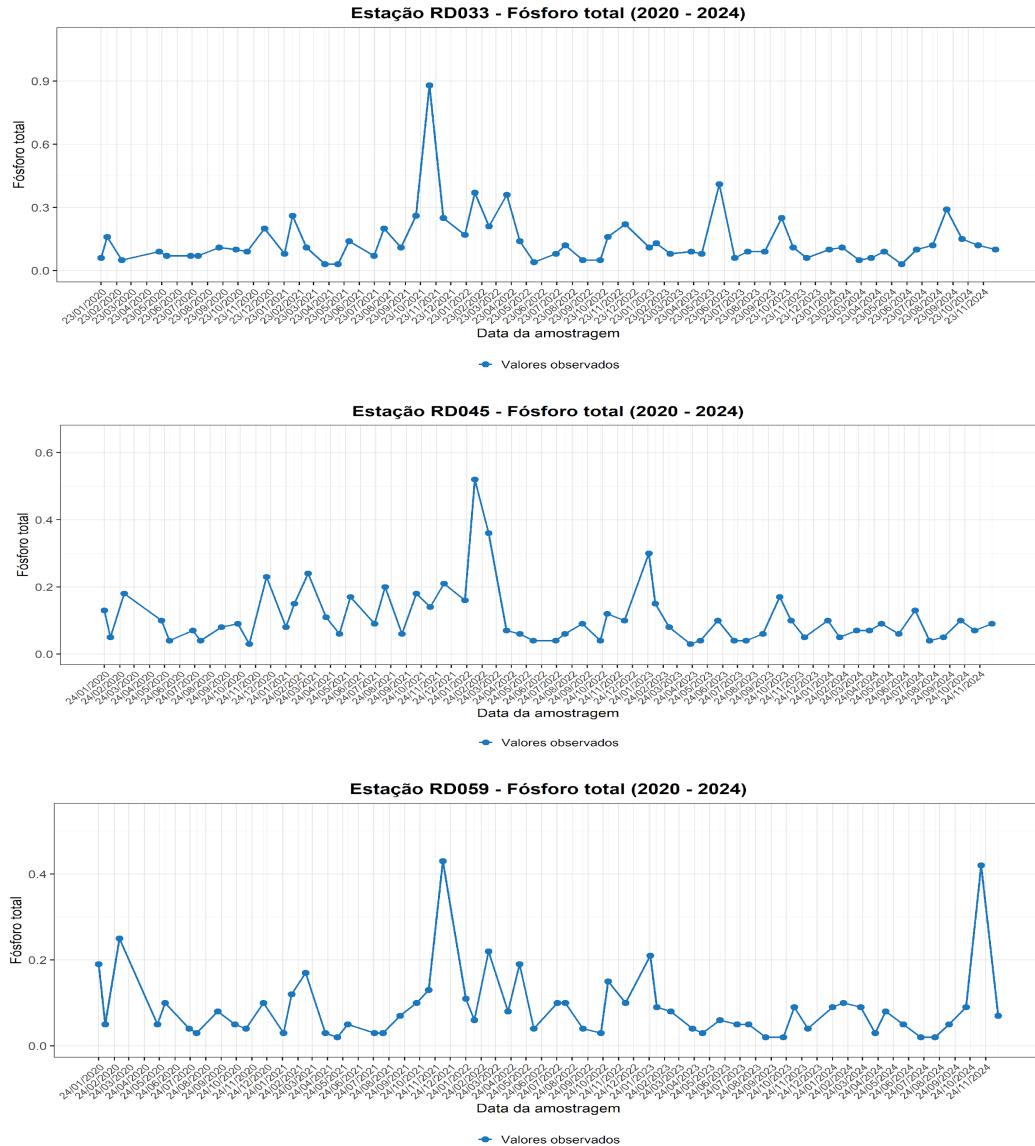
RD059 e RD067, sobretudo no período chuvoso, enquanto RD045 tende a se distanciar das demais no período seco, indicando comportamento mais influenciado por pressões antrópicas locais. De forma geral, os dados apontam para um regime relativamente estável de nitrogênio total no rio Doce, com variações sazonais esperadas e maior heterogeneidade associada ao período de estiagem.

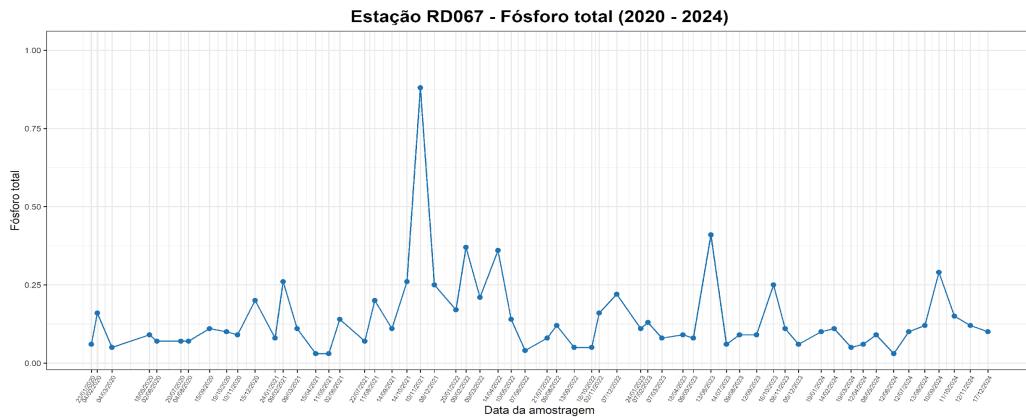
5.5 Fósforo total

O fósforo total é um nutriente essencial nos ambientes aquáticos e sua presença nas águas naturais está principalmente associada ao lançamento de esgotos sanitários, detergentes e efluentes industriais, além do escoamento agrícola e urbano (CETESB, 2018). Por ser um macronutriente fundamental aos processos biológicos, seu excesso pode intensificar a produtividade algal e favorecer episódios de eutrofização, alterando a qualidade da água e comprometendo usos como o abastecimento. No contexto do Índice de Qualidade da Água (IQA), o fósforo total é um parâmetro de grande relevância, pois reflete a pressão antrópica sobre o corpo hídrico e auxilia na identificação de riscos associados ao crescimento excessivo de algas e à deterioração das condições ambientais, sendo essencial para o diagnóstico e a gestão de recursos hídricos.

Na Figura 5.15 a seguir, são apresentadas as séries temporais dos valores de fósforo total nas águas superficiais das estações monitoradas, contemplando integralmente o período analisado neste estudo e permitindo a identificação de tendências, variações sazonais e possíveis influências antrópicas ao longo do tempo.

Figura 5.15 - Resultados do parâmetro fósforo total em Água Superficial das estações (2020 – 2024).

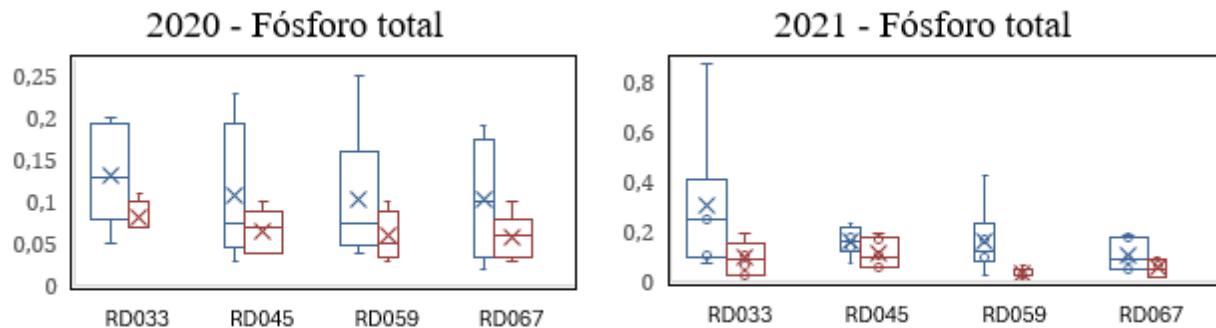


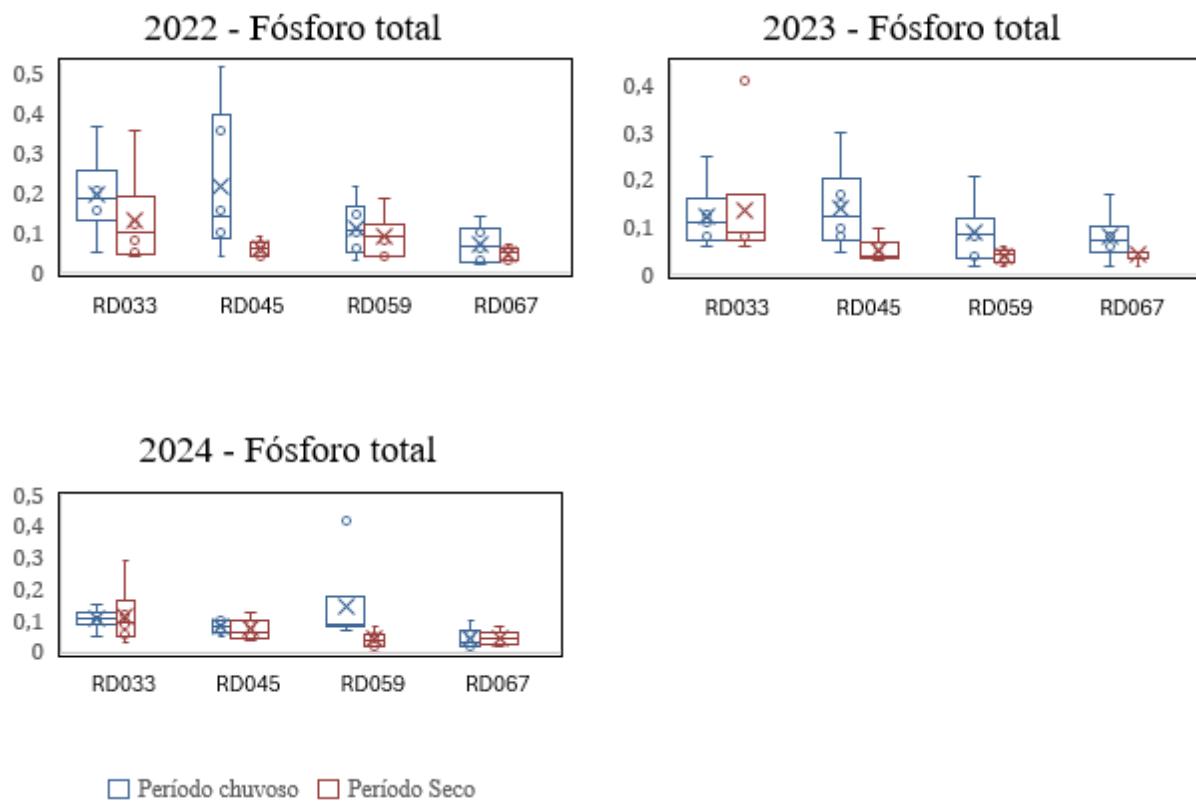


Fonte: Autora (2025)

Os boxplots apresentados a seguir ilustram a distribuição e a variabilidade dos valores de fósforo total nas águas superficiais das estações monitoradas nos períodos chuvoso e seco, representando de forma sintética as diferenças sazonais e a amplitude dos dados ao longo de todo o período analisado neste estudo (Figura 5.16).

Figura 5.16 - Boxplots dos valores de fósforo total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020. a 2024

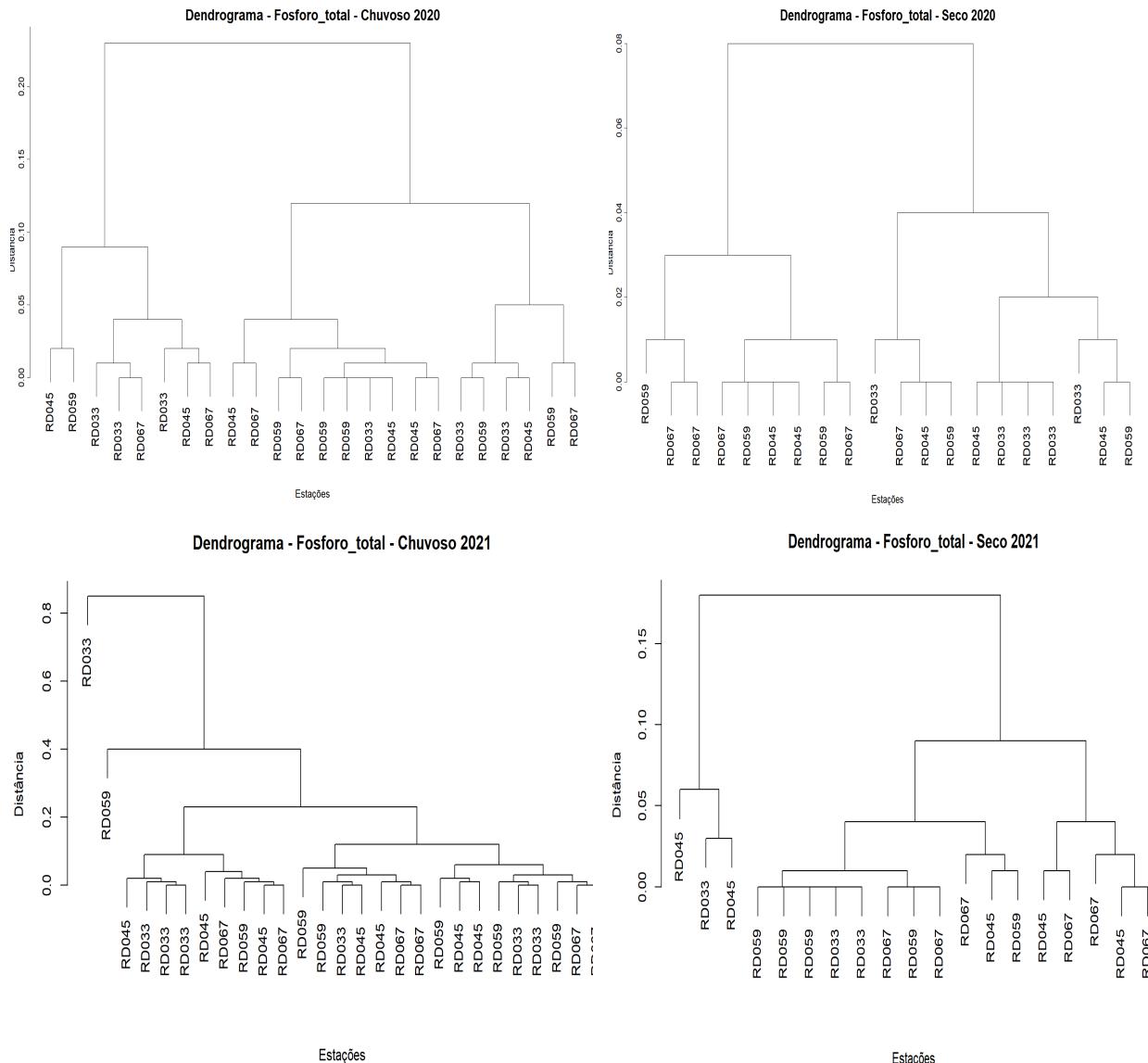




Fonte: Autora (2025)

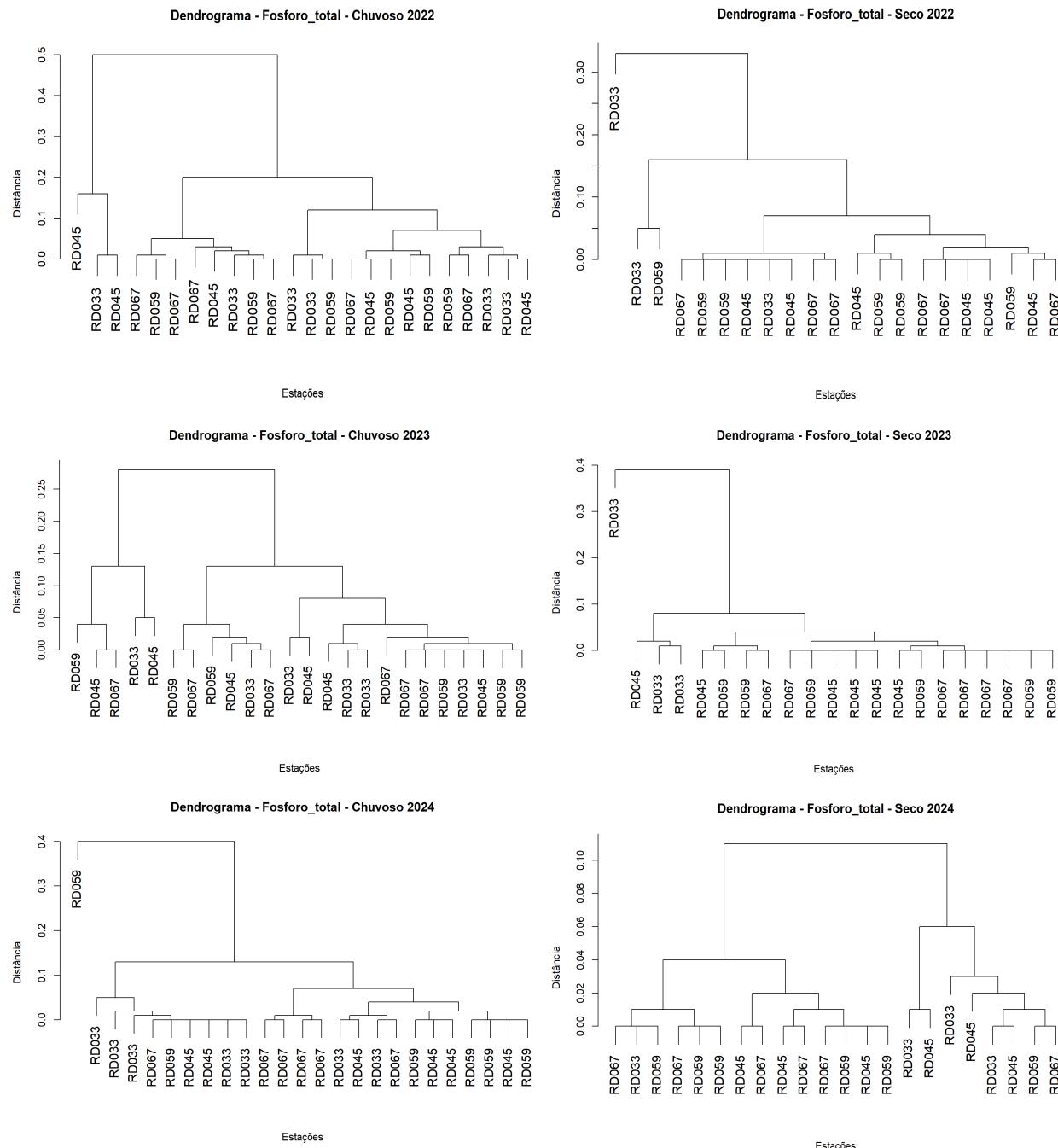
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.17 e Figura 5.18) representam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de fósforo total, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.17 - Dendrograma dos valores de fósforo total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025)

Figura 5.18 - Dendrograma dos valores de fósforo total em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 considerando o período chuvoso



Fonte: Autora (2025)

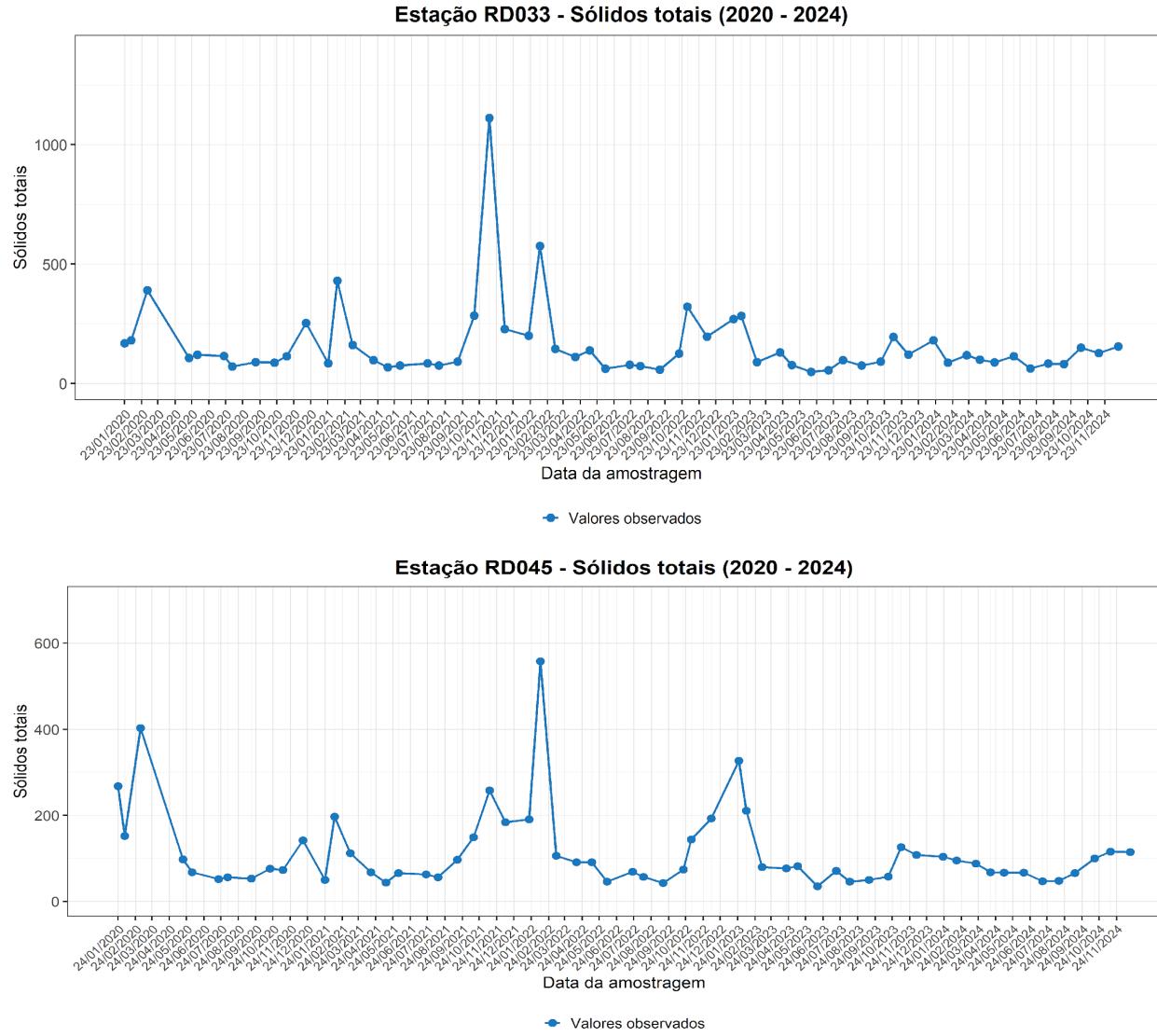
A análise integrada das séries temporais, dos boxplots e dos dendrogramas de fósforo total entre 2020 e 2024 revela um comportamento marcado principalmente pela sazonalidade, com aumentos mais expressivos durante o período chuvoso e relativa estabilidade no período seco. As séries temporais mostram oscilações moderadas nas quatro estações monitoradas, com picos pontuais associados a episódios de maior aporte de sedimentos e material particulado, especialmente em RD033 e RD067, refletindo a influência do transporte de sedimentos ao longo do rio. Os boxplots reforçam esse padrão, evidenciando maior variabilidade e valores mais elevados na estação chuvosa e distribuições mais homogêneas na seca. Embora ocorram episódios isolados de concentrações mais altas, não se observa tendência de aumento progressivo ao longo dos anos, e em 2024 há inclusive redução geral dos valores. Os dendrogramas, por sua vez, indicam alta similaridade entre as estações, com agrupamentos relativamente estáveis e distâncias reduzidas, sugerindo que o comportamento do fósforo total é homogêneo ao longo do trecho monitorado. Em síntese, os resultados apontam para um padrão sazonal claro, moderada variabilidade espacial e ausência de mudanças estruturais no comportamento do fósforo total no período avaliado.

5.6 Sólidos totais

Os Sólidos Totais (ST), resultantes da soma dos sólidos dissolvidos e suspensos na água, são fundamentais para avaliar a qualidade hídrica, pois influenciam parâmetros como turbidez, salinidade, transparência e estabilidade físico-química. Concentrações elevadas podem comprometer o uso da água para abastecimento, favorecer processos de corrosão em sistemas hidráulicos, reduzir a penetração de luz e afetar organismos aquáticos, sendo, portanto, essenciais para o diagnóstico ambiental e para índices integrados de qualidade da água, como o IQA (BUTLER et al., 2018; MCCLESKEY et al., 2023).

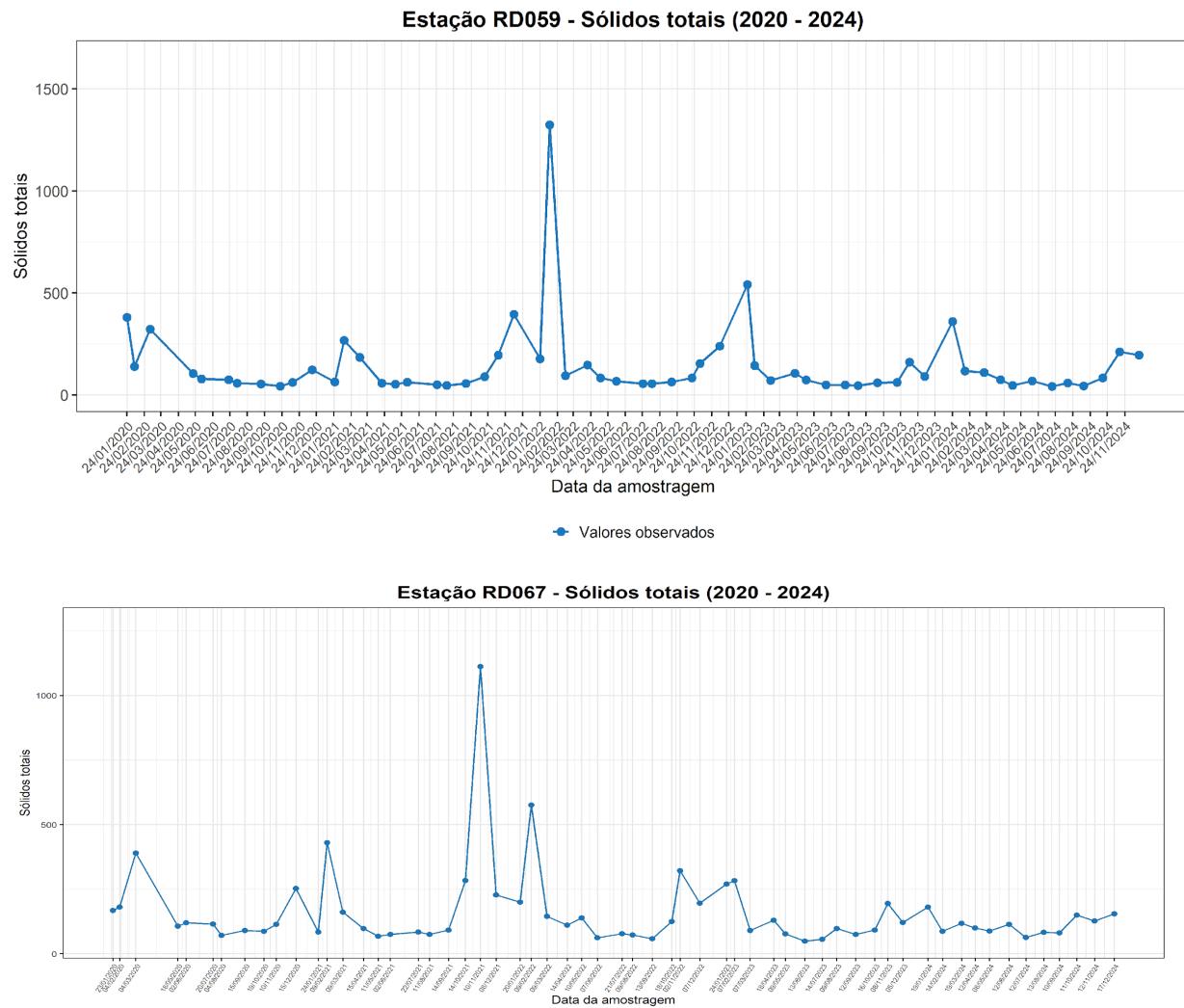
Nas Figura 5.19 e Figura 5.20 a seguir, são apresentadas as séries temporais dos valores de sólidos totais nas águas superficiais das estações monitoradas, abrangendo todo o período considerado neste estudo e permitindo observar tendências gerais, variações sazonais e possíveis influências antrópicas associadas às condições de carga de materiais dissolvidos e suspensos ao longo do tempo.

Figura 5.19 - Resultados do parâmetro sólidos totais em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025)

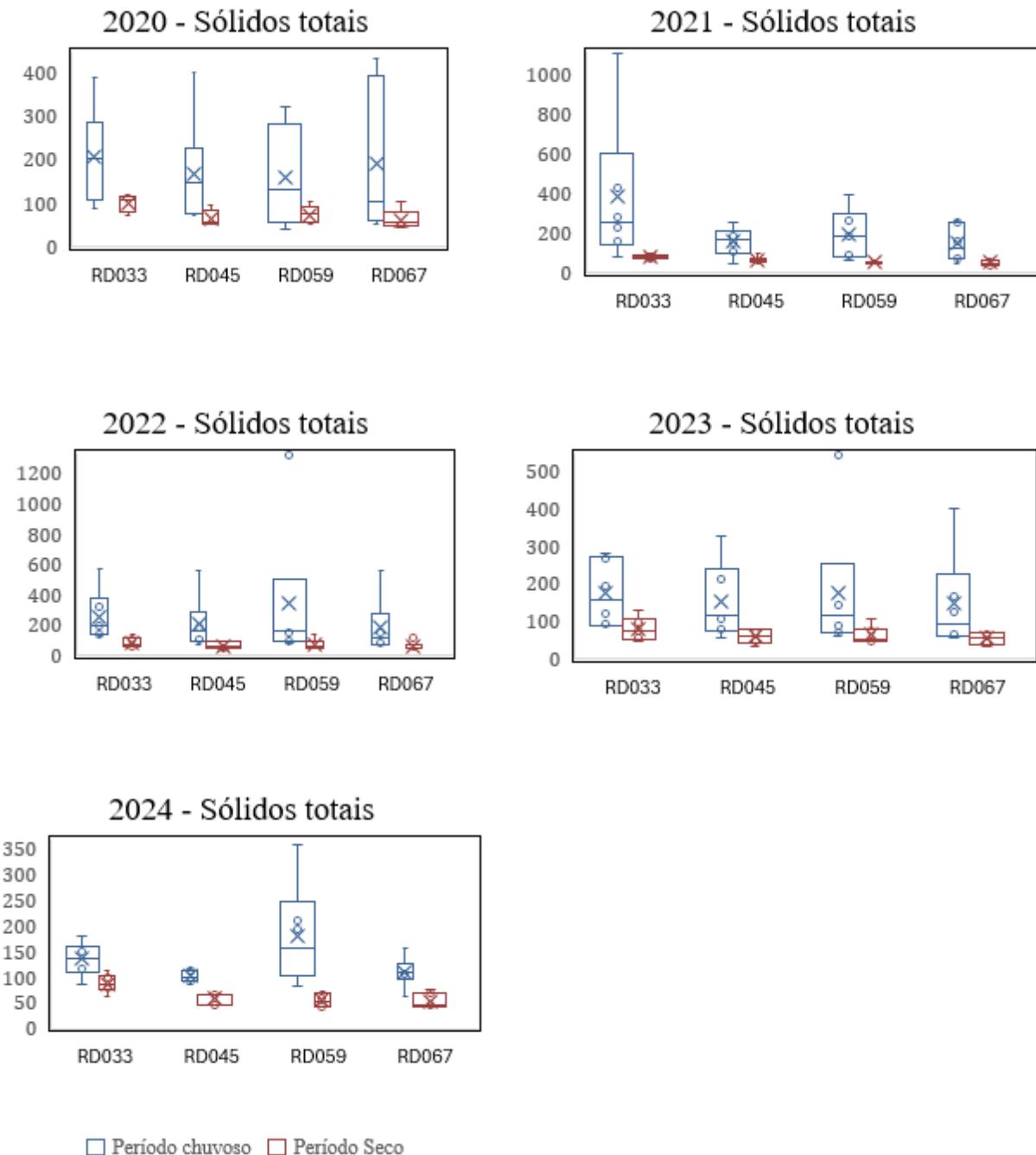
Figura 5.20 - Resultados do parâmetro sólidos totais em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025)

Os boxplots apresentados a seguir ilustram a distribuição e a variabilidade dos valores de sólidos totais nas águas superficiais das estações monitoradas nos períodos chuvoso e seco, sintetizando as diferenças sazonais e a amplitude dos dados observados ao longo de todo o período considerado neste estudo (Figura 5.21).

Figura 5.21 - Boxplots dos valores de sólidos totais em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024.

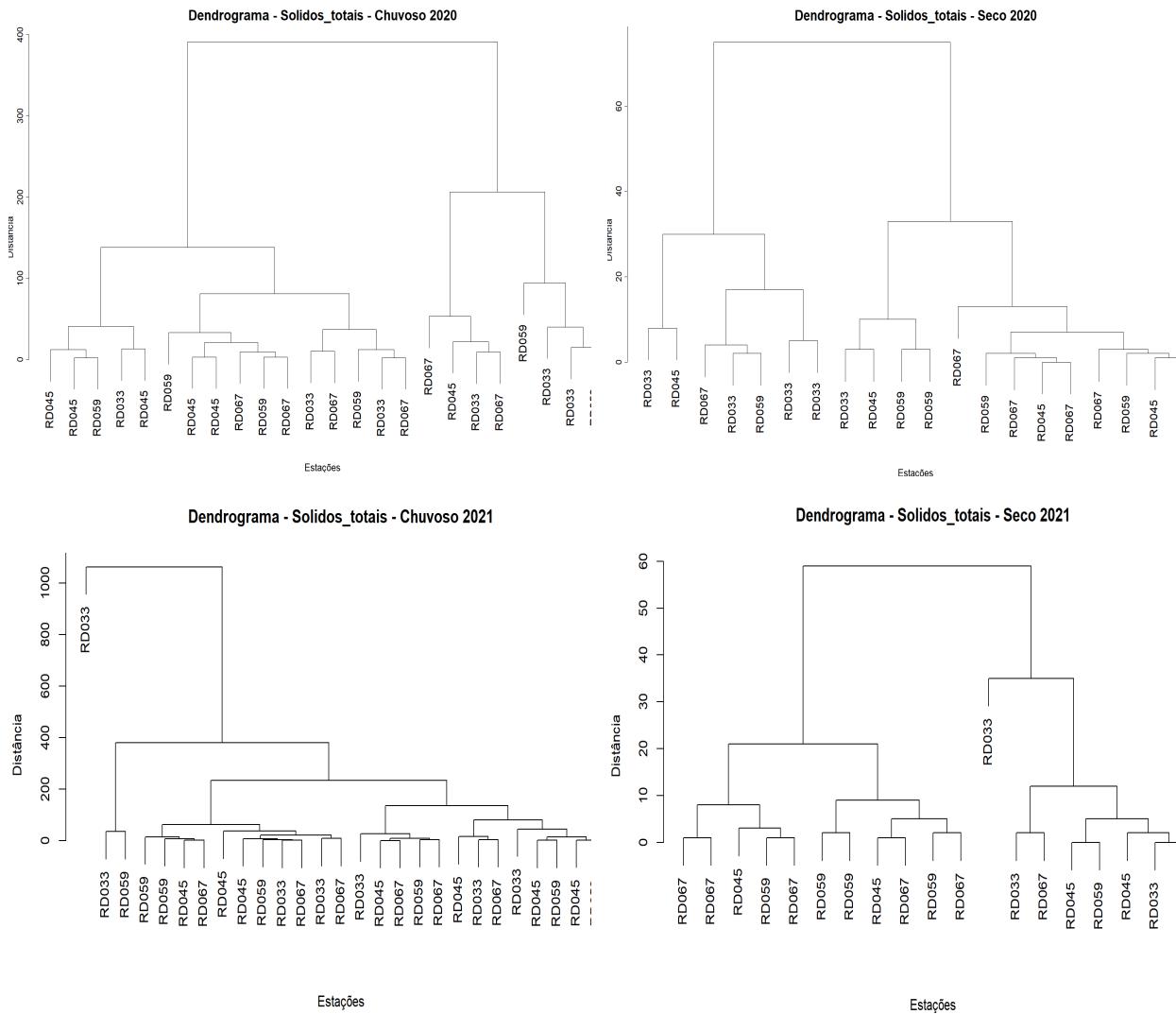


Fonte: Autora (2025)

Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.22 e Figura 5.23) mostram os padrões de similaridade entre as estações monitoradas a partir dos valores de sólidos totais, considerando

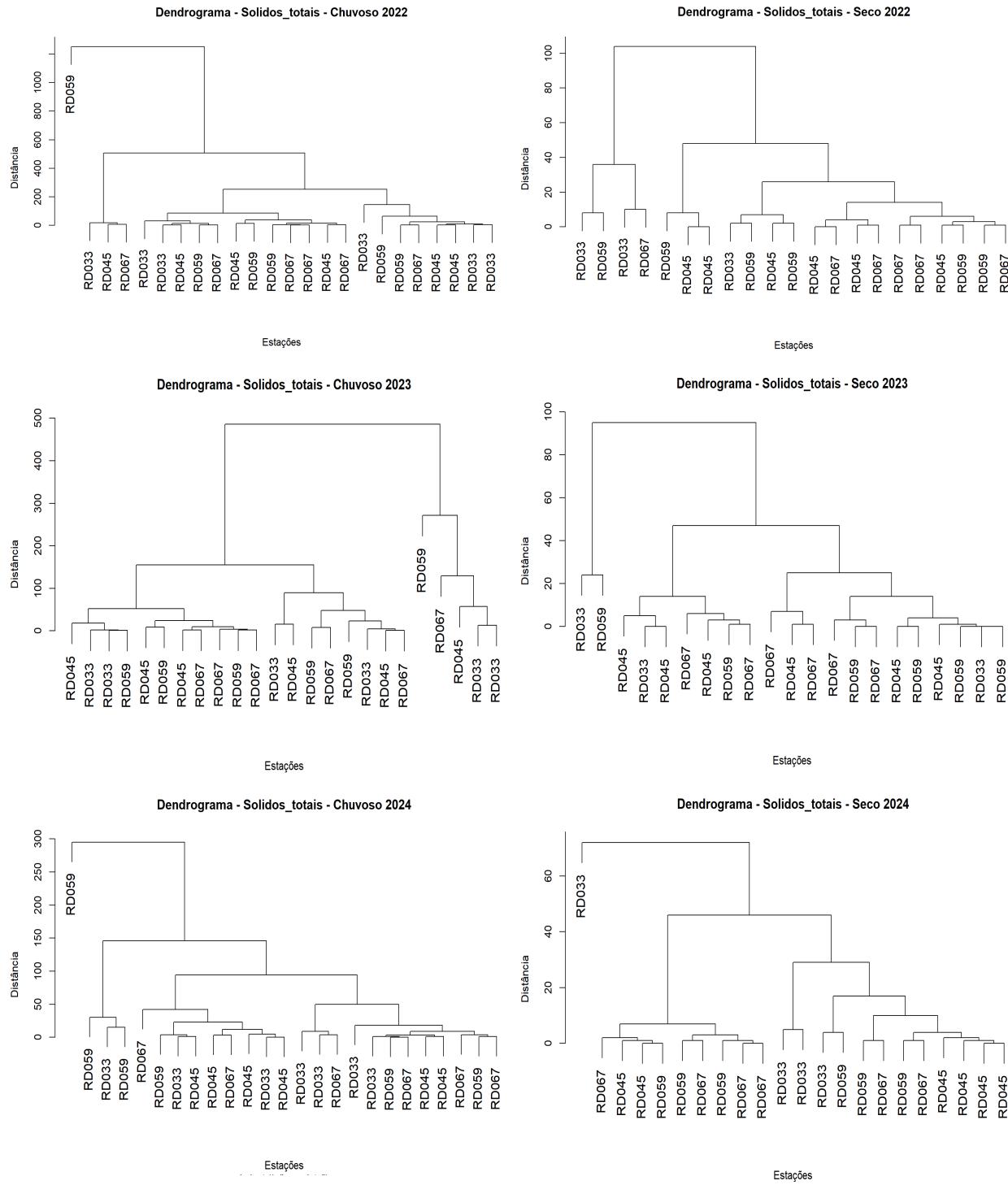
separadamente os períodos chuvoso e seco. Essa abordagem permite identificar agrupamentos naturais entre os pontos amostrados, evidenciando como as condições hidrológicas influenciam a distribuição e o comportamento desse parâmetro ao longo do tempo.

Figura 5.22 - Dendrograma dos valores de sólidos totais em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.23 - Dendrograma dos valores de sólidos totais em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 a 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

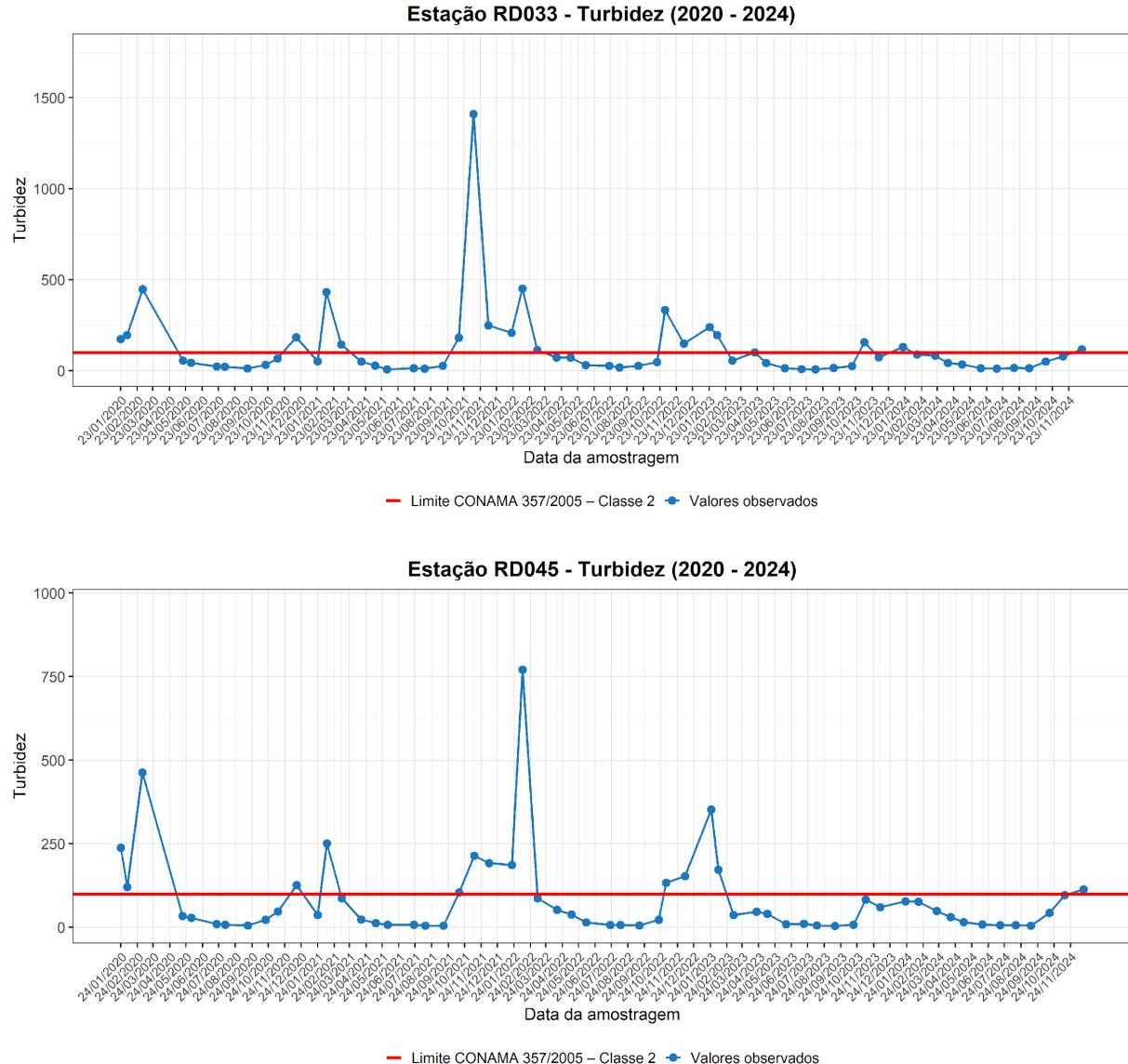
A análise dos sólidos totais no rio Doce entre 2020 e 2024 mostra forte influência sazonal, com concentrações mais elevadas e variáveis no período chuvoso devido ao maior carreamento de sedimentos, enquanto o período seco apresenta valores mais baixos e estáveis. As séries temporais revelam picos expressivos em estações como RD033 e RD059, sobretudo em 2021 e 2022, associados a eventos intensos de precipitação. Os boxplots confirmam esse padrão ao indicar maior dispersão e medianas superiores no período chuvoso, contrastando com a homogeneidade observada na estiagem. Já os dendrogramas mostram maior similaridade entre as estações no período seco e maior diferenciação no chuvoso, especialmente quando RD033 ou RD059 se destacam por concentrações mais altas. No conjunto, os dados indicam que as variações de sólidos totais refletem essencialmente o regime hidrológico, sem tendência de aumento contínuo ao longo dos anos analisados.

5.7 Turbidez

A turbidez corresponde à redução da passagem de luz através da água devido à presença de partículas em suspensão, como argila, silte, areia, matéria orgânica, algas e microrganismos, que provocam absorção e espalhamento do feixe luminoso. Níveis elevados de turbidez podem resultar de processos naturais, como erosão intensificada em períodos chuvosos, ou de fontes antrópicas, incluindo esgotos, efluentes industriais e atividades minerárias. Esse aumento interfere tanto nos processos de tratamento, exigindo ajustes na coagulação e decantação, quanto no ambiente aquático, ao reduzir a fotossíntese, afetar a vegetação submersa e impactar a produtividade de peixes. Assim, a turbidez influencia diretamente os usos doméstico, industrial e recreacional da água, constituindo parâmetro fundamental na avaliação da qualidade hídrica (CETESB, 2018).

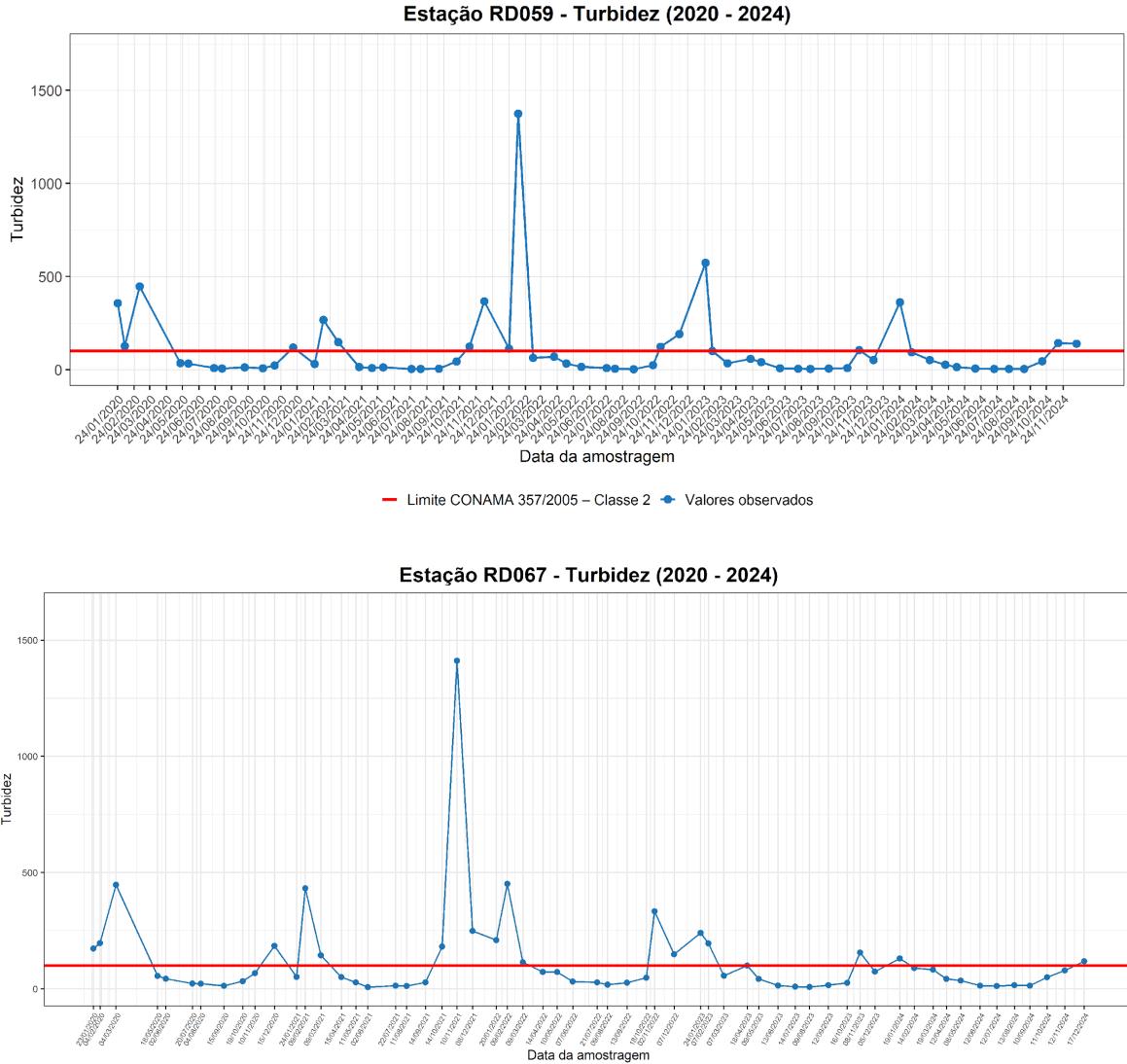
Nas Figura 5.24 e Figura 5.25 a seguir, são apresentadas as séries temporais dos valores de turbidez nas águas superficiais das estações monitoradas, abrangendo todo o período considerado neste estudo e permitindo identificar tendências, variações sazonais e possíveis influências antrópicas relacionadas à presença de partículas em suspensão e ao aporte de sedimentos ao longo do tempo.

Figura 5.24 - Resultados da turbidez em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

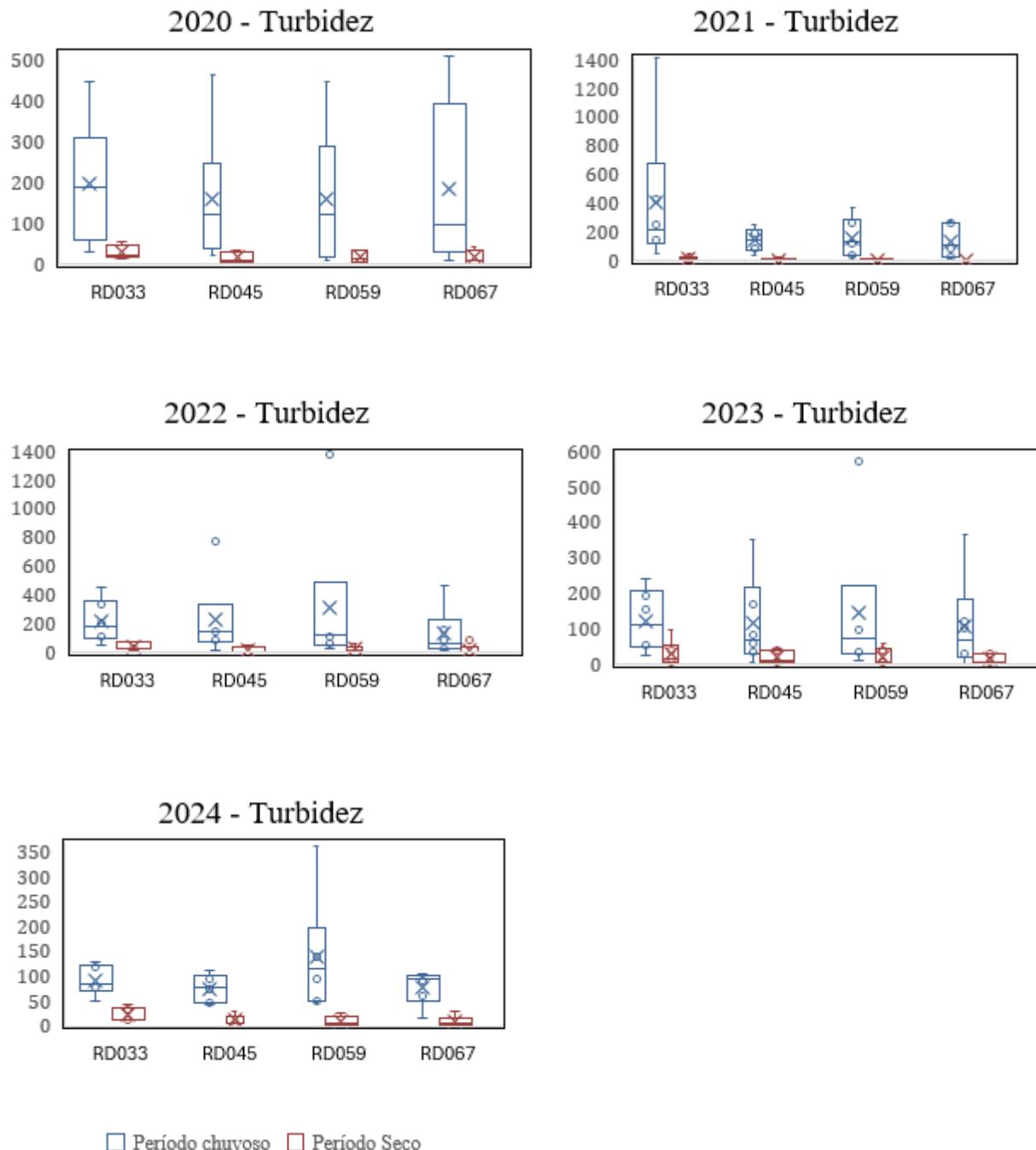
Figura 5.25 - Resultados da turbidez em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

Os boxplots apresentados a seguir (Figura 5.26) ilustram a distribuição e a variabilidade dos valores de turbidez nas águas superficiais das estações monitoradas nos períodos chuvoso e seco, evidenciando as diferenças sazonais e a amplitude das oscilações registradas ao longo de todo o período analisado neste estudo.

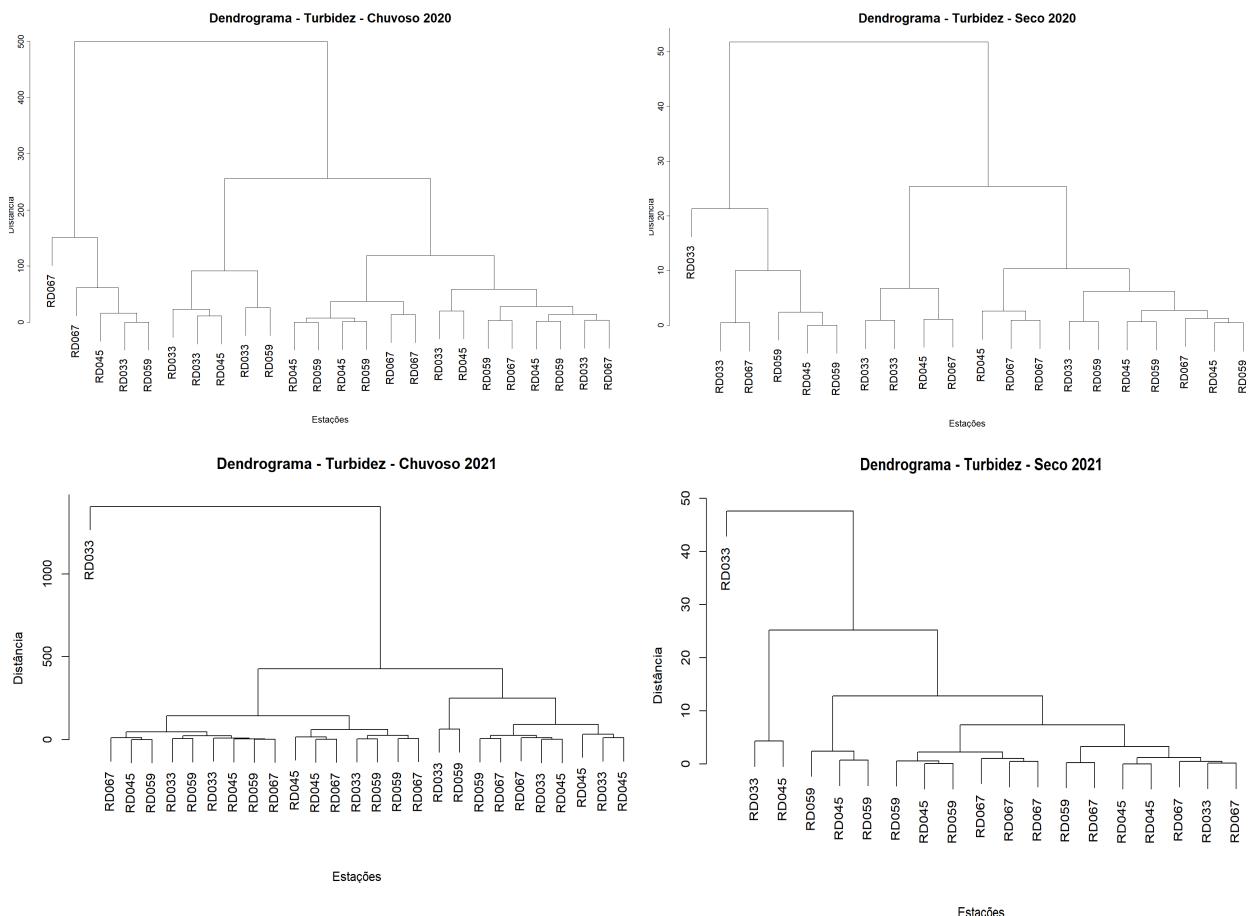
Figura 5.26 - Boxplots dos valores de turbidez em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024



Fonte: Autora (2025).

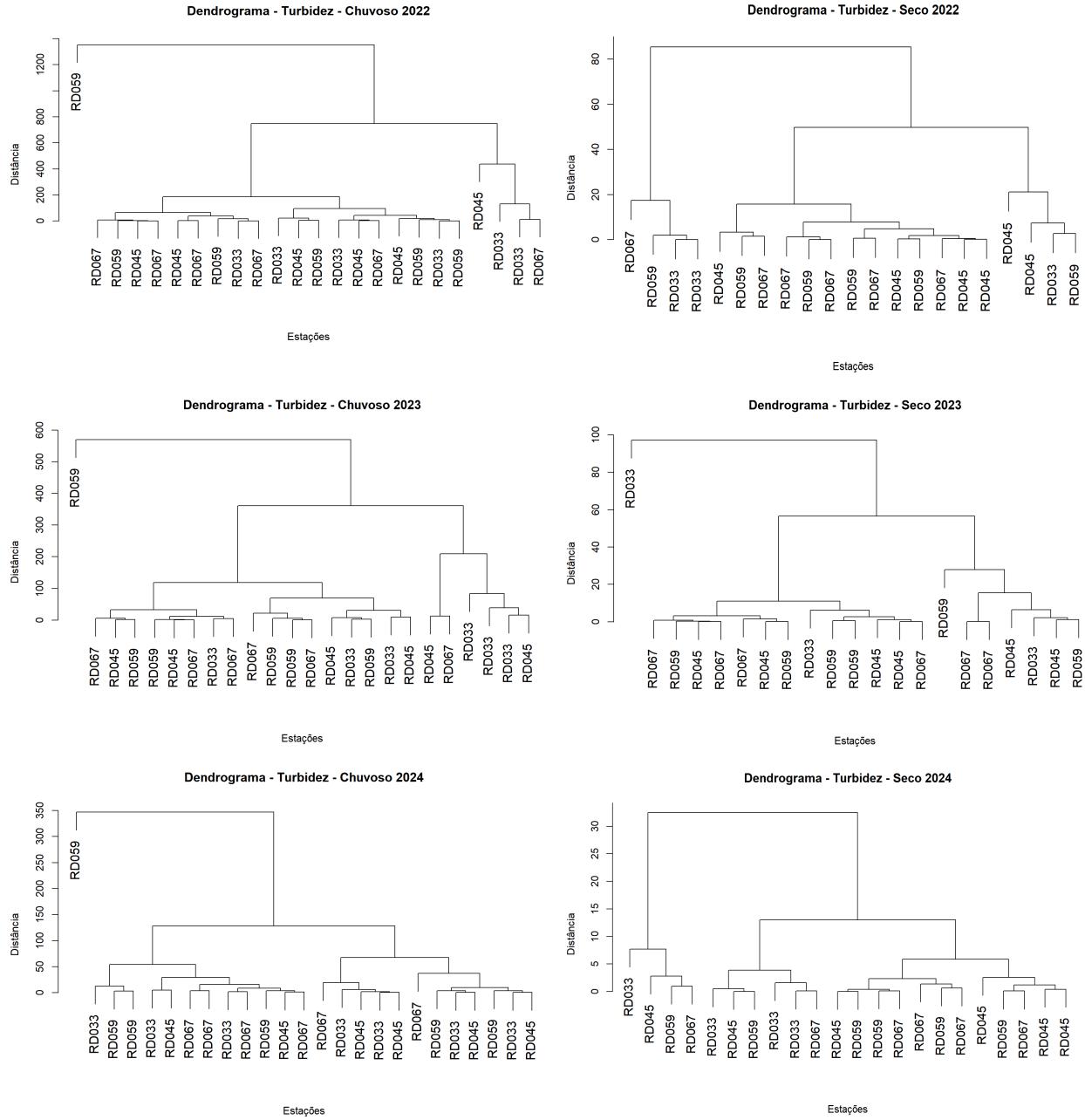
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.27 e Figura 5.28) evidenciam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de turbidez, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.27 - Dendrograma dos valores de turbidez em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.28 - Dendrograma dos valores de turbidez em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

As séries temporais de turbidez entre 2020 e 2024 revelam forte sazonalidade nas quatro estações, com aumentos expressivos no período chuvoso devido ao maior escoamento superficial e carreamento de sedimentos, incluindo excedências ao limite de 100 NTU da Resolução

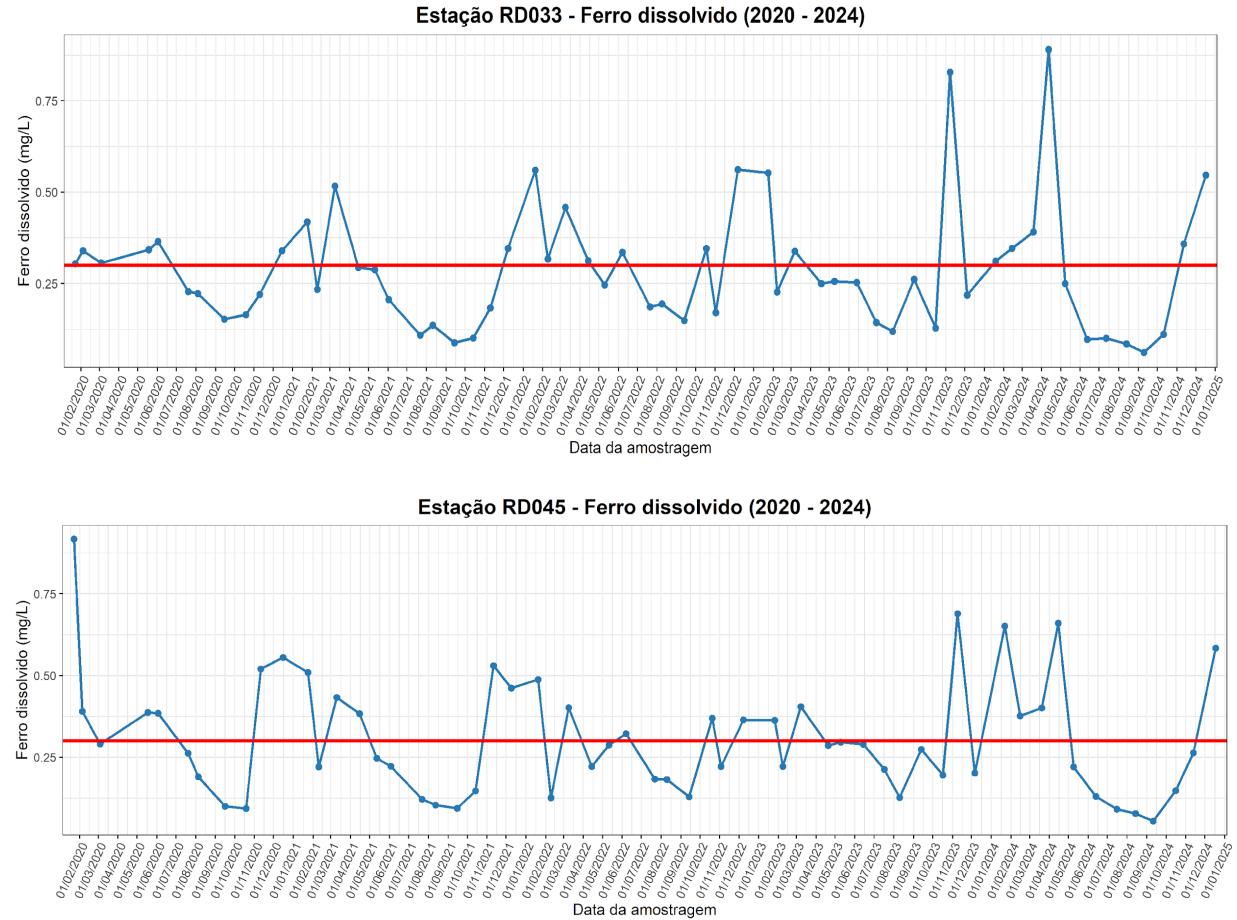
CONAMA 357/2005, sobretudo em RD033 e RD067. Nos meses secos, a turbidez permanece baixa e estável, indicando menor contribuição de partículas suspensas. Os boxplots reforçam esse padrão, mostrando maior variabilidade e valores elevados no período chuvoso, particularmente em RD033 e RD059, enquanto no período seco as distribuições são estreitas e com medianas reduzidas. A análise dos dendrogramas evidencia que, durante o período chuvoso, as estações apresentam maior dissimilaridade devido aos picos de turbidez associados às chuvas, ao passo que no período seco os agrupamentos são mais homogêneos, com RD045 e RD067 frequentemente integradas aos mesmos clusters. No conjunto, os resultados demonstram que a sazonalidade hidrológica é o principal fator que regula o comportamento da turbidez no rio Doce, intensificando diferenças entre estações no período chuvoso e promovendo uniformidade no período seco.

5.8 Ferro dissolvido

O ferro dissolvido está presente naturalmente em águas superficiais e subterrâneas e sua ocorrência influencia diversos aspectos da qualidade da água, pois concentrações elevadas podem causar coloração avermelhada, sabor metálico e formação de depósitos que prejudicam sistemas de distribuição, além de favorecer o desenvolvimento de bactérias de ferro e biofilmes (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2003). Embora geralmente não represente risco sanitário direto, seu monitoramento é fundamental para evitar problemas operacionais e garantir a aceitação estética da água, sendo a remoção por processos de oxidação e filtração uma prática comum nos sistemas de tratamento (ILLINOIS DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH, 2025).

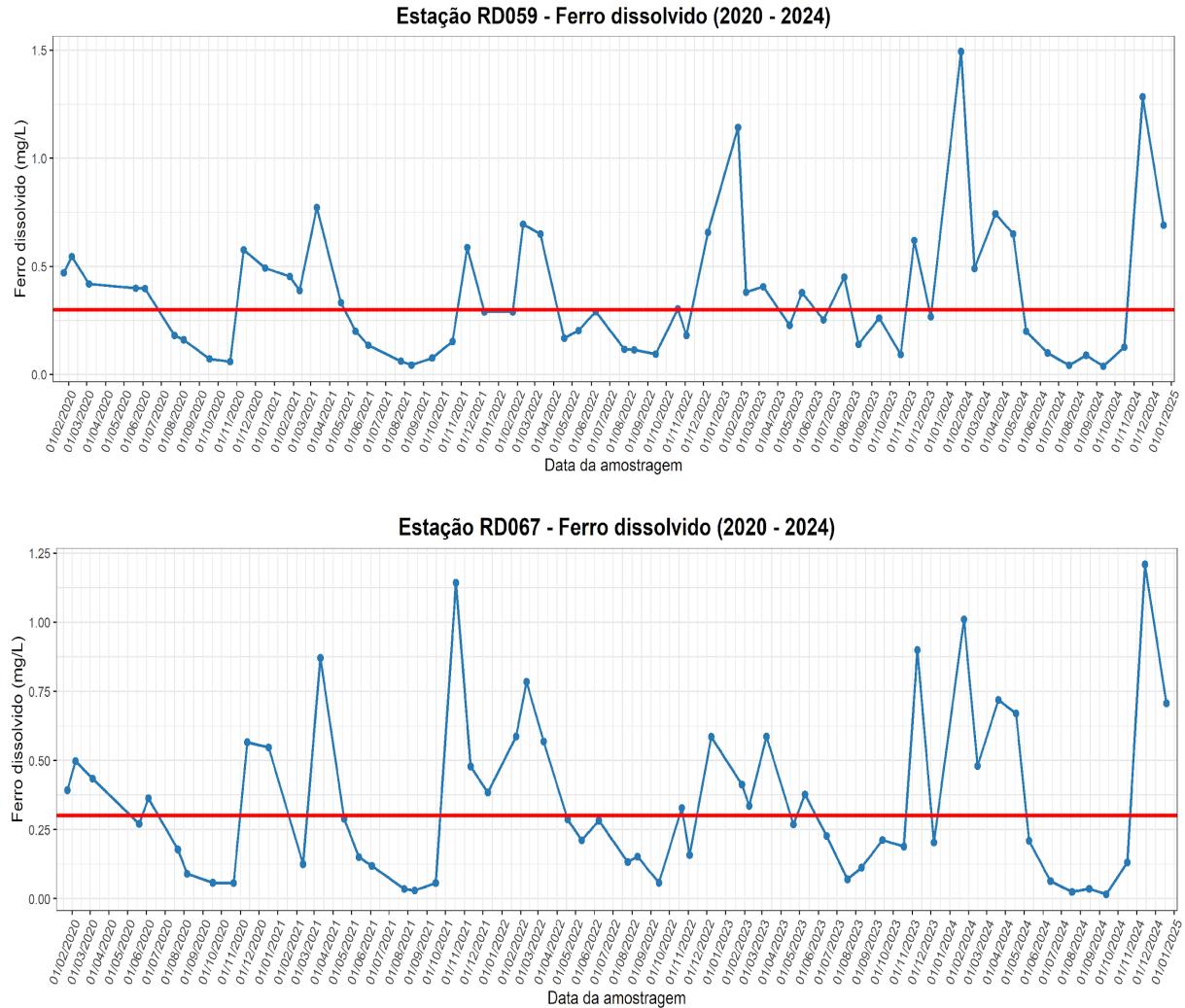
Nas Figura 5.29 e Figura 5.30, observa-se a série histórica dos resultados obtidos para o ferro dissolvido, apresentados em comparação com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos d'água classificados como Classe 2.

Figura 5.29 - Resultados do ferro dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

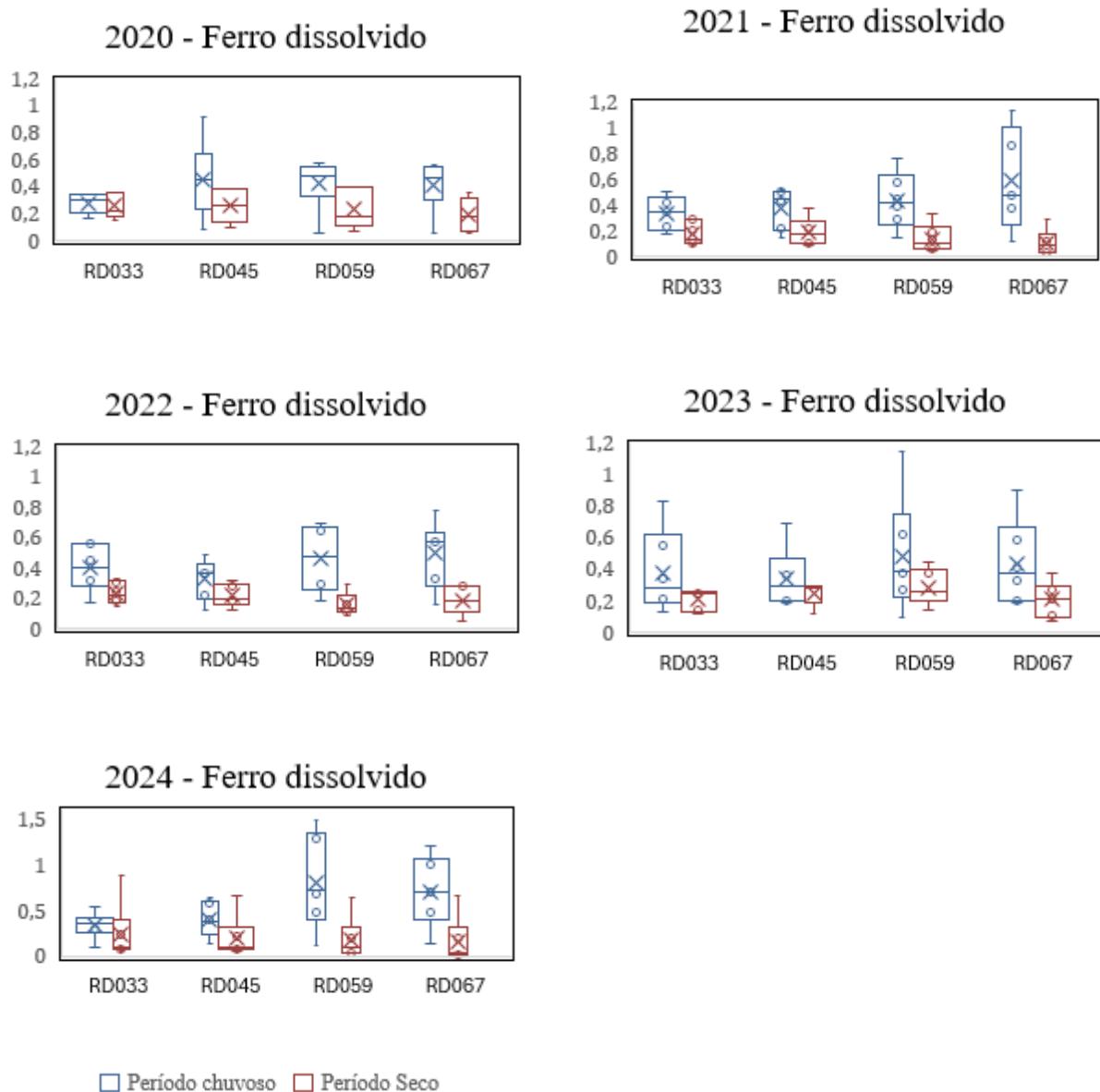
Figura 5.30 - Resultados do ferro dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024).



Fonte: Autora (2025).

Os boxplots apresentados a seguir (Figura 5.31) ilustram a distribuição e a variabilidade dos valores de ferro dissolvido nas águas superficiais das estações monitoradas nos períodos chuvoso e seco, evidenciando as diferenças sazonais e a amplitude das oscilações registradas ao longo de todo o período analisado neste estudo.

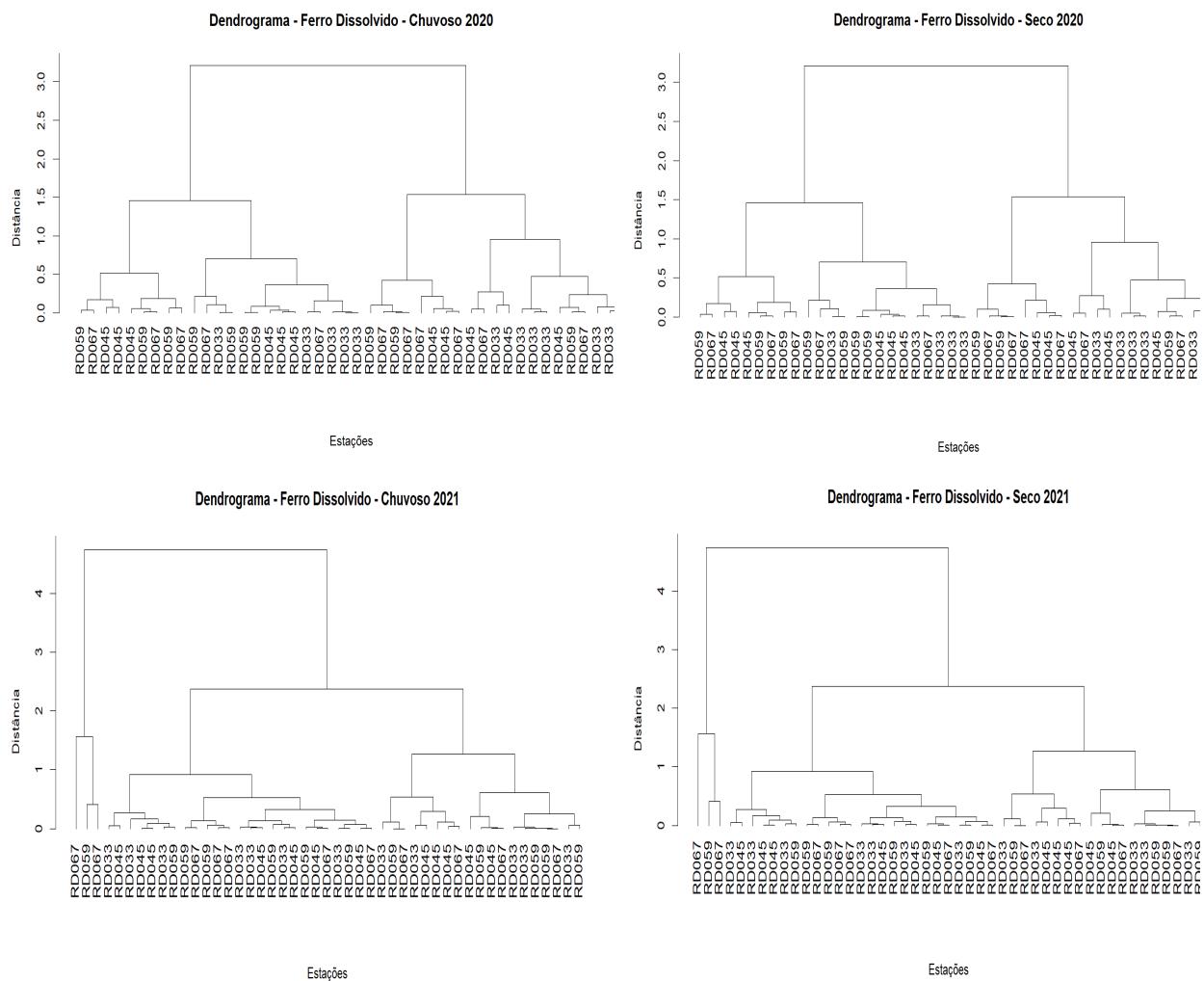
Figura 5.31 – Boxplots dos valores de ferro dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024



Fonte: Autora (2025).

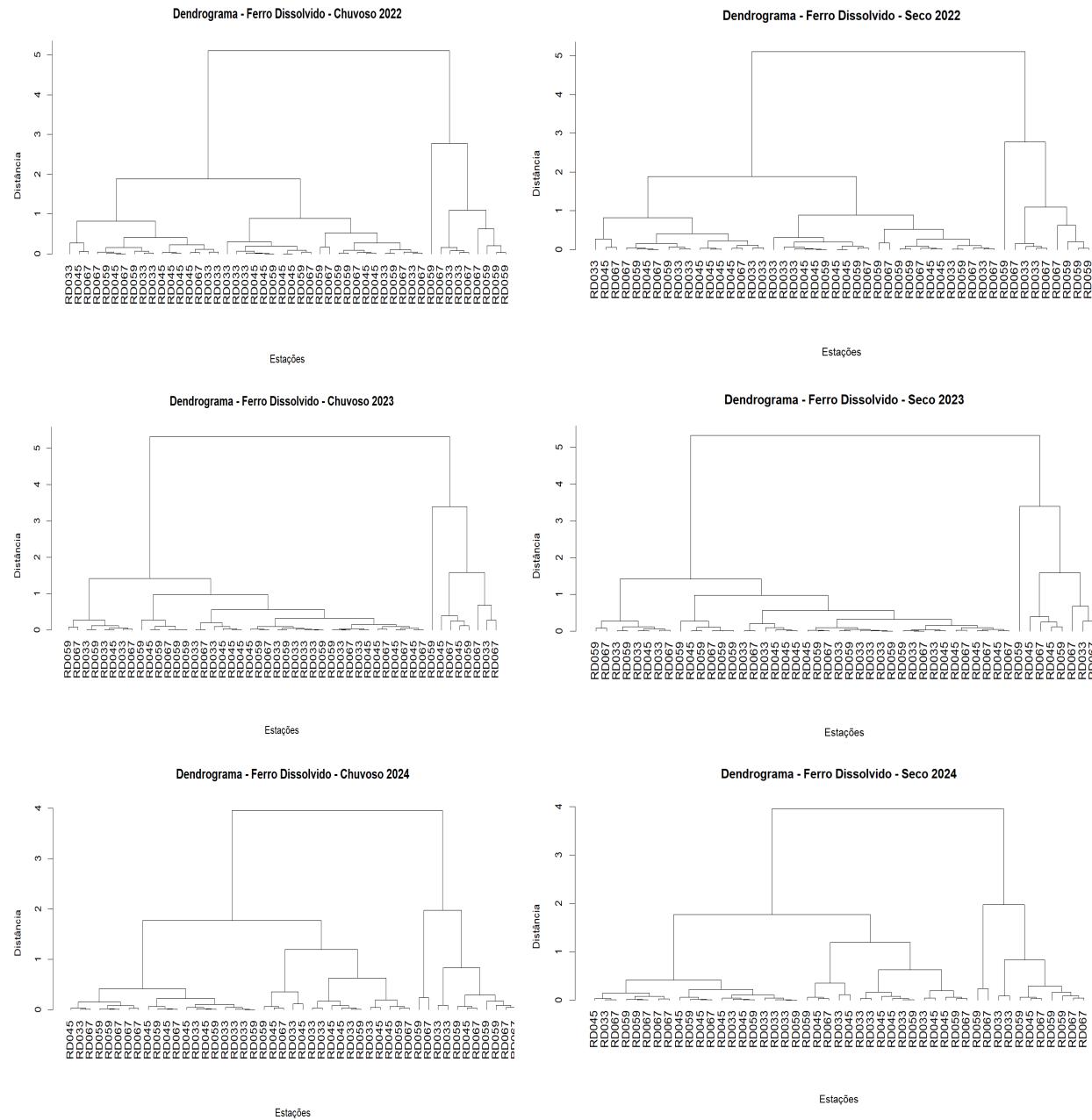
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.32 e Figura 5.33) evidenciam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de ferro dissolvido, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco. Esses agrupamentos permitem visualizar como as condições hidrológicas influenciam a distribuição do ferro ao longo do tempo, destacando diferenças e aproximações entre os pontos amostrados.

Figura 5.32 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.33 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022 a 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

A análise temporal do ferro dissolvido entre 2020 e 2024 revela comportamento semelhante entre as estações, com valores próximos ao limite de 0,30 mg/L da Resolução CONAMA 357/2005 e excedências recorrentes, mais intensas em RD059 e RD067, especialmente entre 2022 e 2024. Os

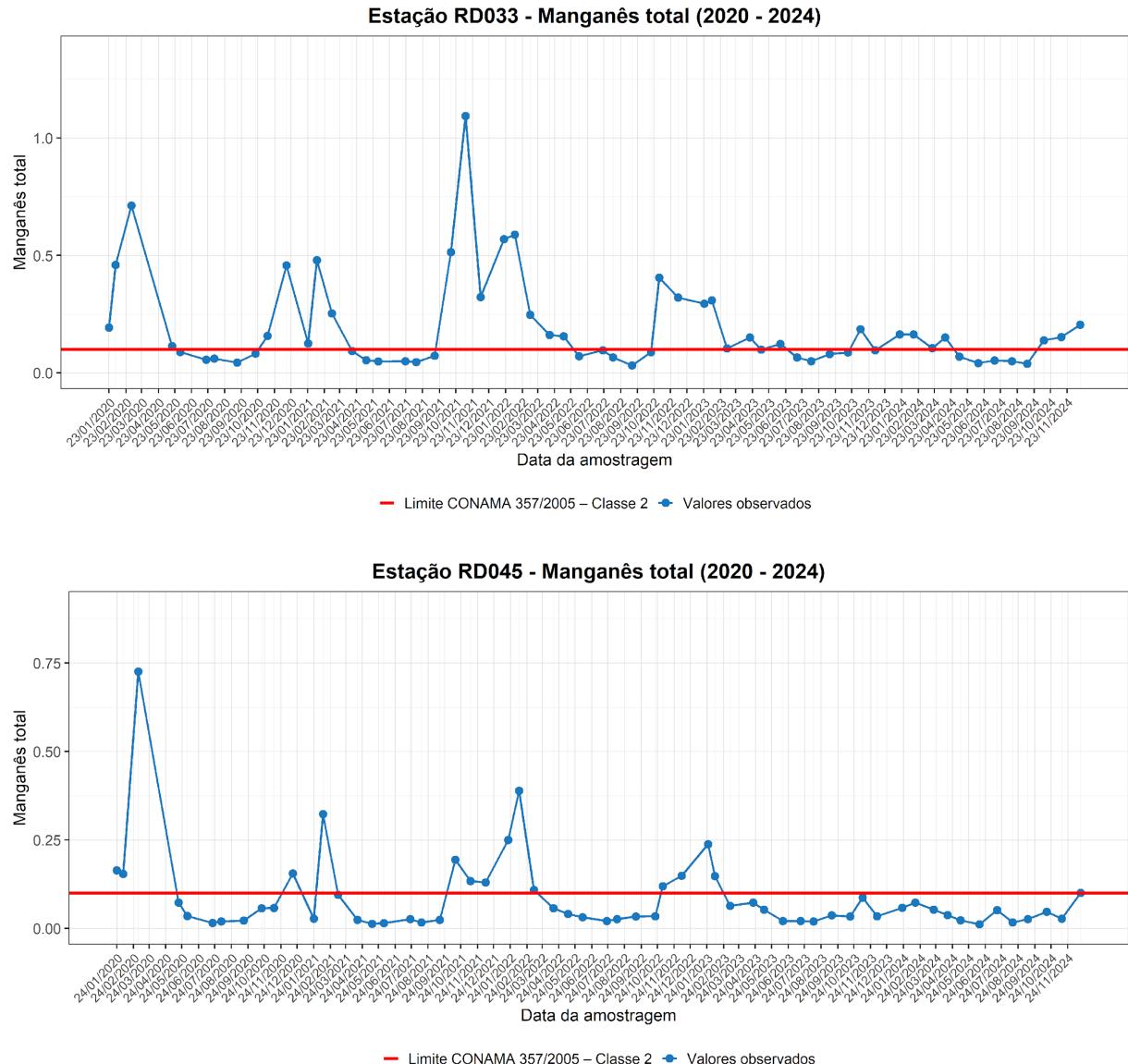
aumentos são mais frequentes no período chuvoso, sugerindo influência do escoamento superficial e do carreamento de partículas, enquanto o período seco apresenta maior estabilidade e menores concentrações. Os boxplots reforçam essa sazonalidade, com valores mais altos e variáveis nas chuvas, sobretudo em RD059 e RD067, ao passo que RD033 e RD045 mantêm distribuições mais baixas e homogêneas. Já os dendrogramas indicam maior dissimilaridade entre estações no período chuvoso e maior homogeneidade no seco, com RD059, RD067 e, em alguns anos, RD033 destacando-se como pontos mais distantes, refletindo diferenças espaciais e sensibilidade a eventos hidrológicos. No conjunto, os resultados mostram que a variabilidade do ferro dissolvido é fortemente controlada pela sazonalidade e por características locais das sub-bacias.

5.9 Manganês total

O manganês total é um parâmetro essencial na avaliação da qualidade da água para abastecimento, pois concentrações elevadas podem causar problemas operacionais, como incrustações e formação de depósitos em tubulações, além de alterar cor e sabor da água. Do ponto de vista da saúde pública, exposições prolongadas estão associadas a efeitos neurológicos, especialmente em crianças, o que levou organismos internacionais, como a World Health Organization e a United States Environmental Protection Agency, a estabelecerem diretrizes específicas para o consumo humano (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2017; UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2004). No Brasil, a Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece limite de 0,1 mg/L para águas de Classe 2, reforçando a importância do monitoramento contínuo desse elemento para garantir segurança e potabilidade.

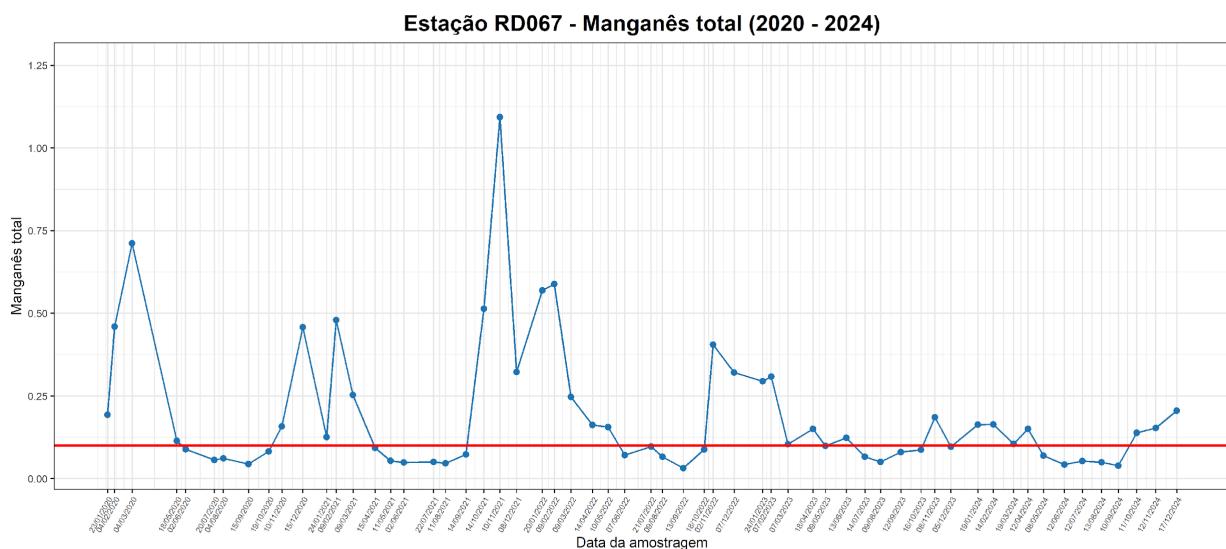
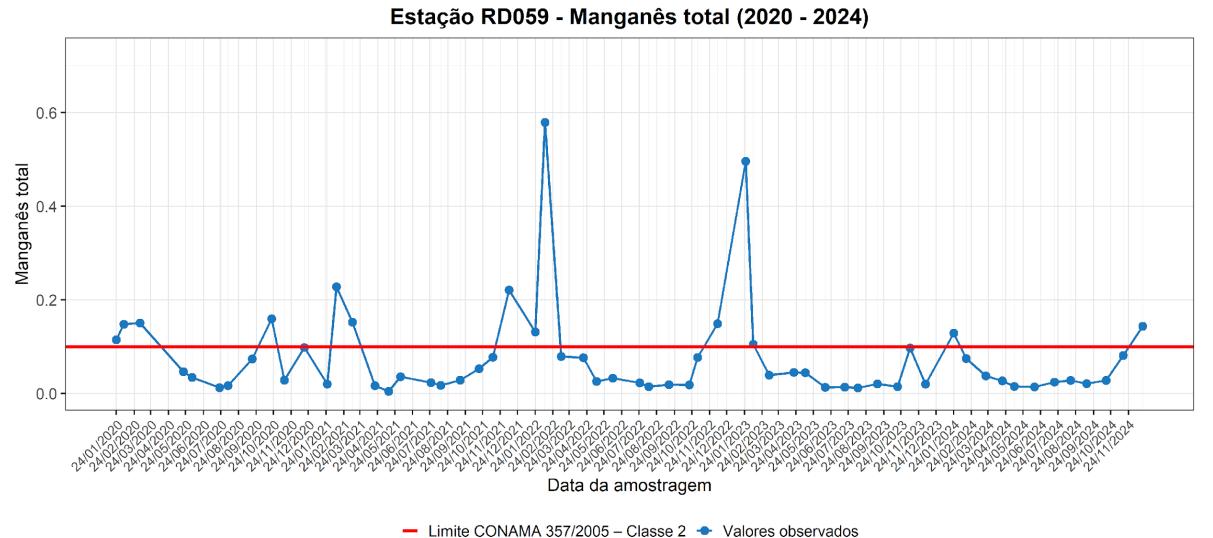
Nas Figura 5.34 e Figura 5.35, apresenta-se a série histórica das concentrações de manganês total nas estações monitoradas, comparadas ao limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005 para corpos d'água de Classe 2, permitindo avaliar a ocorrência de excedências e a conformidade ambiental ao longo do período analisado.

Figura 5.34 - Resultados do manganês total em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024)



Fonte: Autora (2025).

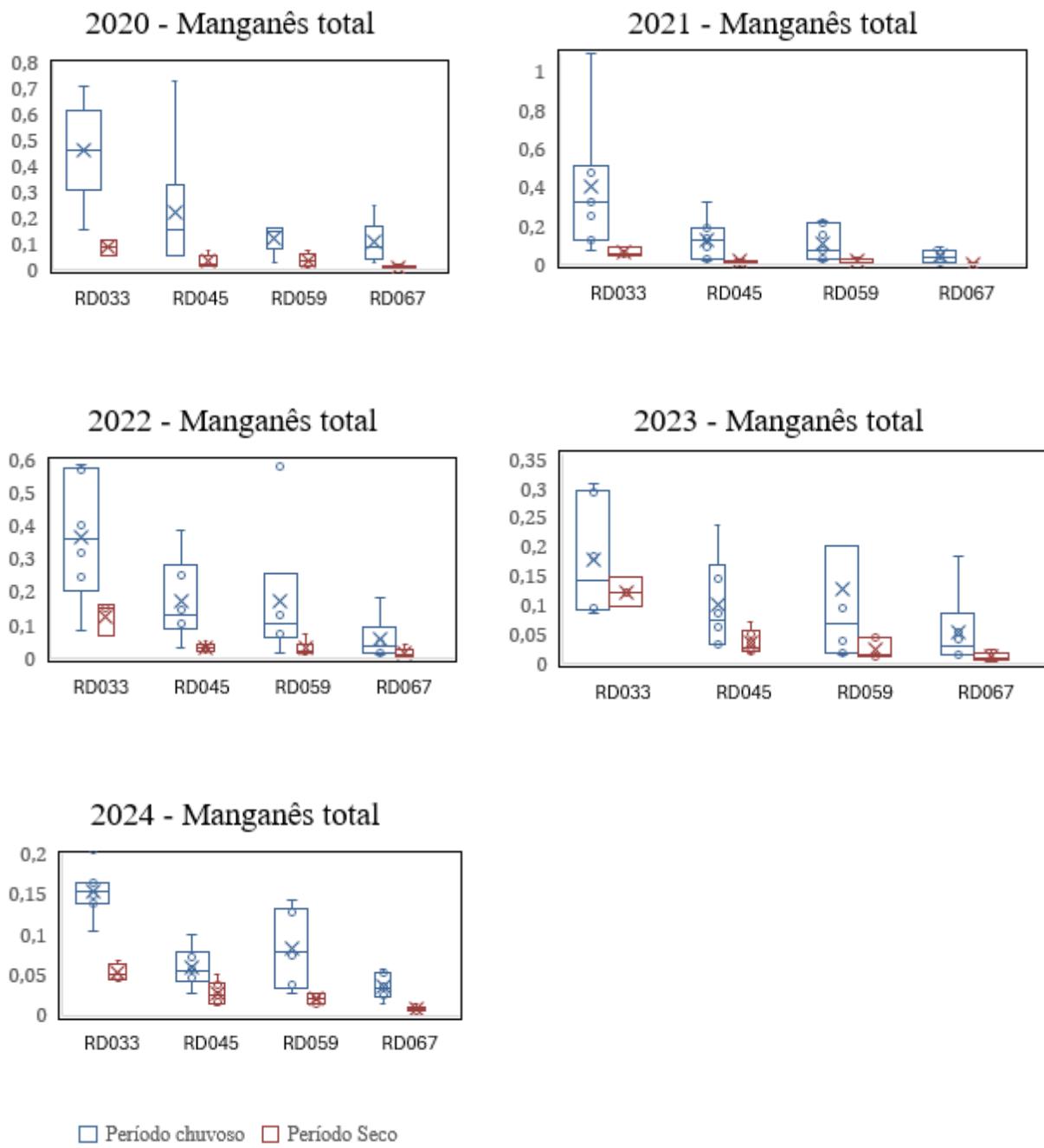
Figura 5.35 - Resultados do manganês total em Água Superficial da Estação RD059 a RD067 (2020 – 2024)



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 5.36, são apresentados os boxplots das concentrações de manganês total para as diferentes estações e períodos analisados.

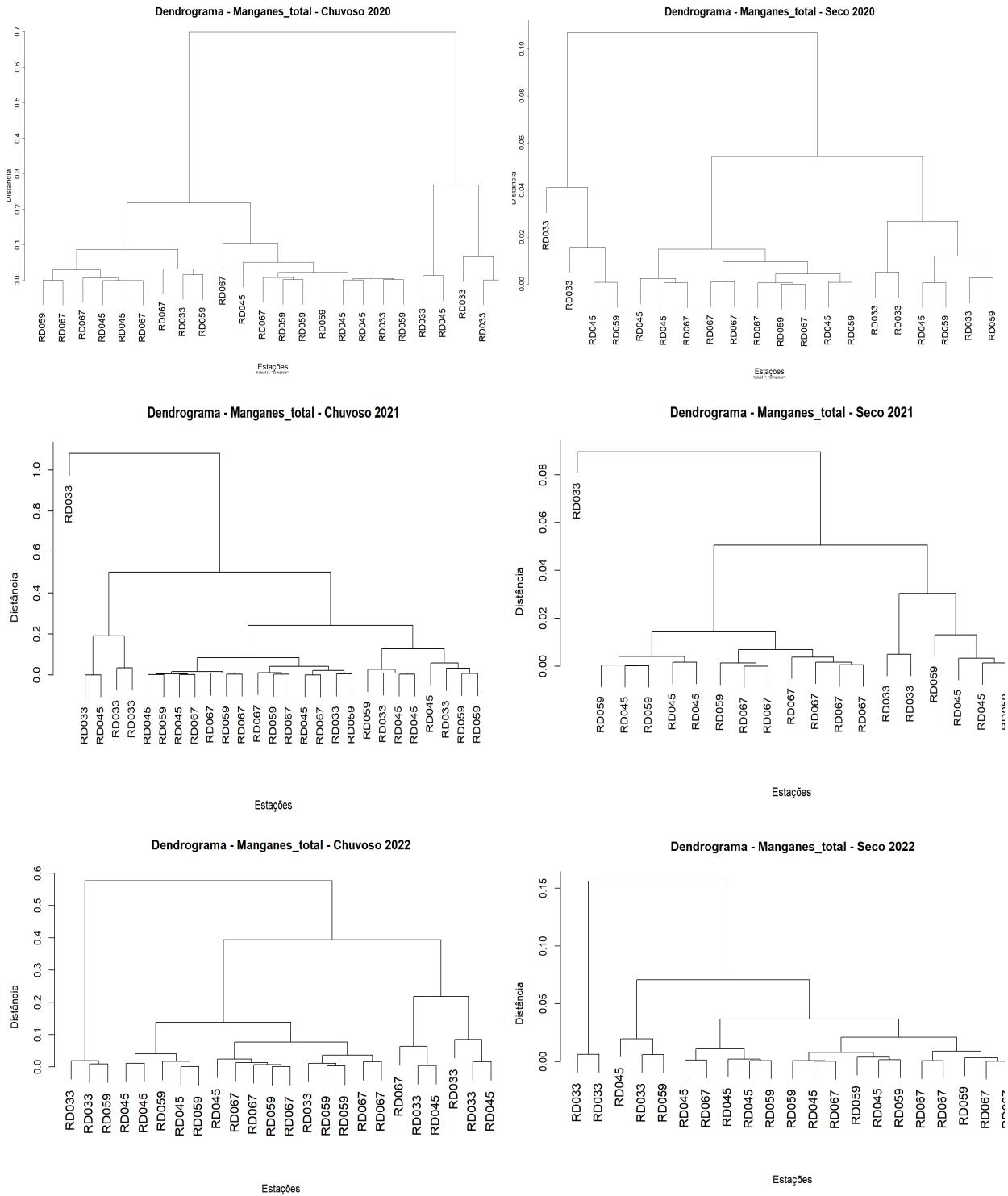
Figura 5.36 - Boxplots dos valores de manganês total em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024



Fonte: Autora (2025).

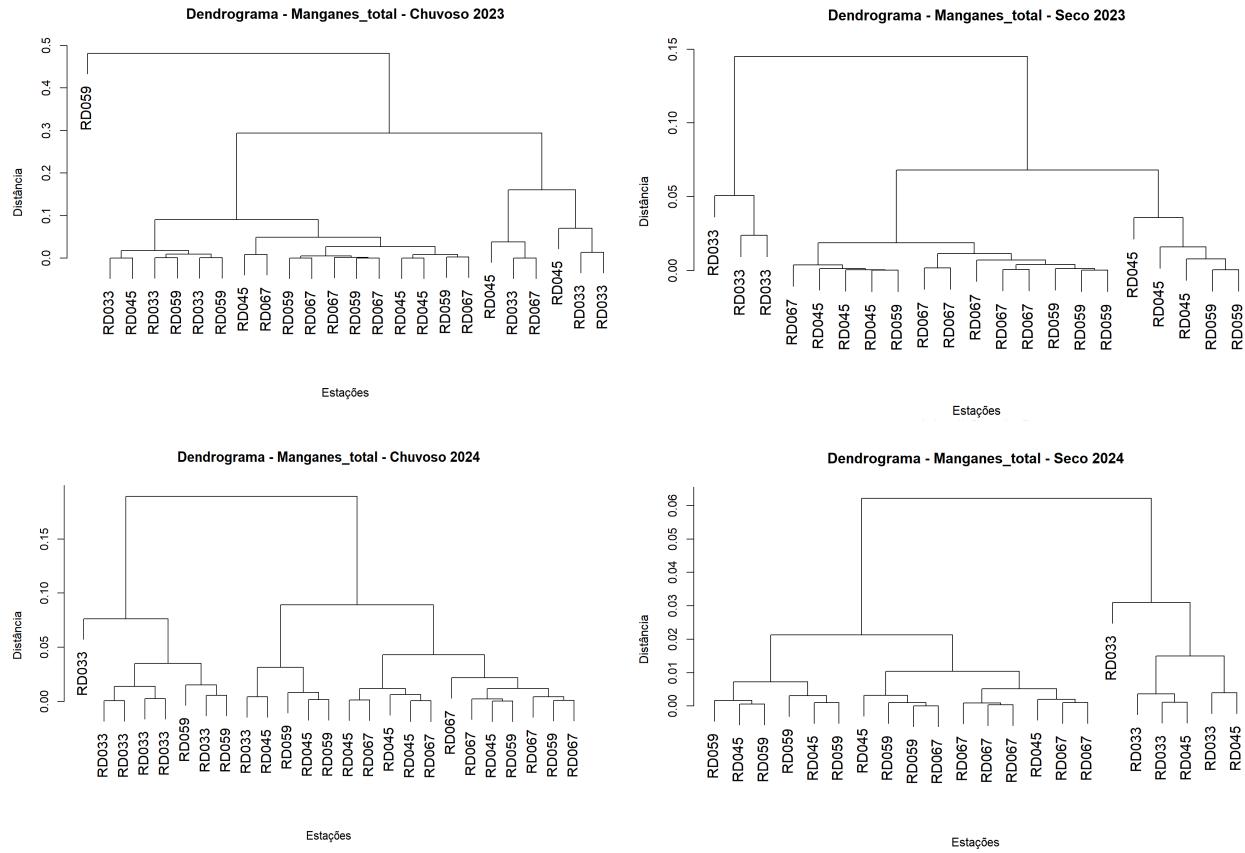
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.37 e Figura 5.38) evidenciam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de manganês total, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.37 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020, 2021 e 2023 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.38 - Dendrograma dos valores de ferro dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

A série histórica de manganês total entre 2020 e 2024 revela picos concentrados principalmente entre 2020 e 2022, seguidos de redução e maior estabilidade a partir de 2023, com valores mais próximos do limite de 0,1 mg/L da Resolução CONAMA 357/2005. RD033 e RD067 apresentam as maiores oscilações e episódios de concentração elevada, enquanto RD045 mostra comportamento intermediário e RD059 permanece como a estação mais estável e com menores valores. Os boxplots reforçam essa tendência, indicando maior variabilidade e concentrações mais altas no período chuvoso e valores mais homogêneos no período seco. Os dendrogramas mostram padrões de similaridade relativamente altos entre as estações, mas com afastamentos pontuais, especialmente de RD033 em anos chuvosos, sugerindo influência de eventos hidrológicos e possível ressuspensão de sedimentos. No conjunto, os resultados apontam para

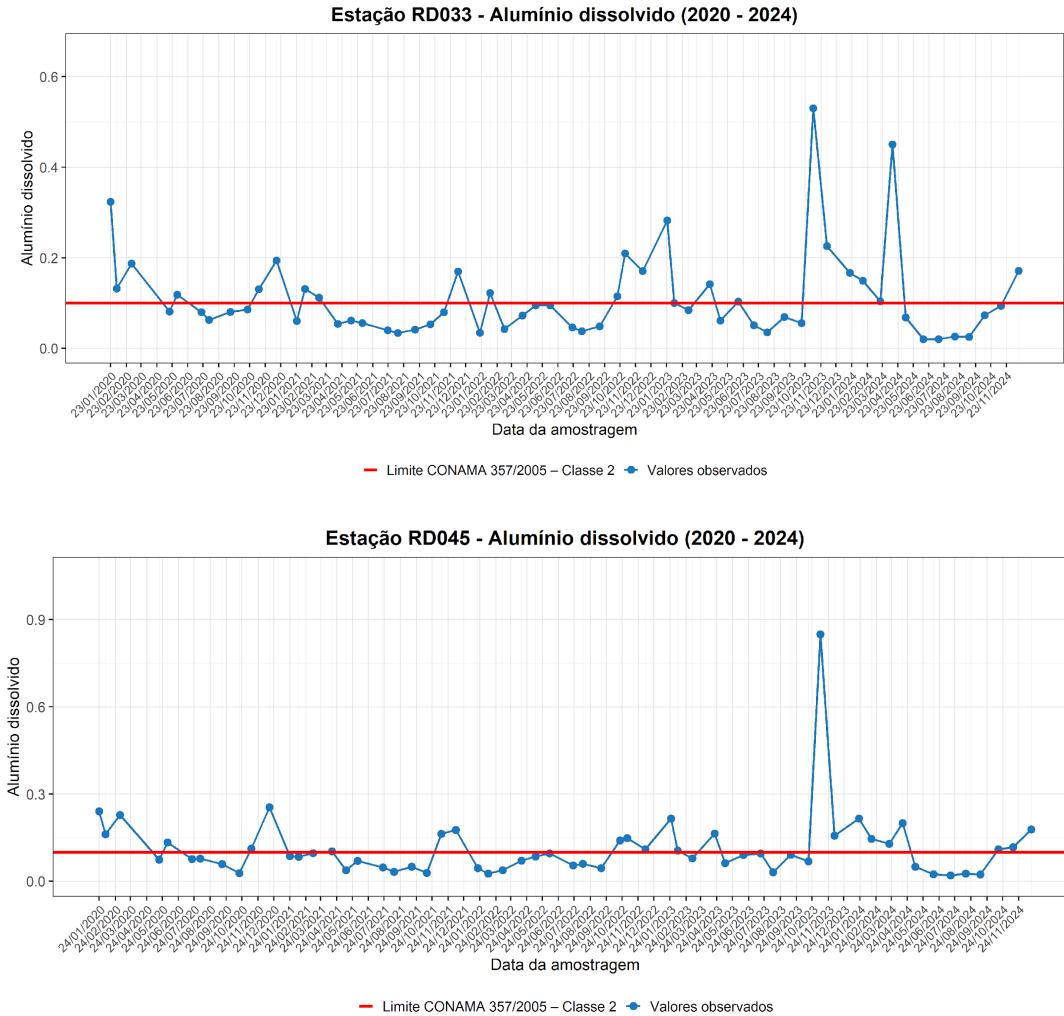
forte controle sazonal e variação espacial moderada no comportamento do manganês ao longo do rio.

5.10 Alumínio dissolvido

O alumínio dissolvido é um parâmetro essencial na avaliação da qualidade da água destinada ao abastecimento público, pois sua mobilidade e solubilidade são influenciadas por fatores como pH, acidez e matéria orgânica, podendo aumentar significativamente em ambientes impactados por atividades antrópicas, como mineração e descargas industriais (SOUZA et al., 2019). Concentrações elevadas podem comprometer processos de tratamento, especialmente a coagulação, além de representar riscos potenciais à saúde humana, particularmente em águas com baixas concentrações de sólidos e condições de pH ácido, que favorecem sua forma solúvel (GOMES; FILHO; FERNANDES, 2020).

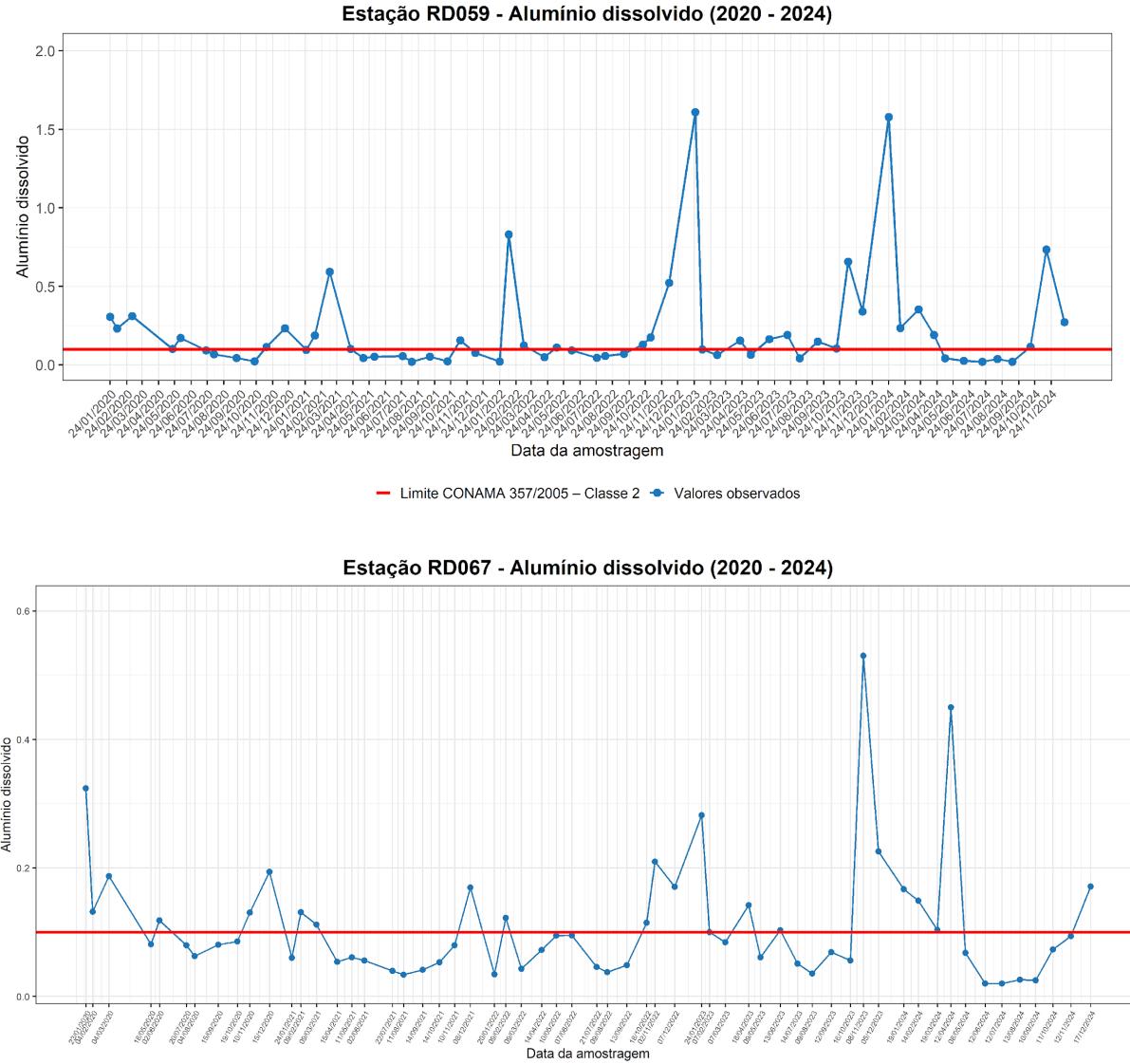
Nas Figura 5.39 e Figura 5.40 é possível se observar as séries temporais de alumínio dissolvidos das estações para o período de 2020 a 2024

Figura 5.39 - Resultados do alumínio dissolvido em Água Superficial da Estação RD033 e RD045 (2020 – 2024)



Fonte: Autora (2025).

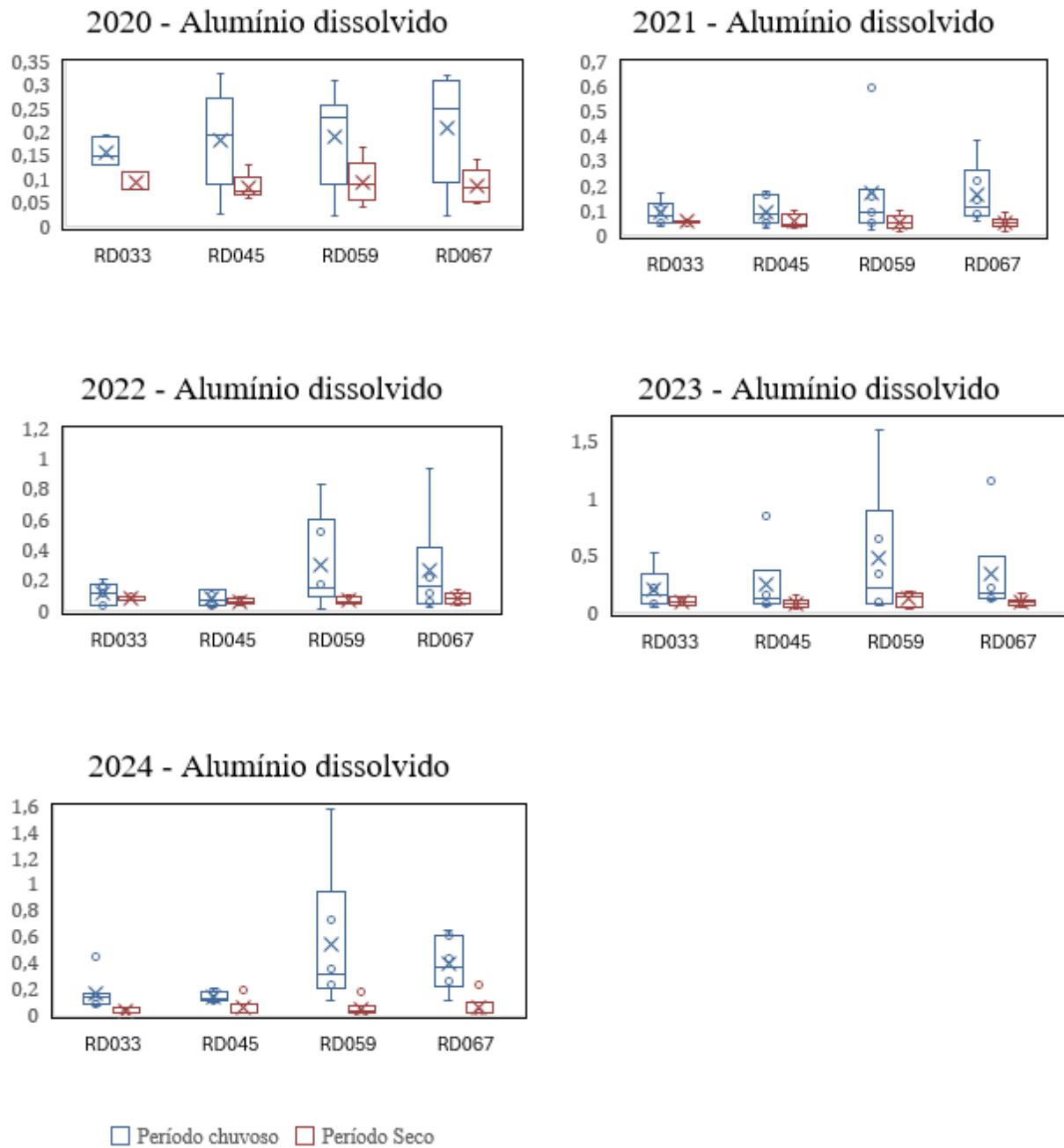
Figura 5.40 - Resultados do alumínio dissolvido em Água Superficial da Estação RD059 e RD067 (2020 – 2024)



Fonte: Autora (2025).

Na Figura 5.41, são apresentados os boxplots das concentrações de alumínio dissolvido para as diferentes estações e períodos analisados.

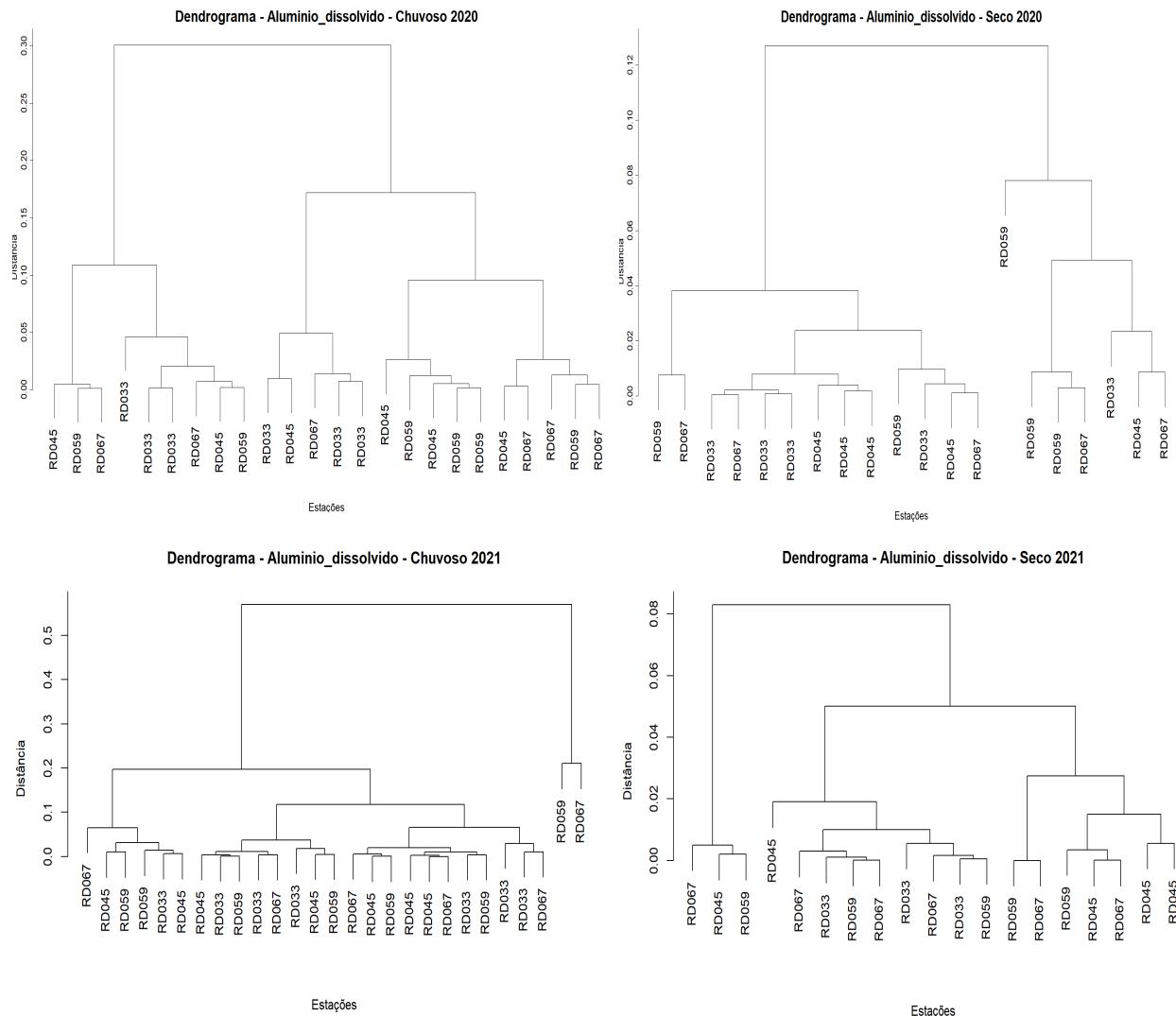
Figura 5.41 - Boxplots dos valores de alumínio dissolvido em água superficial nas estações monitoradas, considerando os períodos chuvoso e seco no intervalo de 2020 a 2024



Fonte: Autora (2025).

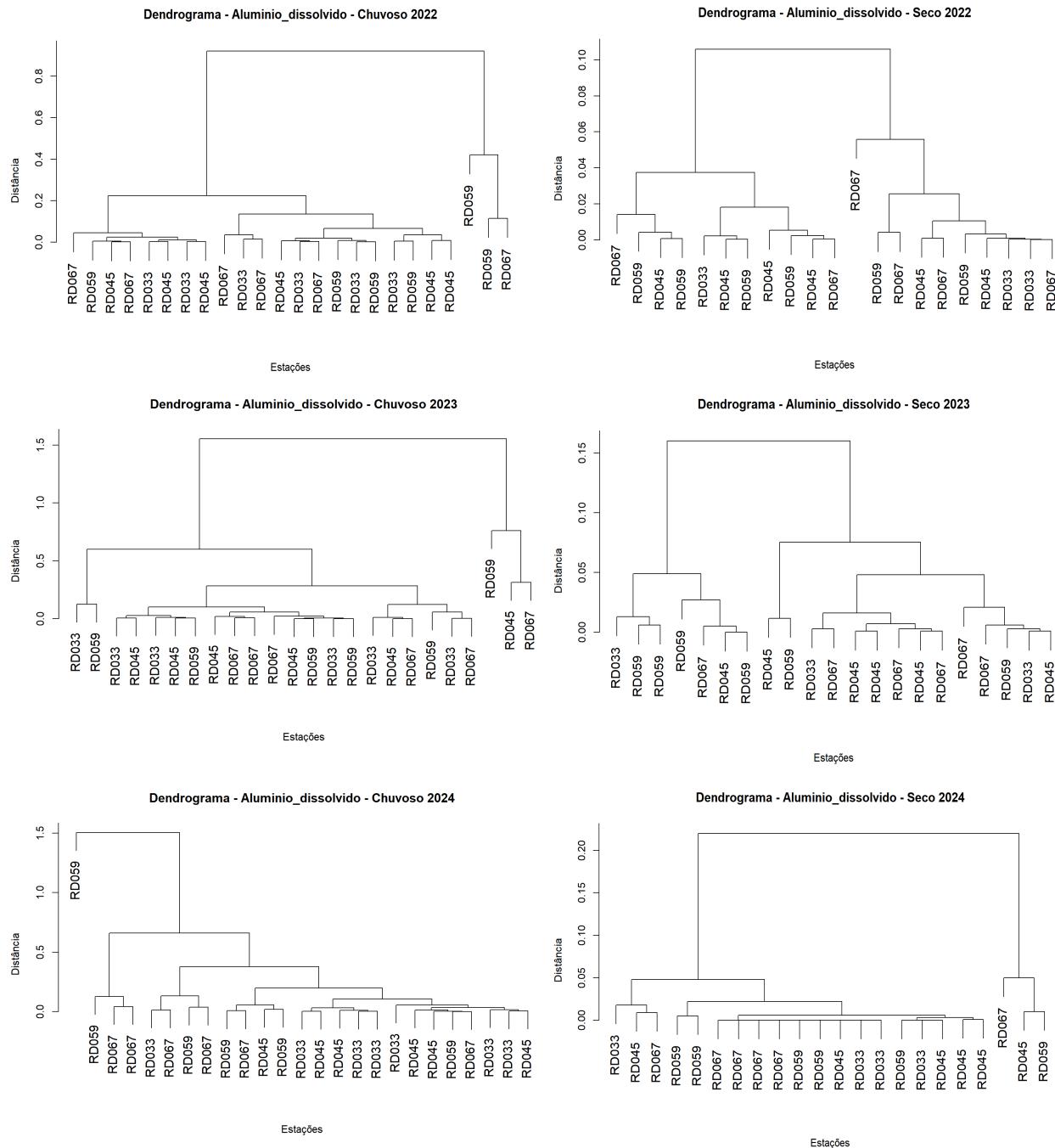
Os dendrogramas apresentados a seguir (Figura 5.42 e Figura 5.43) evidenciam os padrões de similaridade entre as estações monitoradas com base nos valores de alumínio dissolvido, analisados separadamente para os períodos chuvoso e seco.

Figura 5.42 - Dendrograma dos valores de alumínio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2020 e 2021 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Figura 5.43 - Dendrograma dos valores de alumínio dissolvido em água superficial para as estações de monitoramento (RD033, RD045, RD059 e RD067) no ano de 2022, 2023 e 2024 considerando os períodos chuvoso e seco



Fonte: Autora (2025).

Os resultados de alumínio dissolvido entre 2020 e 2024 mostram valores majoritariamente estáveis nas quatro estações, na maior parte do tempo abaixo do limite de 0,1 mg/L da Resolução CONAMA 357/2005, com aumentos pontuais entre 2022 e 2024, especialmente em RD045 e RD059. Os boxplots reforçam esse padrão, indicando concentrações mais altas e maior variabilidade no período chuvoso, associadas ao carreamento e à ressuspensão de sedimentos, enquanto no período seco os valores se mantêm mais baixos e homogêneos. A estação RD059 se destaca como a de maior sensibilidade, apresentando picos mais frequentes. Os dendrogramas mostram que RD033, RD045 e RD067 tendem a agrupar-se de forma semelhante, enquanto RD059 frequentemente aparece como mais distinta, sobretudo no período chuvoso. No conjunto, os resultados indicam influência sazonal marcada e eventuais episódios críticos, mas sem tendência de agravamento ao longo dos anos analisados.

6 CONCLUSÕES

A análise integrada dos parâmetros de qualidade da água monitorados entre 2020 e 2024 permitiu identificar padrões consistentes de variação temporal e espacial nas quatro estações avaliadas. Os dendrogramas revelaram diferenças marcantes entre períodos chuvosos e secos, indicando que a sazonalidade exerce forte influência sobre os parâmetros físico-químicos, especialmente sólidos totais, turbidez, alumínio dissolvido e manganês total. Durante o período chuvoso, observou-se maior agrupamento de estações com características semelhantes, reforçando a contribuição da precipitação na remobilização de sedimentos e no aporte de contaminantes.

Os boxplots demonstraram variações marcantes entre períodos chuvosos e secos, com maior amplitude de valores e presença de outliers associados aos metais em praticamente todas as estações. O alumínio dissolvido apresentou picos acentuados, notadamente nas estações RD045, RD059 e RD067, refletindo comportamento típico de ambientes impactados por resíduos contendo argilominerais e materiais particulados ricos em alumínio. De forma semelhante, o manganês total manteve concentrações elevadas de maneira recorrente, indicando persistência da contaminação histórica e possível liberação contínua do metal a partir dos sedimentos depositados na calha do rio. Já os parâmetros pH e oxigênio dissolvido permaneceram, em geral, dentro dos limites legais, reforçando que o principal problema está associado aos contaminantes de origem mineral.

A interpretação dos dendrogramas ao longo dos cinco anos reforça os padrões observados nos parâmetros químicos, mostrando que as estações tendem a se agrupar de maneira semelhante entre si nos anos iniciais (2020–2021), mas passam a demonstrar maior heterogeneidade a partir de 2022. Esse comportamento sugere uma dispersão espacial gradual dos contaminantes, principalmente daqueles associados aos metais presentes nos sedimentos. Os agrupamentos mais distantes observados nos períodos chuvosos indicam que o regime hidrológico tem papel fundamental na redistribuição dessas cargas poluentes, o que contribui para maior variabilidade entre os pontos de monitoramento.

De modo geral, os resultados apontam que, mesmo após vários anos do aporte inicial de contaminantes, a calha do rio ainda apresenta sinais de instabilidade química e remobilização de

metais, impedindo a plena adequação da água aos usos previstos para Classe 2, especialmente para abastecimento público com tratamento convencional, tal instabilidade pode ter relação com o carreamento do solo no período chuvoso. Conclui-se, portanto, que o monitoramento contínuo é indispensável, assim como o desenvolvimento de estratégias de gestão voltadas para redução da carga interna de sedimentos contaminados, ações de recuperação ambiental e a manutenção de restrições de uso em trechos críticos. Esses achados reforçam que a recuperação da qualidade da água é um processo lento e dependente tanto das condições hidrológicas quanto da adoção de medidas de mitigação de longo prazo.

7 RECOMENDAÇÕES

Os resultados deste estudo indicam a necessidade de fortalecer o monitoramento contínuo da qualidade da água ao longo do rio Doce, especialmente em trechos utilizados para abastecimento público, considerando que parâmetros como turbidez, sólidos totais, ferro dissolvido, manganês e alumínio ainda apresentam variações sazonais significativas associadas à mobilização de sedimentos remanescentes do desastre de Mariana. Recomenda-se ampliar a frequência das coletas, revisar procedimentos de campo e laboratório e aperfeiçoar os protocolos de monitoramento, a fim de aprimorar a interpretação das tendências reais do manancial e garantir maior segurança na avaliação da qualidade da água destinada ao consumo humano. Além disso, recomenda-se que futuras pesquisas avaliem de forma mais detalhada a influência da mobilização de sedimentos remanescentes do rompimento da barragem de Fundão, considerando seu papel na redistribuição de metais e sólidos ao longo do rio Doce. Estudos que integrem modelagem de transporte de sedimentos, dinâmica fluvial e efeitos sazonais poderão oferecer uma visão mais precisa dos mecanismos que ainda impactam a qualidade da água e apoiar estratégias de mitigação voltadas à recuperação ambiental e à proteção das captações destinadas ao abastecimento público. Por fim, recomenda-se fortalecer ações conjuntas entre órgãos ambientais, instituições de pesquisa e comitês de bacia, incentivando programas de monitoramento participativo que garantam continuidade, transparência e suporte às decisões de gestão, de forma a contribuir para a recuperação ambiental do rio Doce e para a segurança do abastecimento das populações que dependem desse manancial.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, Thiago Motta. Qualidade da água do Rio Doce em Colatina-ES após o rompimento da barragem de Fundão. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal do Espírito Santo, Colatina, 2018. Disponível em: https://repositorio.ifes.edu.br/bitstream/handle/123456789/630/TCC_Thiago_Alves.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 26 maio 2025.
- ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce. Brasília: ANA, 2001.
- BARBOSA, Sidney et al. Investigação sobre as causas do rompimento de barragens de rejeitos de mineração: Estudo de caso da barragem do Fundão, em Mariana, Minas Gerais, Brasil, com o uso da técnica Análise de Constelação. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 4, p. 2047–2068, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/374236011>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- BORGES, Ana Carolina Silva. Análise comparativa da qualidade da água na bacia do rio Doce após rompimento da barragem do Fundão. 2018. Artigo (Apresentado na Semana Acadêmica). Disponível em: https://semanaacademica.org.br/system/files/artigos/analise_comparativa_da_qualidade_da_agua_na_bacia_do_rio_doce_apos_rompimento_da_barragem_do_fundao_publicar.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 3 jul. 2025.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Diário Oficial da União, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos/consultar-resolucoes-do-conselho-nacional-do-meio-ambiente-conama>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- BUTLER, B. A. et al. Evaluating TDS & TSS in Mining Watersheds. *Environmental Health Perspectives*, v. 126, n. 9, 2018. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6020674/>. Acesso em: 28 nov. 2025.
- CBH-DOCE – COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE. Deliberação Normativa CBH-Doce nº 113, de outubro de 2023. Estabelece o enquadramento dos corpos hídricos superficiais da bacia do Rio Doce. 2023. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- CETEC – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. Diagnóstico ambiental da Bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: CETEC, 1983.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Apêndice E – Significado ambiental das variáveis de qualidade*. São Paulo: CETESB, 2018. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/12/2018/06/Apendice-E-Significado-Ambiental-das-Variaveis-de-Qualidade.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2025.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO DOCE (CBH-Doce). A bacia. Disponível em: <https://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>. Acesso em: 29 jun. 2025.

DUARTE, C. A. M. Contaminação ambiental por metais pesados. *Revista Geonorte*, v. 1, n. 1, p. 71–79, 2008.

FERREIRA, L. A. et al. Monitoramento de metais pesados na água do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão (Mariana-MG). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 26, n. 2, 2021. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/SGCv3/publicacoes/rbrh/artigo/1225>. Acesso em: 29 jun. 2025.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. Relatório de Monitoramento da Qualidade da Água – Bacia do Rio Doce. Belo Horizonte: IGAM, 2023. Disponível em: <https://www.igam.mg.gov.br/>. Acesso em: 29 jun. 2025.

ILLINOIS DEPARTMENT OF PUBLIC HEALTH. *Iron in Drinking Water*. Illinois, 2025. Disponível em: <https://dph.illinois.gov/topics-services/environmental-health-protection/private-water/fact-sheets/iron-drinking-water.html>. Acesso em: 28 nov. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. *Nota Técnica CEDEC 04/17 – Caracterização climática da Região Sudeste*. Brasília: INMET, 2017. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_tecnica_CEDEC_04_17.pdf. Acesso em: 28 nov. 2025.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS (IGAM). Encarte especial: qualidade das águas do rio Doce após 7 anos do rompimento da barragem de Fundão: 2015/2022. Belo Horizonte: IGAM, 2023. Disponível em: http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/bitstream/123456789/4388/1/Encarte_Rio_Doce_7anos_FINAL.pdf. Acesso em: 26 maio 2025.

LOPES, L. M. N. O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais. *Revista Síntese Múltipla*, PUC Minas, 2020. Disponível em: <http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla/article/view/21943>. Acesso em: 29 jun. 2025.

LUZ, A. B.; LINS, F. A. F. Uso e potencial dos rejeitos da mineração de ferro no Brasil. *Revista Escola de Minas*, Ouro Preto, v. 63, n. 3, p. 39–44, 2010.

MCCLESKEY, R. B. et al. Salinity and total dissolved solids measurements for natural waters: overview and a new method. *U.S. Geological Survey*, 2023. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/publication/70243886>. Acesso em: 28 nov. 2025.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Política Ambiental – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 01, de 05 de maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento no estado de Minas Gerais. Diário do Executivo – MG, Belo Horizonte, 06 maio 2008.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº 08, de 21 de novembro de 2022. Estabelece a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, além de condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos. Diário do Executivo – MG, Belo Horizonte, 22 nov. 2022. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521>. Acesso em: 29 jun. 2025.

MINAS GERAIS. Instituto Estadual de Florestas – IEF. Diretoria de Biodiversidade. Gerência de Projetos e Pesquisas. Boletim de Divulgação Científica, v. 2, n. 5, dez. 2009/jan. 2010. Belo Horizonte: IEF, 2010. ISSN 1983-3678.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Boletim informativo da bacia do rio Doce – 2024. Belo Horizonte: SEMAD, 2024. Disponível em: <https://meioambiente.mg.gov.br/publicacoes-doce>. Acesso em: 26 maio 2025.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. A tragédia de Mariana: impacto ambiental e responsabilidades. Belo Horizonte: MPMG, 2016.

MORAES, R. Estudo hidrográfico da bacia do Rio Doce. Vitória: Gráfica Vitória, 1974.

MUNIZ, D. H. F.; OLIVEIRA-FILHO, E. C. Toxicidade de metais pesados e seus efeitos sobre organismos aquáticos. Revista Ecotoxicologia, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 129–142, 2006.

PACHECO, A. M. F. et al. Metais pesados em ambientes afetados por mineração: impactos e implicações. Revista Acta Brasiliensis, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 204–216, 2023. Disponível em: <http://www.revistas.ufcg.edu.br/actabra/index.php/actabra/article/view/58/29>. Acesso em: 29 jun. 2025.

POLIGNANO, M.; LEMOS, S. G. Análise dos impactos físico-químicos nos rejeitos de mineração: o caso de Mariana-MG. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, São Paulo, v. 9, n. 3, p. 35–50, 2020.

POLIGNANO, M. V.; LEMOS, R. S. Rompimento da barragem da Vale em Brumadinho: impactos socioambientais na bacia do rio Paraopeba. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 72, n. 2, abr./jun. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21800/2317-66602020000200011>. Acesso em: 28 jun. 2024.

SANTOS, R. C. dos et al. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures: effects on downstream river morphology and sediment dynamics. Scientific Reports, v. 7, n. 1, p. 1–13, 2017. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-11143-x>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SILVA, Ana Paula C.; SANTOS, Giulia M.; PEREIRA, Tatiane G. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso –

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/54212/3/Impactos%20do%20rompimento%20da%20barragem%20de%20Mariana%20na%20qualidade%20da%20%C3%A1gua%20do%20rio%20Doce.pdf>. Acesso em: 26 maio 2025.

SILVA, Fabiany Cristina Magalhães e. Avaliação da qualidade da água do rio Paraopeba 5 anos após rompimento da barragem da Vale em Brumadinho, MG. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2024.

SOUZA, Percival Ignácio de et al. Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, v. 1. Consórcio Ecoplan – LUME, 2010.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Drinking Water Health Advisory for Manganese*. Washington, DC: Office of Water, Health and Ecological Criteria Division, 2004. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-09/documents/support_cc1_manganese_dwreport_0.pdf. Acesso em: 01 dez. 2025.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Iron in Drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. Geneva, 2003. Disponível em: <https://cdn.who.int/media/docs/default-source/wash-documents/wash-chemicals/iron-bd.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2025.