



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS B1 DO COMPLEXO DA
MINA Córrego do Feijão NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO
RIO PARAÓPEBA-MG

THAÍS ARYADNE NASCIMENTO ALVES

BELO HORIZONTE

2019

THAÍS ARYADNE NASCIMENTO ALVES

EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE REJEITOS B1 DO COMPLEXO DA
MINA CÓRREGO DO FEIJÃO NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO
RIO PARAÓPEBA-MG

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

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken

BELO HORIZONTE

2019

ALVES, Thaís Aryadne Nascimento.

S---

Efeitos do Rompimento da Barragem de Rejeitos B1 do Complexo da Mina Córrego do Feijão Sobre a Qualidade da Água do Rio Paraopeba-MG/ Thaís Aryadne Nascimento Alves: 2019.

112f.;--cm.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Alves Pereira Wilken

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2019.

1. Qualidade das águas. 2. Mineração de Ferro. 3. Quadrilátero Ferrífero. 4. Rio Paraopeba. I. Alves, Thaís Aryadne Nascimento. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Efeitos do Rompimento da Barragem de Rejeitos B1 do Complexo da Mina Córrego do Feijão Sobre a Qualidade da Água do Rio Paraopeba-MG.

CDD-----

THAÍS ARYADNE NASCIMENTO ALVES

EFEITOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM B1 DO COMPLEXO DA MINA
CÓRREGO DO FEIJÃO NOS PARÂMETROS DE QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO
PARAOPEBA-MG

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

Data de aprovação: 04/12/2019

Banca Examinadora:

Adriana M. Wilken

Adriana Alves Pereira Wilken – Presidente da Banca Examinadora
Profa. Doutora; Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – Orientadora.

Marília Carvalho de Melo

Marília Carvalho de Melo
Doutora; Instituto Mineiro de Gestão das Águas.

Patrícia S. Rezende

Patrícia Sueli de Rezende
Profa. Doutora; Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.

À Deus.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, a quem entrego minha vida todos os dias e quem me permitiu viver cada experiência até aqui. Sem Ele, nada disso seria possível.

Aos meus pais, Geraldo e Adriane, meu porto seguro, serei eternamente grata pelo amor e apoio em todos os momentos da minha vida. Obrigada pela confiança e carinho, vocês foram fundamentais na minha formação e sou grata a vocês por quem me tornei.

Ao meu irmão, Tharick, agradeço pelos momentos de distração e diversão, que foram de grande importância nos momentos de maior tensão.

Aos familiares e amigos agradeço pelo incentivo durante esta jornada e pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos amigos do CEFET por tornarem o caminho mais leve, compartilhando experiências, alegrias e tristezas.

Aos professores, colegas de trabalho e àqueles que de alguma forma estiveram comigo nesta caminhada, agradeço por terem colaborado com meu crescimento profissional e pessoal.

À Livia, agradeço pelo apoio indispensável para a realização das análises estatísticas.

À minha orientadora, Adriana, pelos ensinamentos e por me mostrar que o caminho da pesquisa nem sempre é fácil, mas que ao final as descobertas e aprendizados valem à pena.

RESUMO

ALVES, Thaís Aryadne Nascimento. *Efeitos do Rompimento da Barragem de Rejeitos B1 do Complexo da Mina Córrego do Feijão nos Parâmetros de Qualidade da Água do Rio Paraopeba-MG*. 2019. 112f. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Departamento de Ciência e Tecnologia Ambiental, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

Historicamente, a indústria mineradora é uma das atividades humanas mais antigas. Os recursos por ela extraídos têm contribuído significativamente, ao longo de séculos, com o desenvolvimento tecnológico e econômico de sociedades, até os dias atuais. Em contrapartida, a mineração produz grande volume de resíduos, compostos por uma mistura de água, rejeitos e produtos químicos, geralmente dispostos em sistemas de barragens. Todavia, quando tais barragens vêm à colapso, podem alterar significativamente a qualidade das águas de recursos hídricos diretamente impactados. Este trabalho visa analisar os efeitos causados pelo rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão, sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba-MG, assim como verificar o atendimento aos limites legais aplicáveis. Para tal, foram selecionadas oito estações de monitoramento de qualidade das águas monitoradas rotineiramente pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas e localizadas no rio Paraopeba, tanto à montante quanto à jusante do local de rompimento da barragem. Foram utilizadas séries históricas de monitoramento disponíveis no portal InfoHidro durante o período de 1998 a 2018. Os dados do período posterior ao rompimento da barragem foram coletados do Informativo Nº 51, publicado no portal da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. As variáveis analisadas foram as concentrações médias de: Al dissolvido, Ba total, B total, Cd total, Pb total, cianeto livre, Cu dissolvido, Cr total, fenóis totais, Fe dissolvido, Mn total, Hg total, Ni total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal total, oxigênio dissolvido, sólidos totais, e Zn total, assim como as médias de condutividade elétrica in loco, pH in loco e turbidez total. Foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados, e utilizou-se o teste de Wilcoxon pareado ($p < 0,05$) para testar o efeito do local e do período de coleta das amostras nas médias das variáveis. A análise indicou que o rompimento da barragem contribuiu para aumentar as concentrações médias de Al dissolvido, Cd total, Cu dissolvido, Pb total, Fe dissolvido, Mn total, Hg total, Ni total, sólidos totais, e Zn total, assim como valores médios de turbidez no rio Paraopeba.

Palavras-chave: Qualidade das águas, Mineração de Ferro, Quadrilátero Ferrífero, Rio Paraopeba

ABSTRACT

ALVES, Thaís Aryadne Nascimento. *Effects of the B1 Tailing Dam Rupture of the Córrego do Feijão Complex on the Water Quality Parameters of the Paraopeba River–MG*. 2019. 112p. Monograph (Undergraduate in Environmental and Sanitary Engineering) - Department of Environmental Science and Technology, Federal Center of Technological Education of Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

The mining industry is one of the oldest human activities. The resources extracted by this industry have contributed significantly, over centuries, to the technological and economic development of societies to the current days. In contrast, mining produces large volumes of waste, which is composed of a mixture of water, tailings and chemicals, which are commonly disposed in tailings dam systems. When these dams collapse, they can significantly change the quality of the directly impacted water resources. This paper aims to analyze the effects caused by the rupture of the B1 dam of the Córrego do Feijão Mine on the water quality of the Paraopeba River-MG and verify accordance with the local water quality standards. For this purpose, water-sampling data were collected from the Water Management Institute of Minas Gerais (IGAM) website, regarding to eight water quality-monitoring stations located at the Paraopeba River, for both upstream and downstream of the dam break location. For the period before the tailing dam break, it were used data collected from 1998 to 2018. For the post-dam break period, it was considered data published on the 51st Report published on the Minas Gerais State Environmental Agency. The parameters considered for this analysis were the average concentration of dissolved Al, total Ba, total B total Cr, total phenols, dissolved Fe, total Mn, total Hg, total Ni, nitrate, nitrite, total ammonia nitrogen, dissolved oxygen, total solids, and total Zn, as well as the average of on-site electrical conductivity, pH in loco and total turbidity. A descriptive statistical analysis of the data was performed, and the paired Wilcoxon test ($p < 0.05$) to test the effect of the location and period of sample collection on the average of the variables. The analysis indicated that the tailing dam breakage contributed to increase the average concentrations of dissolved Al, total Cd, dissolved Cu, total Pb, dissolved Fe, total Mn, total Hg, total Ni, and total Zn, as the turbidity average values in the Paraopeba River.

Key-words: Water Quality, Iron ore Mining, Quadrilátero Ferrífero, Paraopeba River

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Distribuição espacial das estações de monitoramento de qualidade das águas do Instituto Mineiro de Gestão das Águas a serem consideradas neste estudo.....	38
Figura 2 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Alumínio Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento selecionadas. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	46
Figura 3 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para bário total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	49
Figura 4- Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para boro total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	51
Figura 5 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para cádmio total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água	53
Figura 6 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para chumbo total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	55
Figura 7 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para cianeto livre, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	58
Figura 8 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Cobre Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	60
Figura 9 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Condutividade Elétrica in loco, em cada uma das estações de monitoramento.	63

Figura 10 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Cromo Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	65
Figura 11 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Fenóis Totais, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	67
Figura 12 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Ferro Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	70
Figura 13 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Manganês Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	73
Figura 14 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para mercúrio total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	75
Figura 15 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para níquel total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.....	78
Figura 16 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Nitrato, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	80
Figura 17 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Nitrito, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	82
Figura 18 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para nitrogênio amoniacal total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida	

vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	84
Figura 19 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para pH in loco, em cada uma das estações de monitoramento. As linhas sólidas vermelhas representam a faixa do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	89
Figura 20 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para sólidos totais, em cada uma das estações de monitoramento.	91
Figura 21 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para turbidez, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	94
Figura 22 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Zinco Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade das águas localizada à montante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 1998 a 2018 (anterior).....	41
Tabela 2 - Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 1998 a 2018 (anterior).....	42
Tabela 3- Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 2014 a 2018 (anterior).....	42
Tabela 4 - Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade das águas, localizada à montante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos ao primeiro trimestre de 2019 (posterior).	43
Tabela 5—Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos ao primeiro trimestre de 2019 (posterior).	43
Tabela 6 – Estatística descritiva dos resultados de alumínio dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2008 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	45
Tabela 7 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro alumínio dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	46
Tabela 8 – Estatística descritiva dos resultados de bário total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.....	48
Tabela 9 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro bário total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	48
Tabela 10 – Estatística descritiva dos resultados de boro total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2006 a 2013) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	50
Tabela 11– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro boro total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	50

Tabela 12 – Estatística descritiva dos resultados de cádmio total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	52
Tabela 13 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro cádmio total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	52
Tabela 14 – Estatística descritiva dos resultados de chumbo total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	54
Tabela 15 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro chumbo total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	55
Tabela 16 – Estatística descritiva dos resultados de cianeto livre nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2010 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	57
Tabela 17 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Cianeto Livre, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	57
Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de cobre dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2006 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	59
Tabela 19 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Cobre Dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	60
Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de condutividade elétrica in loco nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	61
Tabela 21 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Condutividade Elétrica in loco, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	62
Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de cromo total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	64
Tabela 23 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro cromo total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	64
Tabela 24 – Estatística descritiva dos resultados de fenóis totais nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	66

Tabela 25 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro fenóis totais, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	67
Tabela 26 – Estatística descritiva dos resultados de ferro dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	69
Tabela 27 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro ferro dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	69
Tabela 28 – Estatística descritiva dos resultados de manganês total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	72
Tabela 29 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro manganês total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	72
Tabela 30 – Estatística descritiva dos resultados de mercúrio total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	74
Tabela 31 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro mercúrio total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	75
Tabela 32 – Estatística descritiva dos resultados de níquel total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	77
Tabela 33– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro níquel total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	77
Tabela 34 – Estatística descritiva dos resultados de nitrato nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.....	79
Tabela 35 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Nitrato, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	79
Tabela 36 – Estatística descritiva dos resultados de nitrito nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.....	81
Tabela 37 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro nitrito, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	81

Tabela 38 – Estatística descritiva dos resultados de nitrogênio amoniacal total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	83
Tabela 39 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro nitrogênio amoniacal total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	84
Tabela 40 – Estatística descritiva dos resultados de oxigênio dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2017) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	86
Tabela 41 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro oxigênio dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	86
Tabela 42 – Estatística descritiva dos resultados de pH in loco nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	88
Tabela 43– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro pH in loco, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	89
Tabela 44 – Estatística descritiva dos resultados de sólidos totais nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	90
Tabela 45– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Sólidos Totais, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	91
Tabela 46 – Estatística descritiva dos resultados de turbidez nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	93
Tabela 47 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Turbidez, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	93
Tabela 48 – Estatística descritiva dos resultados de zinco total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.	96
Tabela 49 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Zinco Total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação das águas doces, em território nacional, quanto à qualidade requerida para seus usos preponderantes, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005	23
Quadro 2 – Descrição das estações de monitoramento de qualidade das águas do IGAM a serem consideradas neste estudo.....	38
Quadro 3 – Descrição dos cenários analisados neste estudo.....	39

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CERH - Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais

CETEC - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM - Conselho Estadual de Política Ambiental

DN - Deliberação Normativa

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia Estatística

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

MG – Minas Gerais

OD - Oxigênio Dissolvido

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

SST - Sólidos Suspensos Totais

ST – Sólidos Totais

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	OBJETIVOS	21
2.1.	Objetivo Geral	21
2.2.	Objetivos Específicos	21
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
3.1.	Qualidade das Águas	22
3.1.1.	Potencial Hidrogeniônico (pH).....	24
3.1.2	Sólidos Totais e Turbidez	24
3.1.3	Bário	25
3.1.4	Boro	25
3.1.5	Condutividade elétrica.....	25
3.1.6	Cianeto livre	26
3.1.7	Nitrato e Nitrito	26
3.1.8	Nitrogênio amoniacal	26
3.1.9	Metais	27
3.2.	Efeitos do rompimento de barragens sobre a qualidade das águas superficiais	29
4.	METODOLOGIA.....	34
4.1.	Área de Estudo	34
4.2.	Coleta de Dados.....	35
4.3.	Análise estatística dos dados	39
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
5.1.	Alumínio Dissolvido	44
5.2.	Bário Total.....	47
5.3.	Boro Total.....	49
5.4.	Cádmio Total	51
5.5.	Chumbo Total	53
5.6.	Cianeto Livre	56
5.7.	Cobre Dissolvido	58
5.8.	Condutividade Elétrica in loco	61
5.9.	Cromo Total.....	63
5.10.	Fenóis Totais	65
5.11.	Ferro Dissolvido	67
5.12.	Manganês Total	70
5.13.	Mercúrio Total.....	73

5.14. Níquel Total.....	76
5.15. Nitrato.....	78
5.16. Nitrito	80
5.17. Nitrogênio Amoniacal Total.....	82
5.18. Oxigênio Dissolvido.....	85
5.19. pH in loco	87
5.20. Sólidos Totais	89
5.21. Turbidez.....	92
5.22. Zinco Total	95
5.23. Análise Geral	97
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	100
7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	101
REFERÊNCIAS	102

1. INTRODUÇÃO

A população mundial está em constante crescimento, demandando, consequentemente, por mais avanços tecnológicos e econômicos. Sabe-se que, historicamente, a indústria mineradora é uma das atividades humanas mais antigas, e que os recursos por ela extraídos têm contribuído significativamente, ao longo de séculos, com o desenvolvimento tecnológico e econômico de sociedades, até os dias atuais (DUBIŃSKI, 2013). Por outro lado, à medida que a demanda e o consumo dos recursos naturais aumentam e os teores de minério puro diminuem, os projetos de mineração são pressionados a ampliar sua escala, e, consequentemente, as áreas de impacto potencial, fazendo com que os volumes de resíduos acompanhem este crescimento (SEGURA-SALAZAR e TAVARES, 2018).

Segundo Kossoff et al. (2014) a mineração produz grande volume de resíduos, em sua maior parte rejeitos, os quais são frequentemente armazenados em sistemas de barragens. Estes resíduos são compostos por uma mistura de água, rejeitos e produtos químicos que, caso a barragem venha a colapso, podem causar danos significativos para a saúde humana e de animais, assim como para a qualidade de ecossistemas (BURRITT e CHRIST, 2018). Macklin et al. (2003) ressaltam que a poluição de rios oriunda de rompimentos de barragens catastróficos resulta de grandes volumes de líquidos e lama contaminados e da rapidez na qual estes resíduos são liberados nos sistemas fluviais. Neste sentido, percebe-se um aumento da pressão sobre as companhias de mineração para encontrarem métodos alternativos e mais seguros para armazenarem os rejeitos das atividades minerárias (MACKLIN et al., 2003), e da necessidade de se conhecer os impactos resultantes desta atividade com vistas a propor medidas de mitigação e recuperação para os locais de influência direta da indústria minerária.

No dia 25 de janeiro de 2019 ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos B1 do complexo da Mina Córrego do Feijão, localizada no município de Brumadinho, Minas Gerais. Durante o acidente, cerca de 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos foram liberados no meio ambiente, causando impactos ambientais, sociais e perdas humanas. Sobre a qualidade das águas, a lama de rejeitos afetou diretamente o ribeirão Ferro-Carvão, chegando a desaguar no rio Paraopeba. Estima-se que a onda de rejeitos percorreu cerca de 9 km em apenas quatro dias após o desastre, espalhando-se por uma área de aproximadamente 290 hectares, sobre os quais os impactos ambientais ainda não foram completamente mensurados (SEMAD, 2019). Diversos pesquisadores estudaram os efeitos das atividades rotineiras de mineração de ferro sobre a qualidade das águas superficiais (FERNANDES et al., 2016; CARMO et al., 2017;

COSTA et al., 2018a; DIAS et al., 2018; SANTOS et al., 2019). Apesar de alguns estudos científicos reportarem os impactos causados por rompimento de barragens (SANTOS et al., 2019; KOSSOFF et al., 2014; STEFANIAK e WRÓŻYŃSKA, 2017; CARMO et al., 2017; ARAUJO et al., 2014; FREITAS et al., 2019), poucos estudos abordaram os impactos sobre a qualidade das águas após o evento mais recente, ocorrido no município de Brumadinho. Neste contexto, o presente trabalho visou analisar os efeitos causados pelo rompimento da barragem B1 da Mina do Córrego do Feijão sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba, além de verificar o atendimento dos parâmetros de qualidade aos limites legais aplicáveis.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar os efeitos causados pelo rompimento da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão sobre a qualidade das águas do rio Paraopeba.

2.2. Objetivos Específicos

- Avaliar a variabilidade temporal e espacial dos parâmetros físicos e químicos de qualidade da água do rio Paraopeba, antes e após o rompimento da barragem B1 da Mina Córrego do Feijão;
- Identificar os parâmetros de qualidade da água influenciados pela presença da lama de rejeitos no rio Paraopeba;
- Verificar o atendimento dos parâmetros de qualidade da água aos limites legais aplicáveis.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Qualidade das Águas

De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 1996), “Qualidade da Água” é um termo usado para expressar a capacidade da água em manter seus múltiplos usos ou processos. Levando-se em consideração que a deterioração da qualidade das águas não deve afetar a saúde e o bem-estar humano, assim como o equilíbrio do ecossistema aquático, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), baseando-se na necessidade da criação de instrumentos para a avaliação da evolução da qualidade das águas, elaborou a Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005 (BRASIL, 2005). Esta resolução, alterada e complementada pelas Resoluções CONAMA nº 410, de 04 de maio de 2009, e nº 430, de 13 de maio de 2011, dispõe sobre a classificação dos corpos d’água em território nacional e estabelece diretrizes ambientais para o seu enquadramento (BRASIL, 2009; BRASIL, 2011).

Para efeitos da Resolução CONAMA nº 357/2005, os corpos d’água são classificados em três categorias quanto à salinidade: são consideradas águas doces aquelas com salinidade igual ou inferior à 0,5%; as águas salobras são aquelas cuja salinidade é superior à 0,5% e inferior à 30%; enquanto as águas salinas são as que possuem salinidade igual ou superior à 30%. Segundo o Art. 3º da referida legislação, as águas doces, salobras e salinas são classificadas em treze classes, de acordo com a qualidade requerida para seus usos preponderantes. As águas doces, por sua vez, são classificadas em 5 classes, conforme visto no Quadro 1.

Para cada classe, de acordo com seus usos preponderantes, a referida legislação estabelece condições e padrões de qualidade expressados pelo limite máximo permitido para cada substância, sejam elas variáveis descritivas, como óleos e graxas, substâncias que propiciam sabor ou odor, materiais flutuantes não naturais, corantes advindos de fontes antrópicas, resíduos sólidos e toxicidade ou; quantitativas, como potencial hidrogeniônico, oxigênio dissolvido (OD), substâncias orgânicas, metais dissolvidos e totais, teor de clorofila, densidade de cianobactérias, dentre outras (BRASIL, 2005; CETESB, 2018).

Quadro 1 – Classificação das águas doces, em território nacional, quanto à qualidade requerida para seus usos preponderantes, de acordo com a Resolução CONAMA nº 357/2005

Classe	Uso preponderante
Classe especial	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção
	Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas
	Preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação e de proteção integral
Classe 1	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado
	Proteção das comunidades aquáticas
	Recreação de contato primário, como natação, esqui aquático e mergulho
	Irrigação de hortaliças e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película
	Proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas
Classe 2	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional
	Proteção de comunidades aquáticas
	Recreação de contato primário, como natação, esqui aquático e mergulho
	Irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público tenha contato direto
	Aquicultura e à atividade de pesca
Classe 3	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado
	Irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras
	Pesca amadora
	Recreação de contato secundário
	Dessedentação de animais
Classe 4	Navegação
	Harmonia Paisagística

Em âmbito estadual, a classificação dos corpos d'água, as diretrizes ambientais para seu enquadramento e os padrões de qualidade são estabelecidos pela Deliberação Normativa (DN) conjunta elaborada pelo Conselho Estadual de Política Ambiental (COPAM) e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais (CERH) nº 1, de 05 de maio de 2008 (MINAS GERAIS, 2008). Tal legislação considera a classificação das águas como de extrema importância para a manutenção de seus níveis de qualidade, os quais são avaliados por meio de condições e padrões específicos, para assegurar seus usos preponderantes e a qualidade ambiental requerida para o corpo d'água em questão.

São considerados como parâmetros de qualidade da água as substâncias (ou outros indicadores) que são representativos da qualidade da água, sendo eles físicos, químicos ou

biológicos. Já o padrão refere-se ao valor limite adotado como requisito normativo de determinado parâmetro de qualidade da água (MINAS GERAIS, 2008). Estes padrões definem limites individuais para cada parâmetro, em cada uma das cinco classes de qualidade.

Na sequência são apresentados detalhes a respeito dos parâmetros de qualidade das águas abordados neste trabalho.

3.1.1. Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH indica a intensidade das condições de acidez, alcalinidade ou neutralidade do ambiente aquático, através da concentração de íons H^+ numa determinada amostra de água (LIBÂNIO, 2010; VON SPERLING, 2014). Segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2010), o pH afeta o metabolismo de diversas espécies aquáticas e pode intensificar o efeito de substâncias químicas potencialmente tóxicas para os organismos aquáticos, como os metais tóxicos, por exemplo. Por influenciar no grau de solubilidade de diversas substâncias, como consequência, as variações de pH podem ocasionar a dissolução de rochas, absorção e gases atmosféricos, oxidação da matéria orgânica e fotossíntese, além da intensidade da cor de corpos d'água, distribuição das formas livre e ionizada de diversos compostos químicos, o que irá definir o potencial de toxicidade de vários elementos (PEREIRA, 2004; LIBÂNIO, 2010). Tais consequências podem ser observadas principalmente durante o período chuvoso, como efeito resultante de chuvas ácidas.

3.1.2 Sólidos Totais e Turbidez

Os Sólidos Totais abrangem a concentração de todos os sólidos presentes na amostra de água, sejam eles suspensos ou dissolvidos (LIBÂNIO, 2010).

Os sólidos dissolvidos representam uma medida dos de substâncias ou íons dissolvidos na água do corpo d'água, incluindo sais, material orgânico dissolvido, e outros nutrientes. Para manter a vida aquática, é necessário um nível constante de minerais na água, uma vez que concentrações de sólidos dissolvidos muito elevadas ou muito baixas podem limitar o crescimento e levar muitas vidas aquáticas à morte (VASCONCELOS et al., 2009).

A concentração de sólidos suspensos totais (SST) é um parâmetro importante para a análise da qualidade da água pois este tipo de sólidos são bons indicadores de degradação da água. Altas concentrações de SST na água pode levar a uma redução das atividades fotossintéticas, devido ao impedimento da passagem dos raios solares e ao transporte de poluentes como o fósforo, mercúrio e componentes orgânicos hidrofóbicos (OLIVEIRA et al., 2018).

A turbidez, por sua vez, é a medida do grau de dispersão de feixe de luz ao atravessar uma coluna de água devido à presença de partículas suspensas (VASCONCELOS et al., 2009).

Von Sperling (2014) ressalta que, quando de origem natural, a turbidez não apresenta inconvenientes sanitários diretos, exceto um desconforto estético causado na água, e que os sólidos em suspensão podem ser utilizados como abrigo por microrganismos patogênicos. As fontes de turbidez de origem natural incluem partículas de rocha, argila e silte, algas e outros microrganismos; quando de origem antropogênica, a turbidez pode estar associada a compostos tóxicos e organismos patogênicos, e suas fontes podem ser despejos domésticos e industriais, microrganismos ou erosão (VON SPERLING, 2014).

3.1.3 Bário

Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2017), a principal fonte de obtenção do bário são rochas ígneas e sedimentares, e ele ocorre naturalmente na maioria das águas superficiais. Este elemento é comumente utilizado na indústria de óleo e gás para fazer lama de sondagem, utilizada para facilitar a perfuração em rochas, uma vez que mantém a sonda lubrificada (ATSDR, 2013). A ingestão de pequenas quantidades de bário pode provocar vômito, cólica estomacal, diarreia, dificuldade respiratória, alteração da pressão sanguínea, adormecimento da face e debilidade muscular; em altas quantidades pode causar alterações do ritmo cardíaco, paralisia e levar a óbito caso não haja tratamento adequado. (ATSDR, 2013; CETESB, 2017).

3.1.4 Boro

O boro é um elemento que é liberado para o ambiente por fontes naturais, como oceanos e vulcões, é frequentemente utilizado na produção de vidro, nos retardatários de incêndios, cosméticos, materiais fotográficos, sabão e detergentes, dentre outros. A exposição prolongada ao elemento pode afetar o estômago, intestino, fígado, rins, cérebro e, eventualmente, levar a óbito (ATSDR, 2007).

3.1.5 Condutividade elétrica

A condutividade refere-se à capacidade da água de conduzir corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas que se dissociam, usualmente íons de ferro e manganês, potássio, cloro, sódio, cálcio e magnésio, dependendo da concentração dos íons (ânions e cátions) presentes na solução e da temperatura (LIBÂNIO, 2010; EMBRAPA, 2001). A condutividade também pode ser utilizada para a determinação de sólidos dissolvidos totais (EMBRAPA, 2001).

3.1.6 Cianeto livre

Processos industriais como extração hidrometalúrgica do ouro, flotação de sulfetos e galvanoplastias utilizam os compostos de cianeto como reagentes para sua realização, ademais, a mineração do ouro também pode gerar grandes volumes de solução contendo cianeto (GRANATO, 1995).

O Cianeto, gás incolor, miscível em água, com dispersão rápida e odor similar ao de amêndoas amargas, é nocivo ao homem pois a exposição a altos níveis de cianeto por curtos períodos de tempo pode afetar o cérebro e o coração e pode até causar coma e morte (ATSDR, 2006).

3.1.7 Nitrato e Nitrito

O nitrogênio é o gás mais abundante na atmosfera terrestre, podendo ser encontrado nos corpos d'água de acordo com seu estado de oxidação, nas formas de oxigênio orgânico dissolvido, nitrogênio molecular, nitrogênio amoniacal, gás amônia e íon amônio, nitrito e nitrato (LIBÂNIO, 2010). O ciclo do nitrogênio, resumidamente ocorre através dos processos de nitrificação e denitrificação, realizado por bactérias. Na nitrificação ocorre sucessiva oxidação do gás amônia a nitrito e posteriormente a nitrato, o que é realizado em condições aeróbias por bactérias do gênero *Nitrossomonas*, enquanto os processos de denitrificação ocorrem quando há uma redução do nitrato a nitrogênio gasoso, em condições anóxicas (ausência de oxigênio livre), realizado por bactérias do gênero *Nitrobacter* (LIBÂNIO, 2010).

No ambiente aquático, baixas concentrações de oxigênio podem levar à redução do nitrato, elevando os níveis de nitrito, o que pode resultar em grande atividade bacteriana e deficiência de oxigênio (PEREIRA, 2004). A ingestão aguda de nitrito pode agir sobre a hemoglobina, originando a metahemoglobina, a qual impede sua função de transportar o oxigênio. Condições ácidas do estômago promovem a redução do nitrato a nitrito, favorecendo, então a produção da metahemoglobina (MELO FILHO et al., 2004).

3.1.8 Nitrogênio amoniacal

O nitrogênio amoniacal compreende o íon amônio e amônia dissolvidos, cujas proporções dependem da temperatura, salinidade e do pH (BARBIERI et al., 2014). A presença da amônia no ecossistema aquático dá-se de forma natural como produto da degradação de compostos orgânicos e inorgânicos do solo e da água, como resultado da excreção da biota, da redução do nitrogênio gasoso através de microrganismos e por meio de trocas gasosas com a

atmosfera (REIS & MENDONÇA, 2009). Apesar de não ser a forma de nitrogênio mais tóxica, elevadas concentrações do íon amônio podem se elevar dependendo dos níveis de pH e temperatura, sem que sua toxicidade seja crítica. Geralmente é encontrado em ambientes anóxicos, nos quais ocorre uma intensa mineralização anaeróbica da matéria orgânica (PEREIRA, 2004).

3.1.9 Metais

Quanto aos demais metais, sua toxicidade depende da sua dosagem ou tempo de exposição, da forma física e química, da via de administração e do tipo de interação realizada com o organismo (DIAS et al., 2018).

A preocupação com a presença de metais no sistema aquático é a bioacumulação, e consequente biomagnificação, destes pela flora e fauna aquática e, consequentemente, o homem, uma vez que possuem o potencial de produzir efeitos letais, devido a disfunções metabólicas (PEREIRA, 2004).

- a) Alumínio: de acordo com a Associação Europeia do Alumínio - European Aluminium Association (2011a), este é o metal mais comum do mundo, constituindo aproximadamente 8% da crosta terrestre, presente também tanto na água de superfície quanto subterrânea. O alumínio também é utilizado como agente floculante no tratamento de água (EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2011b). Esta mesma associação afirma que não existe um papel biológico conhecido para o alumínio, que o corpo humano contém, em média, de 35 mg a 50 mg de alumínio e há barreiras eficazes para evitarem a absorção do elemento no organismo. Dias et al. (2018), por sua vez, ressaltam que níveis excessivos de absorção de alumínio podem torná-lo nocivo ao sistema nervoso central.
- b) Cádmio: o cádmio é um elemento natural da crosta terrestre, geralmente encontrado como um mineral associado com outros elementos como oxigênio (óxido de cádmio), cloro (cloreto de cádmio), ou enxofre (sulfeto/ sulfato de cádmio) (ATSDR, 2012b). A exposição ao cádmio pode provocar danos severos ao pulmão, além de causar sintomas similares aos de envenenamento por alimentos, devido à sua interferência no sistema respiratório (ATSDR, 2012b; DIAS et al., 2018). Pereira (2004) resalta que o acúmulo de cádmio em solos na vizinhança de minas e fundições podem suceder em altas concentrações deste elemento em corpos d'água próximos.

- c) Cobre: apesar de desempenhar papel importante na biota aquática, como integrante da clorofila, por exemplo, este elemento tem a capacidade de biocumular-se em determinados tecidos, magnificando suas concentrações ao longo da cadeia trófica, o que o torna uma ameaça para a biota aquática, quando presente em elevadas concentrações (LIBÂNIO, 2010). Efeitos do cobre nocivos à saúde humana incluem redução de vitaminas A e C, alterações metabólicas, esgotamento do zinco, disfunção intestinal para curtas exposições e danos aos rins e fígado para exposições prolongadas (LIBÂNIO, 2010; DIAS et al., 2018).
- d) Cromo: o cromo é um metal naturalmente encontrado em rochas, animais, plantas e solo, existente em diferentes formas – sólida, líquida ou gasosa (ATSDR, 2012a). Extremamente tóxico na sua forma hexavalente, o qual é lançado no meio aquático, dentre outras origens, do tratamento de minerais (PEREIRA, 2004; ATSDR, 2012a). A exposição a altas concentrações deste elemento na forma hexavalente pode ocasionar anemia, danos ao estômago ou intestino, e até óbito por lesão em múltiplos órgãos (ATSDR, 2012a; DIAS et al., 2018).
- e) Chumbo: o chumbo é considerado um elemento-traço perigoso em sua forma dissolvida, uma vez que nesta forma encontra-se disponível para ser assimilado pela biota aquática, podendo atingir concentrações 1400 vezes superiores às encontradas na água (PEREIRA, 2004). Segundo Libânio (2010), a ocorrência de chumbo em águas, ainda que com menor frequência, também pode ocorrer através da corrosão de tubulações mais antigas, soldadas por este metal. Sintomas da contaminação por chumbo estão relacionados principalmente aos sistemas nervoso e hepático, podendo incluir efeitos renais, cardiovasculares e na reprodução (MOREIRA & MOREIRA, 2004).
- f) Ferro: Dias et al. (2018) dizem que a utilização mais frequente do elemento é na obtenção do aço, como catalisador de processos químicos, e na fabricação de produtos diversos. Picanço et al. (2002) esclarecem que, apesar de ser encontrado em todas as águas, teores elevados de ferro tendem a reduzir a aceitação da população, uma vez que podem causar manchas nas roupas e pisos, além de

alterarem cor, sabor e odor dessas águas. O excesso de ferro no organismo pode ocasionar depósito nos tecidos (Hemocromatose) (PICANÇO et al., 2002).

- g) Mercúrio: no meio ambiente aquático, o mercúrio possui o potencial de reduzir a fotossíntese do fitoplâncton e, pode associar-se com sulfetos e apresentar-se como precipitado, enriquecendo o sedimento através da formação de moléculas de baixa solubilidade (PEREIRA, 2004; LIBÂNIO, 2010). Segundo a Secretaria de Estado de Saúde de São Paulo (2010), a ação tóxica do mercúrio em doses elevadas pode ser fatal ao homem e, a intoxicação por doses baixas pode ocasionar danos graves ao sistema neurológico, cardiovascular, imunológico e reprodutivo.
- h) Níquel: o níquel é um metal traço encontrado em depósitos naturais ou resultante da fabricação de baterias, pigmentos e revestimento de superfícies metálicas. A contaminação por este elemento pode ocasionar câncer nas vias respiratórias (DIAS et al., 2018; PEREIRA, 2004).
- i) Zinco: o zinco, um dos elementos mais comuns - encontrado no ar, solo e água, tem muitos usos comerciais e é pouco nocivo em baixas concentrações, uma vez que tem caráter não-cumulativo e é um nutriente indispensável ao metabolismo celular (PEREIRA, 2004; ATSDR, 2005). Em altas concentrações podem ocasionar distúrbios gastrointestinais (DIAS et al., 2018).

3.2. Efeitos do rompimento de barragens sobre a qualidade das águas superficiais

Os impactos ambientais negativos ocasionados pela extração mineral podem estar associados a todas as fases de exploração do minério, desde a lavra até o seu transporte e, inclusive, após o fechamento da mina ou encerramento das atividades (ARAUJO et al., 2014). É sabido que, apesar de ser um dos mais importantes setores da economia brasileira, a indústria extrativa está entre as atividades que mais geram impactos negativos ao meio ambiente e à comunidade na qual está inserida.

Os principais efeitos ambientais resultantes da liberação dos rejeitos sobre o meio ambiente são referentes à poluição das águas (ARAUJO et al., 2014; ALAMINO et al., 2014). Historicamente, existe uma quantidade alarmante de eventos de rompimentos de barragens que causaram efeitos catastróficos em suas áreas de influência. Estes eventos resultaram em

evacuação de membros da comunidade, destruições de vilas e suas construções, além da degradação do meio ambiente, principalmente sobre águas superficiais e subterrâneas (STEFANIAK e WRÓŻYŃSKA, 2018).

Diversos estudos têm relacionado os principais danos ao meio ambiente ocasionados por rompimentos de barragens. Macklin et al. (2003) estudaram os impactos ocasionados pelo rompimento de duas barragens na Romênia, 2000, sobre a bacia do rio Tisa. O Tisa é um dos principais tributários do rio Danúbio e, por isso, o acidente resultou em poluição e mortandade de peixes à jusante, afetando a Hungria, Servia e Bulgária. O acidente foi resultado de uma nevasca muito intensa, seguida de uma tempestade, as quais levaram ao rompimento das barragens: uma em janeiro, a qual liberou aproximadamente 100.000 m³ de água residual e sedimentos contendo elevadas concentrações de cianeto e metais sob os rios Lapuş e Someş; a outra ocorreu dois meses depois em março, pelos mesmos motivos do rompimento anterior. Desta vez, foram liberados cerca de 100.000 m³ de águas contaminadas e 40.000 ton. de resíduos sólidos nos rios Vaser e Vişeu, chegando ao rio Tisa posteriormente, na fronteira ucraniana. Os rejeitos foram dispersos nos rios afetados com uma vazão muito elevada, através da qual metais associados aos sedimentos foram depositados tanto dentro do canal como em áreas próximas. Devido às incertezas e preocupações dos efeitos da poluição por metais traços nas águas superficiais afetadas pelo acidente, os autores realizaram um estudo dos impactos do evento quatro meses após o rompimento, em julho de 2000. Os autores ressaltam que a amostragem foi realizada num período de seca severa, com os mais baixos níveis d'água registrados por 50 anos. Como resultado encontraram poucos pontos, imediatamente a jusante do local de rompimento, com concentrações de cádmio e cobre excedendo os valores máximos permitidos. Entretanto a 50 km do local, perceberam uma redução das concentrações encontradas, caindo para níveis aceitáveis. As concentrações de metais nas águas superficiais dos rios Vişeu/Tisa demonstraram não serem uma preocupação potencial para a saúde pública. Já os tributários do rio Someş e nascentes do rio Lapuş estavam poluídos, particularmente por cádmio, cobre e zinco. Em Lapuş, as concentrações de metais excediam ou estavam próximas dos valores preconizados para qualidade de água potável, até 10 km a jusante da mina. De modo geral, os autores concluíram que os níveis de metais (Pb, Zn, Cu e Cd) nas águas superficiais dos rios Vişeu, Tisa (dentro da Romênia) e Someş estavam de acordo com as diretrizes de qualidade das águas (MACKLIN et al., 2003).

Byrne et al. (2018) analisaram os impactos na qualidade das águas e o sistema de recuperação do rio após o rompimento da barragem de rejeitos da mina de cobre e ouro *Mount Polley*, ocorrido em 2014, no Canadá. Durante o evento, aproximadamente 25 milhões de

metros cúbicos de rejeitos de mineração foram liberados sobre a bacia do rio Quesnel, localizado na Columbia Britânica (WISE URANIUM PROJECT, 2019). O rejeito inicialmente erodiu o vale existente na porção oeste da bacia do lago Quesnel, tanto verticalmente quanto lateralmente, devido aos depósitos de rejeitos superiores a 3,5 m de espessura (BYRNE et al., 2018). Outros estudos sobre o acidente em questão apontaram que pouco tempo após o rompimento houve alterações na qualidade das águas dos corpos d'água afetados, uma vez que as concentrações de alguns parâmetros como turbidez e cobre estavam acima do preconizado pelas Diretrizes de Qualidade das Águas da Columbia Britânica. Entretanto, estas concentrações têm diminuído substancialmente desde o evento (GOLDER ASSOCIATES LTD., 2015).

Glotov et al. (2018) discutiram as causas, impactos ambientais e atuais condições geológicas após o rompimento da barragem de rejeitos de ouro na mina Karanken, localizada no extremo oriente Russo, em 2009. O acidente destruiu duas vilas próximas do local, afetando diretamente 25 residências e fazendas. O vazamento dos rejeitos causou contaminação das águas devido a presença de elementos tóxicos residuais e a polpa de rejeitos suspensa prejudicou a pesca local e fontes de água potável. Os autores afirmam que nos primeiros cinco dias após a falha da barragem, a concentração de partículas minerais finas a 1,5 km do local era de aproximadamente 10^4 maior do que o permitido pela legislação russa. A última investigação realizada, em 2016, demonstrou uma redução de elementos tóxicos que continuam detectáveis a uma distância de 1km do local do rompimento, sendo o alumínio, manganês, ferro, cobre e chumbo os principais poluentes persistentes. Os estudiosos complementam dizendo que esta redução natural da concentração dos poluentes procedeu-se de uma diluição das águas do rio Khasin através de seus tributários (GLOTOV et al., 2018).

No cenário brasileiro, pesquisas recentes têm abordado o acidente ocorrido na cidade de Mariana-MG, envolvendo rompimento da barragem de Fundão, em 2015. Até então este é considerado um dos piores acidentes do último século, devido ao grande volume de rejeitos liberado no meio ambiente, e à magnitude dos danos ambientais e socioeconômicos resultantes deste evento.

Fernandes et al. (2016) avaliaram os impactos ecológicos e socioeconômicos desse acidente através de uma análise espacial baseada em dados de reflectância de superfície em imagens do tipo Landsat-8, as quais permitiram medir a extensão e a intensidade do dano causado pela liberação dos rejeitos no meio ambiente. Numa escala geral, os autores identificaram múltiplos impactos negativos, desde alterações de diversidade genética de populações aquáticas até perda de vegetação a longo prazo, incluindo má revegetação em áreas

contaminadas. Eles afirmaram que os depósitos de rejeitos foram espalhados pelas regiões afetadas, chegando à 1km de altura em áreas imediatamente à jusante do local do rompimento. A lama de rejeitos, sedimentos e grandes volumes de biomassa arrastados criaram um dano em 663,2 km ao longo de cursos d'água afetados. Consequentemente, o comprometimento da estabilidade do solo e do escoamento superficial aumentaram o risco de futuros distúrbios geomorfológicos, incluindo deslizamentos de terra, falhas e movimentos de massa (FERNANDES et al., 2016).

Carmo et al. (2017) avaliaram as possíveis falhas estruturais que poderiam ter levado a barragem a romper-se e a magnitude de danos ambientais e culturais resultantes do acidente. Para identificar os danos ambientais resultantes do rompimento da barragem de Fundão, os autores utilizaram imagens de satélite de alta resolução, ao longo do deslocamento da lama. Como resultado, encontraram que os rejeitos afetaram, diretamente, 135 fragmentos de floresta semidecídua, numa supressão de 298 ha de vegetação, localizados nos bancos dos rios do Gualaxo Norte e do Carmo e seus tributários. Também identificaram outros 863,7 ha de Área de Proteção Permanente associadas a cursos d'água afetados, os quais estavam sob proteção do código florestal nacional.

Costa et al. (2018) avaliaram a qualidade das águas do rio do Carmo através do levantamento e tratamento de dados do monitoramento realizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), comparando os resultados com os limites permitidos por legislação e os correlacionou com o rompimento da barragem de Fundão. Foram selecionados dois pontos de monitoramento para o levantamento de dados no período analisado (2013 a 2017), cujos parâmetros selecionados foram aqueles que possuíam limites de concentração estabelecidos por legislação. Contudo, o estudo não constatou que as concentrações dos elementos acima dos limites legais estivessem relacionadas com o rompimento da barragem, exceto para turbidez. Os riachos do Santarém, rios Gualaxo Norte e do Carmo foram os principais cursos d'água completamente assoreados pelos rejeitos. Os autores chamaram a atenção para uma potencial poluição causada por compostos químicos (floculantes e coagulantes), especificamente hidróxido de sódio, que foram liberados juntamente com os rejeitos (COSTA et al., 2018).

Dias et al. (2018) analisaram as concentrações dos metais nas águas do rio Doce e identificaram os períodos de maiores e menores concentrações em função da distância e do período da ocorrência do rompimento da Barragem de Fundão. Para isto, os autores utilizaram dados de monitoramento do IGAM extraídos de 14 estações de monitoramento do programa Águas de Minas, utilizando séries históricas de 1997 a 2017, conjuntamente com os relatórios técnicos de acompanhamento da qualidade das águas publicados após o desastre. Os autores

constatarem que o rio Doce já sofria com relação à contaminação de alguns metais (alumínio, ferro, manganês e arsênio), sendo esta potencializada imediatamente após ao rompimento da barragem. Os autores também reportaram que, no período de abril a setembro de 2016, os valores absolutos dos elementos analisados reduziram, retornando a valores próximos aos obtidos anteriormente ao acidente.

Por outro lado, Santos et al. (2019) avaliaram a natureza física, química e biológica do impacto ambiental ocasionado pelo rompimento da Barragem de Fundão sobre as áreas ribeirinhas, com o intuito de auxiliar na tomada de decisões para procedimentos de remediação e reabilitação destas áreas degradadas. Para isso, os autores fizeram uma análise mineralógica de amostras de sedimentos coletadas de locais contaminados, e posteriormente realizaram uma análise estatística dos dados observados, para fundamentar a pesquisa. O estudo identificou que a deposição de sedimentos no rio Doce resultou numa depleção de nutrientes e minerais (fósforo, potássio, cálcio, manganês, cobre, ferro, magnésio, zinco e nitrato) e matéria orgânica do solo, enquanto amônia, sódio e pH aumentaram. Os autores também não identificaram toxicidade relacionada aos metais ferro, cobre, manganês e zinco. De acordo com eles, os principais candidatos responsáveis pela toxicidade ambiental foram éter amina e sódio, cuja presença na barragem havia sido detectada em níveis elevados nos sedimentos, mas não nos solos de locais preservados (SANTOS et al., 2019).

4. METODOLOGIA

4.1. Área de Estudo

Juntamente com a mina da Jangada, a mina do Córrego do Feijão compõe parte do Complexo Paraopeba, localizado em uma região conhecida como Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais. O Quadrilátero Ferrífero compreende uma área conhecida como uma das principais regiões de depósitos minerais do Brasil, possuindo importantes jazidas de ferro, ouro e manganês, sendo o minério de ferro o produto principal (NICHOLSON, 2014). A mina Córrego do Feijão está situada na bacia hidrográfica do ribeirão Ferro-Carvão, no município de Brumadinho, a cerca de 60 km de distância da capital mineira: Belo Horizonte (AMPLO, 2019)

As atividades na mina Córrego do Feijão se iniciaram no ano de 1956, sob posse da Cia de Mineração Ferro e Carvão e em 1973 passou a ser administrada pela Ferteeco Mineração. Desde 2001 é dirigida pela Vale S.A. A atividade principal do empreendimento é a exploração de minério de ferro, com capacidade instalada de beneficiamento da mina de 5,992 Mta e produção de ROM (*Run of Mine*) de 5,992 Mta (MINAS GERAIS, 2018). A lavra foi iniciada a céu aberto em encosta e posteriormente avançou para a formação de cava. O beneficiamento do minério ocorria na instalação de britagem (britagem primária, secundária e peneiramento) e na estação de tratamento de minério (NICHOLSON, 2014).

No dia 25 de janeiro de 2019, às 12h30min aproximadamente, ocorreu o rompimento da barragem de rejeitos B1 do complexo da Mina Córrego do Feijão, na qual eram armazenados os rejeitos do beneficiamento de minério de ferro a úmido. Durante o acidente, a onda de rejeitos liberada pelo rompimento erodiu e carregou grandes volumes de minério depositados no pátio de embarque e arrastou sedimentos e detritos, além de galgar e romper os maciços das barragens BIV e BIV A (AMPLO, 2019). Durante o acidente, ocorreu o lançamento dos rejeitos ali depositados ao longo do vale do ribeirão Ferro-Carvão e, conseqüentemente, no rio Paraopeba.

Sobre a qualidade das águas, a lama de rejeitos afetou o rio Paraopeba, o qual recebeu rejeitos diretamente de seu afluente pela margem direita, o ribeirão Ferro-Carvão. Estima-se que a onda de rejeitos percorreu cerca de 9 km em apenas quatro dias após o desastre, espalhando-se por uma área de aproximadamente 290 hectares (SEMAD, 2019). De acordo com cálculos efetuados pela Vale, após o rompimento da barragem, a mancha de inundação era da ordem de 7.730.037 m³ de volume depositado até a foz do ribeirão Ferro-Carvão e o volume aportado ao rio Paraopeba de 2.779.362 m³ (AMPLO, 2019).

Com uma bacia com área de drenagem de cerca de 13.640km², o Rio Paraopeba, um dos formadores do reservatório da usina de Três Marias da Companhia Elétrica de Minas Gerais,

possui como principais usos de suas águas a geração de energia elétrica; o abastecimento urbano e rural; e o abastecimento industrial, com destaque para a mineração e a irrigação (CPRM, 2019).

O empreendimento está localizado na microbacia do ribeirão Ferro-Carvão, o qual está inserido na bacia do rio Paraopeba. Para fins de avaliação e enquadramento da qualidade das águas, o ribeirão Ferro-Carvão (trecho 42), das nascentes até a confluência com o rio Paraopeba, e esse em seu leito principal da confluência com o rio Maranhão até a represa de Três Marias (trecho 3) são classificados, segundo a Deliberação Normativa COPAM 14/1995, como de Classe 2 (MINAS GERAIS, 1995). Sendo assim, serão considerados os limites legais aplicáveis aos corpos hídricos de águas doces de classe 2 para a análise dos efeitos da presença da lama de rejeitos proveniente do rompimento da barragem B1 sobre as águas do rio Paraopeba.

O complexo minerário localiza-se em uma região de transição entre os biomas Mata Atlântica e Cerrado (IBGE, 2004). A porção da Mata Atlântica é formada predominantemente pela Floresta Estadual Semidecídua, caracterizada por clima marcado por duas estações, uma chuvosa e outra seca, com temperaturas médias de 21 °C, na área tropical. Além de curto período seco acompanhado de uma acentuada baixa térmica na área subtropical, com temperaturas médias de 15 °C. Já o Cerrado, considerado como a savana brasileira, inclui formações campestres com vegetação gramíneo-lenhosa baixa, que se alternam com pequenas árvores isoladas, capões florestados e galerias florestais ao longo dos rios (IBGE, 2004; AMPLO, 2019).

Na região de Brumadinho, o índice pluviométrico é de 1484,8 mm, marcado por uma grande variação ao longo do ano, com uma média mensal de 123,7 mm. O período chuvoso estende-se de outubro a março, sendo os meses mais secos de maio a agosto, e o período de transição durante os meses de abril a setembro (INMET, 2010).

4.2. Coleta de Dados

Com a finalidade de analisar os efeitos da presença da lama proveniente do rompimento da barragem B1 sobre a qualidade das águas superficiais do rio Paraopeba, foram selecionados dados secundários de monitoramento relativos a períodos anteriores e posteriores ao rompimento da barragem.

Através do Projeto Águas de Minas, desenvolvido pelo IGAM, a qualidade das águas superficiais e subterrâneas de Minas Gerais passaram a ser monitoradas em 1997 e, desde então, o programa disponibiliza séries históricas com dados de qualidade das águas do estado. A rede de monitoramento básica conta com aproximadamente 600 estações de amostragem

distribuídas nas bacias hidrográficas dos principais rios estaduais e, em regiões cujas pressões ambientais devido a atividades industriais, minerárias e de infraestrutura são dominantes, são operadas redes de monitoramento específicas para cada tipo de pressão antrópica (SEMAD, 2019).

Após o rompimento da barragem, foi estabelecida uma rede de monitoramento emergencial acompanhada conjuntamente pelo IGAM, pela Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais, pela Agência Nacional de Águas (ANA) e pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Esta rede emergencial contempla um total de 22 pontos de monitoramento com frequência variável entre diária e semanal, dependendo do parâmetro analisado. Os dados emitidos pela rede de monitoramento emergencial são publicados semanalmente no Portal Meio Ambiente da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD).

Diante disto, foram selecionadas oito estações de monitoramento de qualidade das águas do IGAM localizadas no rio Paraopeba, tanto à montante (uma estação) quanto à jusante (sete estações). As estações possuem dados de qualidade das águas publicados tanto no período anterior quanto posterior ao rompimento da barragem. A distribuição espacial dos pontos de monitoramento longo do rio Paraopeba a serem consideradas neste trabalho, assim como a distância entre elas e o local de rompimento da barragem estão apresentadas no Quadro 2 e representadas na Figura 1. As estações foram selecionadas por serem coincidentes geograficamente tanto para o período anterior quanto posterior ao rompimento. Além disto, também houve a preocupação de selecionar pontos localizados à jusante e à montante do ponto de rompimento.

Para a determinação das características do corpo d'água antes do rompimento, foram utilizadas séries históricas de monitoramento disponíveis no portal InfoHidro, uma ferramenta integrante do Projeto Águas de Minas (IGAM, 2018b). Anteriormente ao rompimento da barragem, a coleta dos dados ocorreu trimestralmente entre os anos de 1998 a 2018, sendo disponibilizada apenas uma leitura em um dos meses referentes ao trimestre em questão (IGAM, 1997; IGAM, 2002; IGAM 2007; IGAM, 2012, IGAM 2017; IGAM, 2018a).

Os dados do período posterior ao rompimento da barragem foram obtidos do Anexo I do Informativo Nº 51, publicado no dia 24 de junho de 2019, cujos dados foram coletados no período de 25 de janeiro a 7 de junho de 2019 (IGAM, 2019). Os dados são disponibilizados em forma de tabelas contendo os resultados das análises realizadas.

De modo a possibilitar uma comparação espaço-temporal dos parâmetros a serem analisados, para este estudo, foram considerados apenas os dados do primeiro trimestre de cada

ano, tanto para o período anterior quanto posterior ao rompimento da barragem. A determinação deste período de análise levou em consideração a variação das condições climáticas ao longo do ano. Desta forma, os dados dos primeiros trimestres foram selecionados de modo a garantir comparações sob condições ambientais similares, uma vez que este período compreende a estação chuvosa, com índices pluviométricos elevados, representando o pior cenário a ser analisado, quando se trata de poluição difusa.

As variáveis de qualidade das águas analisadas foram as concentrações médias das variáveis: alumínio dissolvido, bário total, boro total, cádmio total, chumbo total, cianeto livre, cobre dissolvido, cromo total, fenóis totais, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total, nitrato, nitrito, nitrogênio amoniacal total, oxigênio dissolvido, sólidos totais, e zinco total; além do pH médio, turbidez total média e condutividade elétrica in loco média. Tais variáveis foram escolhidas por apresentarem dados nas estações selecionadas, para os dois períodos analisados (antes e após rompimento).

As amostragens e análises laboratoriais foram contratadas junto à Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC, vinculada à Secretaria de Estado de Ciência e Tecnologia. Os métodos de coleta, preservação e análise seguiram normas aprovadas pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO) e, em sua ausência, as diretrizes do *Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA-AWWA-WPCF* à época da publicação do relatório (FEAM, IGAM, 1998; FEAM, IGAM, 1999; FEAM, IGAM, 2000; FEAM, IGAM, 2001; FEAM, IGAM, 2002; FEAM, IGAM, 2003; FEAM, IGAM, 2004; FEAM, IGAM, 2005; FEAM, IGAM, 2006; FEAM, IGAM, 2007; FEAM, IGAM, 2008; FEAM, IGAM, 2009; FEAM, IGAM, 2010; IGAM, 2011; IGAM, 2012; IGAM, 2013; IGAM, 2014; IGAM, 2015; IGAM, 2016; IGAM, 2017; IGAM, 2018a).

Com exceção da estação BP099, cuja coleta de dados iniciou-se em 2008, todas as estações apresentam dados de leitura para o período de 1998 a 2019.

Quadro 2 – Descrição das estações de monitoramento de qualidade das águas do IGAM a serem consideradas neste estudo

Zona	Estação	Latitude	Longitude	Distância do local de rompimento (km)	Descrição
Montante da Mina Córrego do Feijão	BP036	-20,197	-44,123	10	Rio Paraopeba na localidade de Melo Franco
Jusante da Mina Córrego do Feijão	BP068	-20,093	-44,211	24,8	Rio Paraopeba 5 km a jusante da captação da COPASA em Brumadinho
	BP070	-20,04	-44,256	42	Rio Paraopeba a jusante da foz do Ribeirão Sarzedo, próximo à cidade de São Joaquim de Bicas
	BP072	-19,949	-44,305	59	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Betim, na divisa dos municípios de Betim e Juatuba
	BP082	-19,67	-44,48	123,1	Rio Paraopeba na localidade de São José, em Esmeraldas
	BP083	-19,37	-44,53	192,4	Rio Paraopeba logo após a foz do Ribeirão São João em Paraopeba
	BP078	-19,17	-44,71	250,9	Rio Paraopeba a jusante da foz do Rio Pardo em Pompéu
	BP099	-18,871	-44,787	318,3	Rio Paraopeba a montante de sua foz na barragem de Três Marias

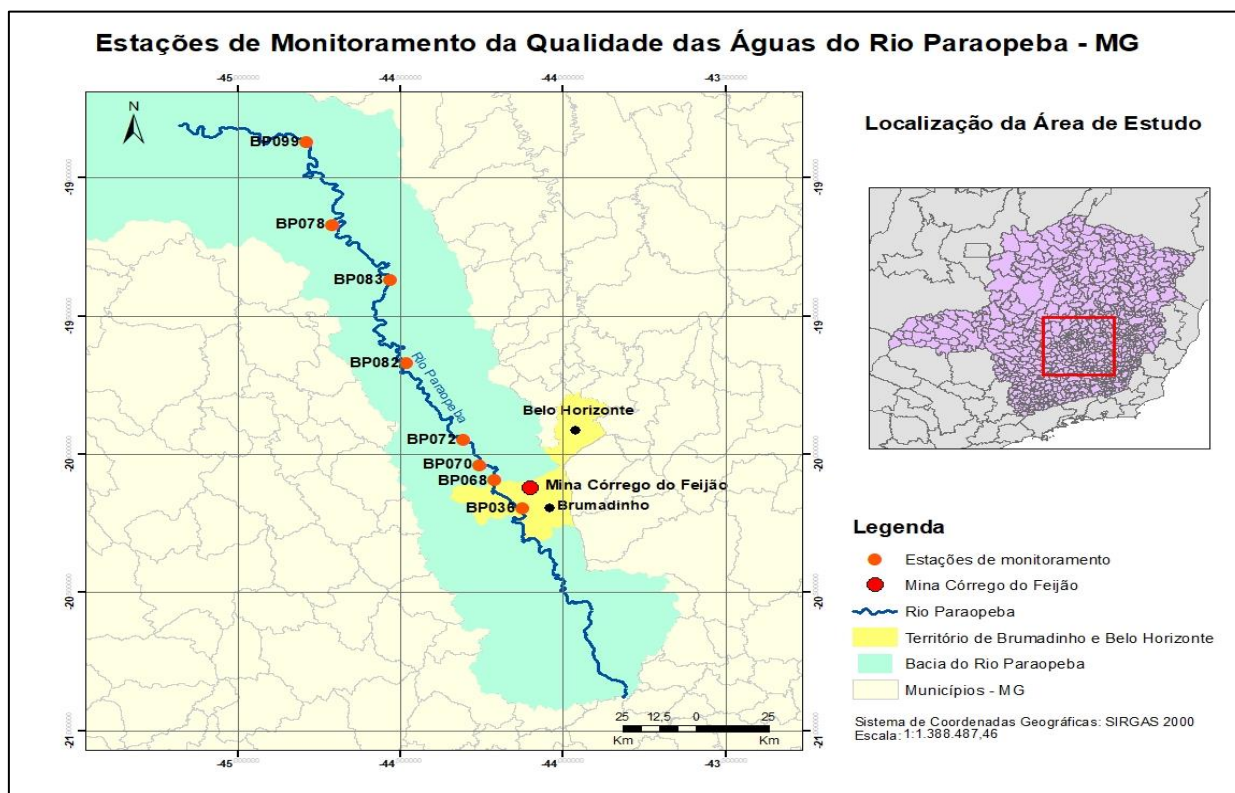


Figura 1 Distribuição espacial das estações de monitoramento de qualidade das águas do Instituto Mineiro de Gestão das Águas a serem consideradas neste estudo

4.3. Análise estatística dos dados

Após a identificação das variáveis e seleção das estações de monitoramento que compõem a pesquisa, foi realizada uma análise estatística descritiva dos dados, considerando média, mediana, desvio padrão, valor mínimo, valor máximo e coeficiente de variação para os resultados reportados no primeiro trimestre dos anos do período estudado (1998 a 2019).

Em seguida, testou-se a normalidade dos dados através do teste *Shapiro-Wilk*. Como a maioria das variáveis não apresentou distribuição normal, utilizou-se o teste de *Wilcoxon* pareado para testar o efeito do local e do período de coleta das amostras nas concentrações médias das variáveis. Desta forma, comparou-se a média de cada uma das variáveis selecionadas na estação localizada à montante (BP036) com a média de cada uma das estações localizadas a jusante (BP068, BP070, BP072, BP082, BP083 e BP099), antes (período de 1998 a 2018) e após o rompimento (em 2019), utilizando-se dados dos primeiros trimestres. Além disto, as variáveis em cada estação foram comparadas nos distintos períodos, utilizando-se dados dos últimos cinco anos da série histórica no período anterior ao rompimento (2014 a 2018) com os dados do pós-rompimento (2019). Os testes foram realizados no Software R, utilizando-se um nível de significância de 5%. O Quadro 3 apresenta os cenários analisados pelo presente estudo.

Quadro 3 – Descrição dos cenários analisados neste estudo

Cenário	Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
Estações analisadas	Montante x Jusante	Montante x Jusante	Cada estação com ela mesma
Período analisado	[1998-2018]	[2019]	[2014-2018] x [2019]

Para fins de análise estatística, para os parâmetros cujas leituras se mostraram abaixo do limite de detecção dos equipamentos/métodos de amostragem, foram considerados valores iguais à metade deste limite detectável (ex.: Chumbo total = “< 0,005 mg/L”, utilizou-se o valor “0,0025 mg/L”). Conforme orientado em USEPA (2006), estes valores não devem ser excluídos, como se não existissem, e sim considerados nas análises estatísticas, já que a concentração destes elementos se encontra entre zero e o limite de detecção.

De posse das observações das variáveis selecionadas, foi verificado o atendimento legal dos parâmetros estudados com os limites estabelecidos na DN COPAM/CERH-MG N.º 1 de maio de 2008 para águas classe 2. Estes dados foram apresentados de forma gráfica, para permitir a visualização da evolução temporal dos resultados encontrados ao longo do período analisado.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das estatísticas descritivas para as variáveis analisadas, em todas as estações de monitoramento estudadas, nos períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem B1 encontram-se nas Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5.

Tabela 1 - Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade das águas localizada à montante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 1998 a 2018 (anterior).

Variável (mg/L)*	N**	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV***
Alumínio dissolvido	11	<0,1	0,21	0,07	0,05	0,05	70,1
Bário total	20	0,026	0,139	0,070	0,070	0,031	44,7
Boro total	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
Cádmio total	21	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0002	57,3
Chumbo total	21	<0,005	0,050	0,005	<0,005	0,010	194
Cianeto Livre	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,002	93,4
Cobre dissolvido	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0,000	0
Condutividade elétrica (µS/cm)	21	36,2	117	57,4	53,7	18,8	32,7
Cromo total	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	75,0
Fenóis totais	21	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	0,0010	74,3
Ferro dissolvido	21	<0,03	0,64	0,23	0,23	0,17	73,6
Manganês total	21	<0,2	1,2	0,60	0,60	0,28	46,4
Mercurio total	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Níquel total	21	<0,004	0,009	<0,004	<0,004	0,002	68,2
Nitrato	21	0,07	1,31	0,52	0,47	0,38	72,6
Nitrito	21	0,001	0,022	0,008	0,006	0,005	58,94
Nitrogênio amoniacal total	21	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	0,04	52,3
Oxigênio dissolvido	21	6,5	8,1	7,3	7,4	0,44	6,0
pH in loco	21	6,3	7,5	7,0	7,1	0,36	5,2
Sólidos totais	21	71,0	642	254	208	173	68,0
Turbidez (UNT)	21	18,0	609	238	197	181	76,0
Zinco total	21	<0,02	0,10	<0,02	<0,02	0,02	142

*Variáveis em mg/L, exceto condutividade elétrica, pH e turbidez; **No de observações; ***Coeficiente de Variação.

Tabela 2 - Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 1998 a 2018 (anterior).

Variável (mg/L)*	N**	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV***
Alumínio dissolvido	76	<0,1	0,28	0,07	0,05	0,04	66,6
Bário total	128	0,019	0,174	0,067	0,066	0,032	47,5
Boro total	53	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
Cádmio total	130	<0,0005	0,0070	<0,0005	<0,0005	0,0009	213
Chumbo total	130	<0,005	0,080	0,005	<0,005	0,0107	201
Cianeto Livre	63	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,002	106
Cobre dissolvido	88	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Condutividade elétrica (µS/cm)	130	35,7	145	67,2	62,8	19,7	29,3
Cromo total	130	<0,04	0,1	<0,04	<0,04	0,02	70,88
Fenóis totais	130	<0,002	0,003	<0,002	<0,002	0,001	35,33
Ferro dissolvido	130	<0,03	1,19	0,21	0,19	0,19	90,0
Manganês total	130	<0,2	1,7	0,50	0,50	0,37	75,1
Mercurio total	130	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Níquel total	130	<0,004	0,011	<0,004	<0,004	0,001	48,3
Nitrato	130	0,004	3,06	0,667	0,450	0,657	98,6
Nitrito	130	0,001	0,107	0,015	0,010	0,018	114
Nitrogênio amoniacal total	130	<0,10	1,35	0,10	<0,10	0,14	144
Oxigênio dissolvido	130	3,7	8,0	6,7	6,8	0,64	9,5
pH in loco	130	6,2	7,7	7,0	7,1	0,38	5,5
Sólidos totais	130	43,0	861	251	187	181	72,3
Turbidez (UNT)	130	9,1	1856	208	136	234	113
Zinco total	130	<0,02	0,09	<0,02	<0,02	0,01	111

*Variáveis em mg/L, exceto condutividade elétrica, pH e turbidez; **No de observações; ***Coeficiente de Variação.

Tabela 3- Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos aos primeiros trimestres dos anos de 2014 a 2018 (anterior).

Variável (mg/L)*	N**	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV***
Alumínio dissolvido	35	<0,1	0,28	0,09	0,05	0,06	70,5
Bário total	35	0,023	0,117	0,048	0,038	0,022	45,7
Cádmio total	35	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
Chumbo total	35	<0,005	0,018	<0,005	<0,005	0,003	86,6
Cianeto Livre	35	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,003	151
Cobre dissolvido	35	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Condutividade elétrica (µS/cm)	35	53,3	145	90,8	88,8	19,7	21,7
Cromo total	35	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
Fenóis totais	35	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Ferro dissolvido	35	<0,03	1,19	0,17	0,02	0,24	147
Manganês total	35	<0,2	1,7	0,40	0,30	0,37	107
Mercurio total	35	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Níquel total	35	<0,004	0,011	<0,004	<0,004	0,002	72,7
Nitrato	35	0,44	2,83	1,3	1,0	0,63	49,0
Nitrito	35	0,004	0,107	0,031	0,021	0,027	87,2
Nitrogênio amoniacal total	35	<0,10	1,35	0,11	<0,10	0,22	199
Oxigênio dissolvido	35	5,3	7,8	6,7	6,8	0,54	8,1
pH in loco	35	6,3	7,5	7,1	7,2	0,36	5,1
Sólidos totais	35	69,0	702	225	156	156	69
Turbidez (UNT)	35	15,0	501	141	70,0	146	104
Zinco total	35	<0,02	0,05	<0,02	<0,02	0,01	72,9

*Variáveis em mg/L, exceto condutividade elétrica, pH e turbidez; **Nº de observações; ***Coeficiente de Variação.

Tabela 4 - Estatística descritiva da estação de monitoramento de qualidade das águas, localizada à montante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos ao primeiro trimestre de 2019 (posterior).

Variável (mg/L)*	N**	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV***
Alumínio Dissolvido	42	0,17	1,17	0,44	0,39	0,20	46,4
Bário total	6	0,022	0,075	0,042	0,041	0,018	43,0
Boro Total	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
Cádmio Total	41	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
Chumbo Total	41	<0,005	0,015	0,005	<0,005	0,004	71,8
Cianeto livre	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Cobre Dissolvido	41	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Condutividade elétrica (µS/cm)	41	42,8	104	72,7	70,8	13,4	18,5
Cromo total	21	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
Fenóis totais	6	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	35,0
Ferro Dissolvido	42	0,31	1,22	0,58	0,55	0,17	30,1
Manganês total	42	<0,2	2,6	0,50	0,40	0,40	89,6
Mercurio Total	41	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Níquel Total	41	<0,004	0,017	0,004	<0,004	0,003	76,0
Nitrato	6	0,27	3,17	1,0	0,66	1,1	106
Nitrito	5	0,010	0,040	0,016	0,010	0,013	83,9
Nitrogênio amoniacal total	6	<0,10	0,39	0,21	0,22	0,14	69,8
Oxigênio dissolvido	42	7,2	8,0	7,6	7,6	0,16	2,1
pH in loco	42	5,9	7,9	7,1	7,2	0,53	7,4
Sólidos totais	42	86,0	878	189	157	1319	69,3
Turbidez (UNT)	42	34,0	439	136	126	84,0	61,6
Zinco total	40	<0,02	0,08	0,03	0,04	0,02	57,1

*Variáveis em mg/L, exceto condutividade elétrica, pH e turbidez; **No de observações; ***Coeficiente de Variação.

Tabela 5—Estatística descritiva das estações de monitoramento de qualidade das águas localizadas à jusante do local de rompimento da Barragem B1. Dados relativos ao primeiro trimestre de 2019 (posterior).

Variável (mg/L)*	N**	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV***
Alumínio dissolvido	332	<0,02	1,57	0,39	0,34	0,26	65,8
Bário total	41	0,025	0,311	0,065	0,051	0,06	92,8
Boro total	42	<0,07	0,15	<0,07	<0,07	0,025	60,1
Cádmio total	306	<0,0005	0,004	<0,0005	<0,0005	0,0002	58,8
Chumbo total	331	<0,005	0,147	0,007	<0,005	0,009	125
Cianeto Livre	34	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Cobre dissolvido	322	<0,004	0,034	<0,004	<0,004	0,002	86,1
Condutividade elétrica (µS/cm)	326	11,0	150	91,3	90,6	20,1	22,0
Cromo total	155	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
Fenóis totais	41	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Ferro dissolvido	332	<0,03	1,82	0,52	0,49	0,33	62,1
Manganês total	332	<0,2	46,3	1,2	0,60	2,4	196
Mercurio total	326	<0,2	4,2	<0,2	<0,2	0,2	121
Níquel total	324	<0,004	0,109	0,006	0,005	0,006	110
Nitrato	41	0,01	3,53	1,0	0,66	0,97	92,6
Nitrito	34	<0,001	0,08	0,024	0,020	0,019	79,2
Nitrogênio amoniacal total	41	<0,10	0,84	0,26	0,20	0,20	78,2
Oxigênio dissolvido	335	5,4	8,8	6,9	6,9	0,45	6,5
pH in loco	335	5,8	7,9	6,9	6,9	0,44	6,4
Sólidos totais	334	54,0	13792	451	204	1099	244
Turbidez (UNT)	335	6,0	34500	910	222	2833	311
Zinco total	314	<0,02	0,25	0,03	0,04	0,03	83,1

*Variáveis em mg/L, exceto condutividade elétrica, pH e turbidez; **No de observações; ***Coeficiente de Variação.

Os efeitos do rompimento da barragem na qualidade das águas do Rio Paraopeba foram avaliados por variável, separadamente, conforme descrito a seguir. No final, foi realizada uma avaliação geral da influência do rompimento na qualidade das águas, bem como o atendimento aos padrões legais.

5.1. Alumínio Dissolvido

As estatísticas descritivas dos resultados de Al dissolvido nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação manteve-se, aparentemente, após o rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5). No entanto, ao comparar os resultados antes e após o rompimento, apenas nas estações à jusante, foi verificado um aumento dos valores médios desta variável no período posterior (Tabelas 3 e 5).

Na Tabela 6 está apresentada a estatística descritiva para o alumínio dissolvido em cada uma das estações analisadas, separadamente, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem. Uma vez que o monitoramento de alumínio dissolvido nas estações estudadas iniciou-se em 2008, os dados, para esta variável, foram analisados durante o período de 2008 a 2019. O resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para alumínio dissolvido, comparativo entre as estações estudadas, está apresentado na Tabela 7.

Tabela 6 – Estatística descritiva dos resultados de alumínio dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2008 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Alumínio Dissolvido (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (2008-2018)	BP036	11	<0,1	0,21	0,07	0,05	0,05	70,1
	BP068	10	<0,1	0,10	0,05	0,05	0,01	22,3
	BP070	11	<0,1	0,22	0,07	0,05	0,05	73,1
	BP072	10	<0,1	0,28	0,08	0,05	0,07	91,0
	BP078	10	<0,1	0,22	0,07	0,05	0,05	76,0
	BP082	10	<0,1	0,19	0,07	0,05	0,05	67,8
	BP083	10	<0,1	0,17	0,06	0,05	0,04	59,9
	BP099	10	<0,1	0,10	0,06	0,05	0,02	35,5
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,1	0,21	0,08	0,05	0,07	86,3
	BP068	5	<0,1	0,09	0,06	0,05	0,02	29,5
	BP070	5	<0,1	0,22	0,10	0,05	0,07	75,5
	BP072	5	<0,1	0,28	0,11	0,05	0,10	89,9
	BP078	5	<0,1	0,22	0,09	0,05	0,07	80,6
	BP082	5	<0,1	0,19	0,09	0,05	0,06	69,1
	BP083	5	<0,1	0,17	0,08	0,05	0,05	67,9
	BP099	5	<0,1	0,10	0,07	0,05	0,03	39,4
Posterior (2019)	BP036	42	0,17	1,17	0,44	0,39	0,20	46,4
	BP068	44	<0,02	0,63	0,23	0,21	0,18	76,3
	BP070	43	<0,02	0,76	0,23	0,20	0,19	80,9
	BP072	46	0,05	0,86	0,36	0,34	0,22	61,4
	BP078	46	0,16	1,57	0,51	0,44	0,29	56,4
	BP082	51	0,06	1,09	0,40	0,37	0,23	56,1
	BP083	44	0,10	1,45	0,52	0,49	0,31	60,0
	BP099	61	0,12	1,16	0,45	0,41	0,22	49,0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

Da análise da Tabela 6, percebe-se o aumento do valor médio dos valores medidos para alumínio dissolvido no período posterior ao acidente da barragem B1, na maioria das estações de monitoramento localizadas à jusante. Todavia, o mesmo aconteceu para a estação BP036, localizada à montante do local de rompimento da barragem, a uma distância de 10 km, cuja média subiu de 0,069 mg/L (antes do rompimento) para 0,439 mg/L (após o rompimento). Observa-se também que, para Al dissolvido, as estações localizadas mais à jusante foram as que apresentaram as maiores leituras de concentração desta variável, fazendo com que tanto os máximos como as médias fossem maiores em regiões mais distantes do local do rompimento.

A análise comparativa da estação à montante com as estações à jusante, no período anterior ao rompimento, mostra que não haviam diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os valores médios de alumínio dissolvido nas estações estudadas (Tabela 7).

Tabela 7 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro alumínio dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Alumínio Dissolvido		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 > BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 > BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes < Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes < Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes < Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes < Depois
BP036 = BP099	BP036 = BP099	BP099: Antes < Depois

Com relação à comparação de cada estação com ela mesma, nos últimos cinco anos do período anterior ao rompimento da barragem (2014-2018) com o pós-rompimento, nota-se que praticamente todas as estações apresentaram aumento significativo nos valores médios de alumínio dissolvido após o rompimento da barragem ($p < 0,05$; Tabela 6; Tabela 7).

A série temporal das médias dos primeiros trimestres de cada ano do período estudado para o alumínio dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento selecionadas, está ilustrada na Figura 2.

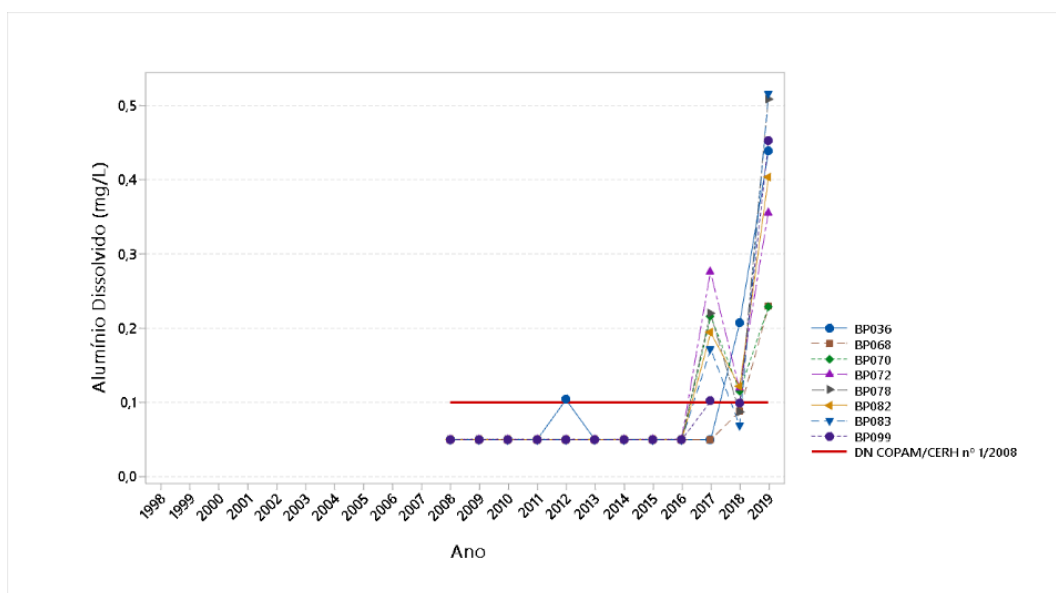


Figura 2 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Alumínio Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento selecionadas. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Observa-se que, historicamente, as medidas dos primeiros trimestres do período analisado encontravam-se abaixo do limite estabelecido pela Resolução DN COPAM/CERH nº 1/2008 (0,1 mg/L Al) para corpos d'água de classe 2, em todas as estações de monitoramento (Figura 2). Entretanto, verifica-se que em 2012 a estação BP036 (montante) atingiu este limite

e que, em 2017 houve um aumento das médias detectadas nas estações BP070, BP072, BP078, BP082, BP083 e BP099 (Figura 2). Tal ocorrência pode ser explicada pela intensiva atividade minerária na região e pode estar associada ao aumento do carreamento de partículas, considerando que o primeiro trimestre do ano é marcado por uma estação chuvosa (ANA, 2012).

Já para o período posterior ao rompimento da barragem, percebe-se um salto dos valores observados em 2019, ao compará-los com os dados dos anos anteriores. Os valores médios do pós-rompimento excederam o limite legal estabelecido para Al dissolvido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 (Figura 2), em todas as estações de monitoramento observadas. Estudos do rejeito presente na barragem da Samarco na região de Mariana-MG, cujas atividades de mineração são semelhantes às realizadas em Brumadinho, apontam a presença de alumínio em valores significativos (GOMES et al., 2011), o que pode justificar o aumento dos níveis deste elemento após o rompimento da barragem no primeiro trimestre de 2019 (Figura 2)

5.2. Bário Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Ba Total nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, aparentemente, após o rompimento da barragem, pois foram registradas maiores concentrações desta variável nas estações à jusante em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e nas estações à jusante em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva para o bário total em cada uma das estações analisadas, tanto para o período anterior como posterior ao rompimento da barragem, está apresentada na Tabela 8. O resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para Ba Total, comparativo ente as estações estudadas, está apresentado na Tabela 9.

A análise comparativa da estação à montante com as estações à jusante, no período anterior ao rompimento, mostra que não haviam diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os valores médios de Ba Total na maioria das estações estudadas (Tabela 9). As estações à jusante localizadas mais próximas ao ponto de rompimento da barragem (BP068, BP070 e BP072) apresentaram um aumento das concentrações das médias de bário total, após o rompimento (Tabela 8). No entanto, o aumento foi significativo apenas na primeira estação à jusante do local de rompimento (Tabela 9).

Tabela 8 – Estatística descritiva dos resultados de bário total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Bário Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	20	0,026	0,139	0,070	0,070	0,031	44,7
	BP068	19	0,024	0,156	0,062	0,050	0,035	56,2
	BP070	20	0,029	0,174	0,070	0,073	0,034	48,9
	BP072	21	0,030	0,131	0,068	0,058	0,031	45,4
	BP078	21	0,019	0,142	0,076	0,080	0,031	41,0
	BP082	21	0,026	0,142	0,066	0,066	0,029	44,0
	BP083	21	0,021	0,139	0,071	0,071	0,028	39,5
	BP099	11	0,023	0,101	0,048	0,032	0,029	59,34
Anterior (2014-2018)	BP036	5	0,026	0,078	0,045	0,039	0,020	43,8
	BP068	5	0,024	0,088	0,054	0,041	0,029	52,7
	BP070	5	0,036	0,115	0,066	0,058	0,033	49,5
	BP072	5	0,030	0,117	0,054	0,041	0,036	66,8
	BP078	5	0,031	0,069	0,047	0,047	0,015	32,0
	BP082	5	0,034	0,078	0,052	0,044	0,020	37,9
	BP083	5	0,035	0,092	0,057	0,044	0,026	45,7
	BP099	5	0,023	0,037	0,030	0,029	0,006	17,7
Posterior (2019)	BP036	6	0,022	0,075	0,042	0,041	0,018	43,0
	BP068	6	0,039	0,311	0,099	0,065	0,104	105
	BP070	6	0,027	0,199	0,081	0,063	0,063	78,5
	BP072	6	0,025	0,271	0,078	0,045	0,095	121
	BP078	6	0,027	0,101	0,055	0,048	0,025	45,5
	BP082	6	0,026	0,080	0,052	0,052	0,018	34,6
	BP083	6	0,030	0,084	0,053	0,050	0,020	37,2
	BP099	5	0,025	0,051	0,031	0,026	0,011	36,8

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

Tabela 9 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro bário total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Bário Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes = Depois
BP036 = BP070	BP036 = BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 > BP099	BP036 = BP099	BP099: Antes = Depois

Apesar dos resultados indicarem um aumento das concentrações médias de Ba Total após o rompimento da barragem, nas estações à jusante, em comparação com a situação pré-rompimento (Tabela 8), este aumento não foi significativo em nenhuma estação de monitoramento ($p > 0,05$; Tabela 9). Todavia, as estações localizadas mais próximas do ponto de rompimento (BP068, BP070, BP072 e BP082) foram as que apresentaram as concentrações

de Ba total após o rompimento, o que pode ser observado pelos valores máximos e médios registrados (Tabela 8).

A série histórica contendo as médias dos primeiros trimestres dos anos do período estudado pode ser vista na Figura 3, a seguir.

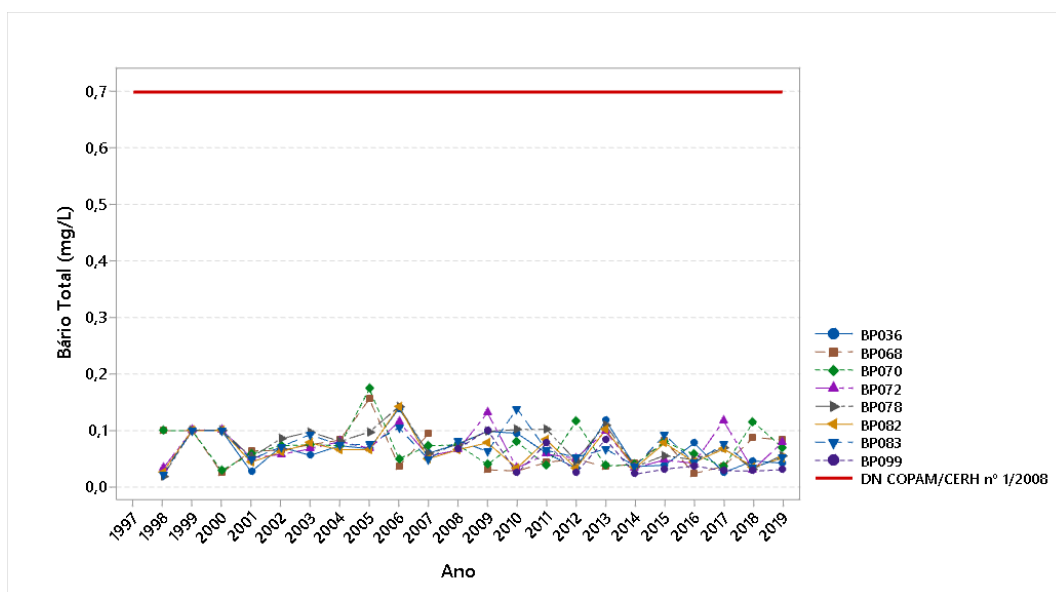


Figura 3 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para bário total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme visto na figura acima, não houve medidas de bário total acima do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 (0,7 mg/L Ba) para corpos d'água de classe 2, em toda a série histórica, tanto no período anterior como posterior ao rompimento, para todas as estações de monitoramento estudadas.

5.3. Boro Total

As estatísticas descritivas dos resultados de B Total nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5).

A Tabela 10 mostra a estatística descritiva para boro total, em cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas estudadas, para o período anterior e posterior ao rompimento da barragem. É importante ressaltar que poucos são os dados encontrados para as medidas de boro total nas estações analisadas. Não foram encontradas leituras de boro total em nenhuma das estações estudadas, para os anos de 1998 a 2005 e de 2014 a 2018, não sendo possível comparar as variações médias para os últimos cinco anos anteriores ao rompimento.

Tanto para o período anterior, quanto posterior ao rompimento da barragem, as médias de boro total coletadas nas estações de monitoramento de qualidade das águas mantiveram-se abaixo do limite de detecção dos métodos de análise utilizados (Tabela 10).

Da Tabela 10 percebe-se que após o rompimento, as estações localizadas de jusante mais próximas do local de rompimento (BP068, BP070 e BP072) foram as que apresentaram os maiores valores máximos observados para B total.

Tabela 10 – Estatística descritiva dos resultados de boro total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2006 a 2013) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Boro Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (2006-2013)	BP036	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP068	7	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP070	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP072	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP078	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP082	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP083	8	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP099	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
Posterior (2019)	BP036	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP068	6	<0,07	0,15	<0,07	<0,07	0,05	88,1
	BP070	6	<0,07	0,10	<0,07	<0,07	0,03	56,5
	BP072	6	<0,07	0,13	<0,07	<0,07	0,04	77,9
	BP078	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP082	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP083	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0
	BP099	6	<0,07	<0,07	<0,07	<0,07	0	0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

Os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para as estações estudadas encontram-se na Tabela 11.

Tabela 11– Resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro boro total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Boro Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 - BP068: NA	BP036 - BP068: NA	BP068: NA
BP036 - BP070: NA	BP036 - BP070: NA	BP070: NA
BP036 - BP072: NA	BP036 - BP072: NA	BP072: NA
BP036 - BP078: NA	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 - BP082: NA	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 - BP083: NA	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 - BP099: NA	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

Conforme demonstrado na Tabela 11, o teste estatístico não se aplicou para nenhum dos cenários estudados. Tal fato ocorreu devido à pequena quantidade de dados obtidos e porque a grande maioria dos resultados foram exatamente iguais para todas as estações (abaixo do limite de detecção).

A Figura 4 ilustra a evolução histórica das concentrações médias de boro total ao longo do período estudado.

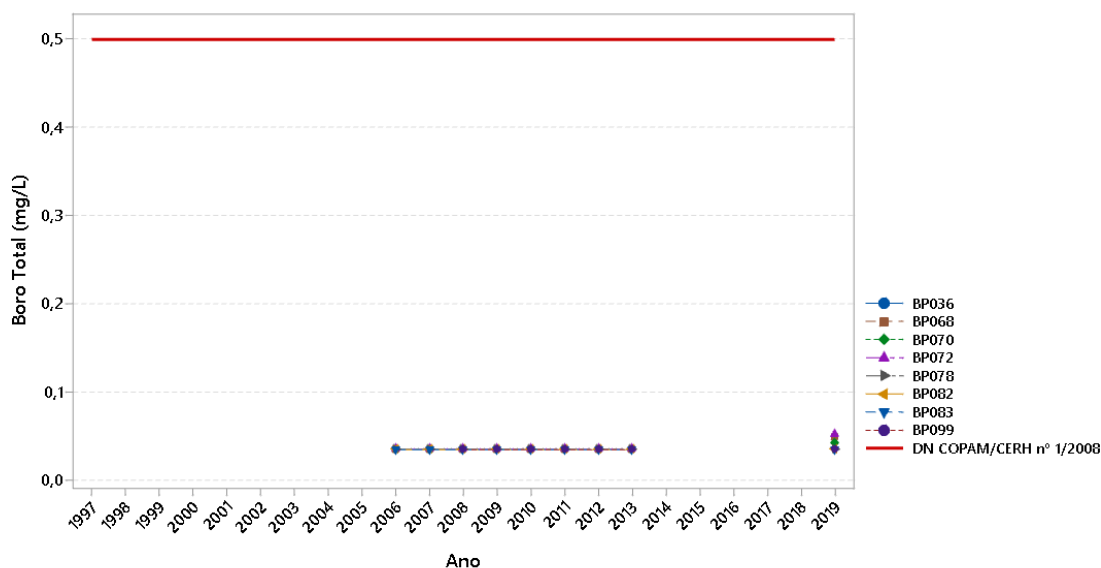


Figura 4- Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para boro total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme apresentado na figura anterior, poucos são os períodos para os quais têm-se leituras de boro total. Entretanto, em todos os primeiros trimestres dos anos para os quais se tem resultados, não foram observadas médias de B superiores ao limite legal estabelecido na DN COPAM/CERH nº 1 de 2008, igual a 0,5 mg/L B (Figura 4).

5.4. Cádmio Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Cd Total na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, conjuntamente, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva para cádmio total para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem, por estação, pode ser observada na Tabela 12. Em média, os valores encontrados permaneceram abaixo, ou muito próximos, do limite de detecção dos métodos de análise, de 0,0005 mg/L, tanto no período anterior quanto posterior ao rompimento.

Na Tabela 13 estão apresentados os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para o Cd Total.

Tabela 12 – Estatística descritiva dos resultados de cádmio total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Cádmio Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0002	57,3
	BP068	20	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0002	58,3
	BP070	21	<0,0005	0,0040	<0,0005	<0,0005	0,0008	191
	BP072	21	<0,0005	0,0050	0,0005	<0,0005	0,0010	218
	BP078	21	<0,0005	0,0070	0,0006	<0,0005	0,0015	258
	BP082	21	<0,0005	0,0030	<0,0005	<0,0005	0,0006	156
	BP083	21	<0,0005	0,0050	0,0005	<0,0005	0,0010	218
	BP099	11	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP068	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP070	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP072	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP078	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP082	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP083	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP099	5	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
Posterior (2019)	BP036	41	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP068	43	<0,0005	0,0040	<0,0005	<0,0005	0,0006	153
	BP070	42	<0,0005	0,0019	<0,0005	<0,0005	0,0003	87,0
	BP072	43	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0001	45,4
	BP078	43	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP082	48	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP083	43	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	0	0
	BP099	47	<0,0005	0,0010	<0,0005	<0,0005	0,0001	41,13

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

Tabela 13 – Resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro cádmio total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Cádmio Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 - BP068: NA	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: NA
BP036 = BP072	BP036 < BP072	BP072: NA
BP036 = BP078	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 = BP082	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 = BP083	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 - BP099: NA	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

O teste aponta que antes do rompimento da barragem não havia diferença significativa ($p > 0,05$) entre a estação à montante (BP036) e as estações subsequentes (Tabela 13). Para o período posterior ao rompimento, registrou-se um aumento significativo ($p < 0,05$) nas

concentrações médias de cádmio total nas três estações mais próximas do local do rompimento: BP068, BP070 e BP072. (Tabela 13).

Ao se analisar cada estação com ela mesma, durante os últimos cinco anos anteriores ao rompimento com o pós-rompimento, as estações, exceto BP068, não apresentaram diferenças significativas ($p > 0,05$) nas concentrações médias de cádmio total (Tabela 13).

A Figura 5 apresenta a série histórica das médias dos primeiros trimestres dos anos do período analisado, para o elemento cádmio total.

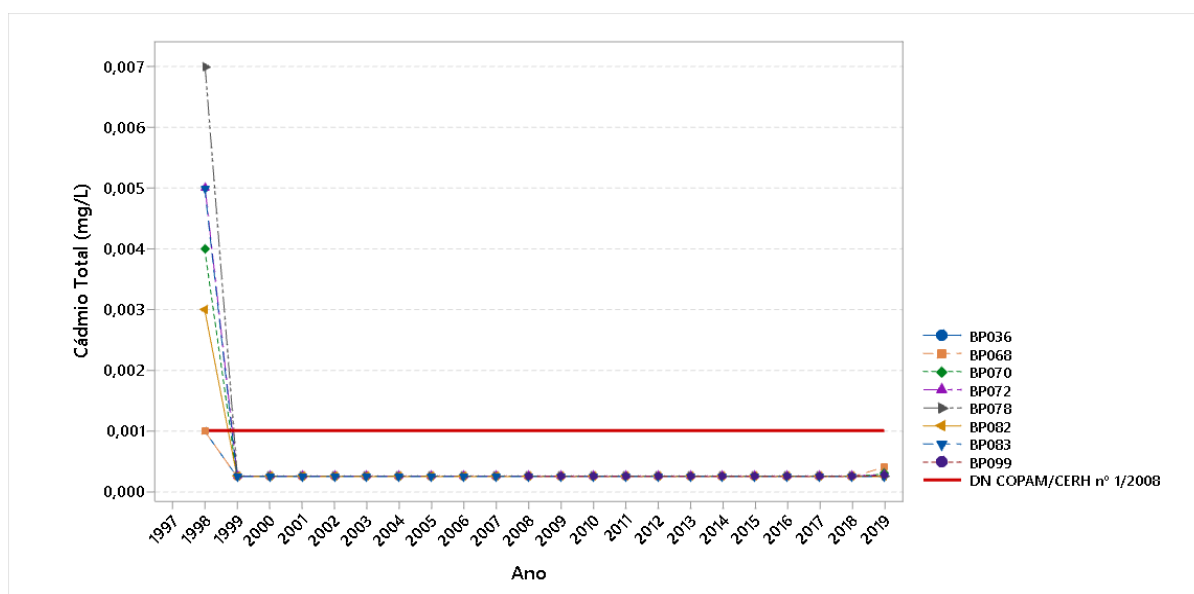


Figura 5 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para cádmio total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água

Conforme visto na Figura 5, historicamente, as médias de cádmio total se mantiveram abaixo do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 de 0,001 mg/L Cd, tanto no período anterior quanto posterior ao rompimento. Em contrapartida, as médias do primeiro trimestre de 1998 encontravam-se bem acima do limite legal estabelecido e das médias históricas observadas para os anos posteriores. É válido ressaltar que, apesar de as médias históricas terem permanecido abaixo do limite máximo permitido por legislação, os houve valores máximos observados acima deste limite (Tabela 12), principalmente para as estações localizadas mais próximas do ponto de rompimento (BP068, BP070, BP072).

5.5. Chumbo Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Pb Total nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, aparentemente, após o rompimento da barragem, pois foi registrado maior concentração média desta variável nas estações à jusante

em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e nas estações à jusante em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 14 abaixo apresenta a estatística descritiva para chumbo total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem. O teste estatístico de *Wilcoxon* pareado para o chumbo total está apresentado na Tabela 15.

Tabela 14 – Estatística descritiva dos resultados de chumbo total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Chumbo Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,005	0,050	0,005	<0,005	0,010	195
	BP068	20	<0,005	0,030	<0,005	<0,005	0,006	142
	BP070	21	<0,005	0,040	0,005	<0,005	0,008	156
	BP072	21	<0,005	0,050	0,006	<0,005	0,011	173
	BP078	21	<0,005	0,080	0,007	<0,005	0,017	255
	BP082	21	<0,005	0,040	0,005	<0,005	0,008	179
	BP083	21	<0,005	0,060	0,006	<0,005	0,013	215
	BP099	11	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0	0
	BP068	5	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0	0
	BP070	5	<0,005	0,007	0,003	<0,005	0,002	63,0
	BP072	5	<0,005	0,018	0,006	<0,005	0,007	123
	BP078	5	<0,005	0,007	0,003	<0,005	0,002	57,3
	BP082	5	<0,005	0,009	0,004	<0,005	0,003	79,5
	BP083	5	<0,005	0,010	0,004	<0,005	0,003	82,5
	BP099	5	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0	0
Posterior (2019)	BP036	41	<0,005	0,015	0,005	<0,005	0,004	71,8
	BP068	43	<0,005	0,147	0,017	0,010	0,024	142
	BP070	42	<0,005	0,090	0,012	0,008	0,016	129
	BP072	45	<0,005	0,038	0,007	<0,005	0,008	114
	BP078	45	<0,005	0,012	0,005	<0,005	0,003	59,5
	BP082	56	<0,005	0,036	0,006	<0,005	0,006	93,5
	BP083	43	<0,005	0,017	0,005	<0,005	0,004	69,1
	BP099	60	<0,005	0,011	<0,005	<0,005	0,002	64,8

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

O teste estatístico de *Wilcoxon* pareado mostrou que, no período anterior ao rompimento da barragem, não haviam diferenças significativas nas concentrações de Pb Total nas estações localizadas à jusante em comparação com a estação à montante (BP036) ($p > 0,05$; Tabela 16; Tabela 15). No período posterior ao rompimento, foram registradas elevações significativas de Pb Total nas duas primeiras estações localizadas à jusante ($p < 0,05$; Tabela 14; Tabela 15).

Além disto, os valores médios de Pb Total no pós-rompimento apresentaram-se superiores aos registrados no período pré-rompimento nas estações localizadas à jusante da barragem ($p < 0,05$; Tabela 14; Tabela 15).

Tabela 15 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro chumbo total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Chumbo Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes < Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes < Depois
BP036 = BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes < Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes < Depois
BP036 = BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes < Depois

A Figura 6 apresenta a série histórica das medidas de chumbo total para o primeiro trimestre dos anos que compõem o período analisado neste estudo.

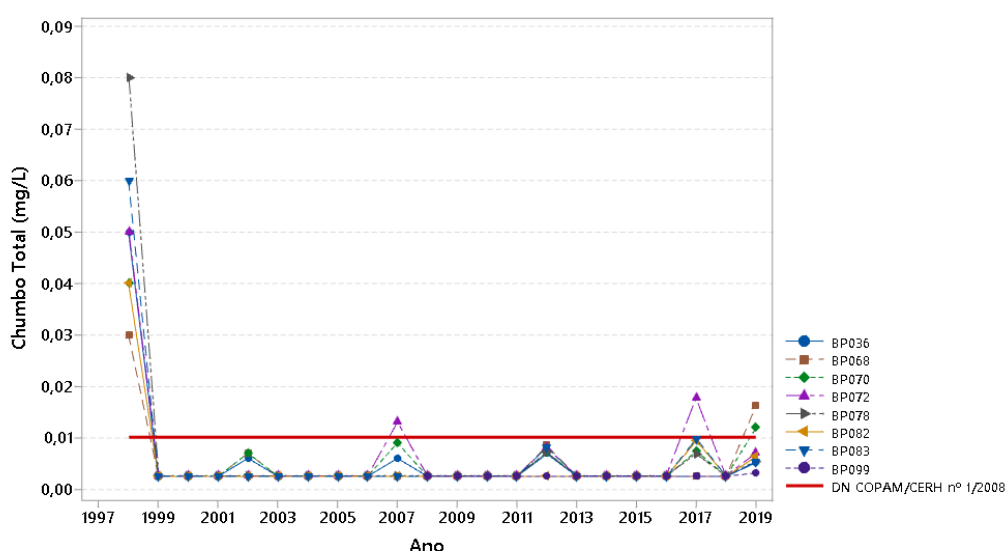


Figura 6 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para chumbo total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Com base na Figura 6 é possível observar que, historicamente, as concentrações de chumbo total encontravam-se abaixo do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 0,01 mg/L Pb, à exceção dos anos de 1998, 2007, 2017 e 2019, para os quais algumas estações apresentaram valores superiores ao limite legal. Em 2019 (pós-rompimento), apenas as estações BP068 e BP070, localizadas mais próximas do local de rompimento, apresentaram valores superiores ao limite preconizado pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para o primeiro trimestre do ano. Possivelmente este elemento está associado com a mineração de ouro histórica no Quadrilátero Ferrífero, uma vez que Pb ocorre naturalmente nas rochas hospedeiras da mineralização do ouro associadas a veias ricas de sulfeto, sendo expostas durante a exploração do minério de ouro (HATJE et al, 2017; RODRIGUES et al, 2013). Desta forma, considerando a possibilidade deste elemento ser disponibilizado no ambiente por meios de depósitos naturais

relacionados a processos geológicos locais, estas concentrações mais elevadas após o rompimento podem ter sido registradas devido ao desprendimento de partículas depositadas no fundo e/ou leito do rio, que possivelmente deslocaram-se para a coluna d'água devido à força da lama liberada durante o rompimento (RODRIGUES et al, 2013).

5.6. Cianeto Livre

As estatísticas descritivas dos resultados de Cianeto Livre na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 16, a seguir, apresenta a estatística descritiva para o parâmetro cianeto livre, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem, em cada uma das estações de monitoramento analisadas. É relevante mencionar que o monitoramento deste elemento teve início em 2010, em todas as estações de selecionadas para este estudo.

Conforme apresentado na tabela a seguir, a maioria dos resultados de Cianeto Livre encontraram-se abaixo do limite de detecção dos métodos de análise (0,002 mg/L) (Tabela 16). Desta forma, não foi possível aplicar o teste de *Wilcoxon* pareado para a maioria das estações (Tabela 17).

Tabela 16 – Estatística descritiva dos resultados de cianeto livre nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2010 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Cianeto Livre (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (2010-2018)	BP036	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0018	93,4
	BP068	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0018	93,4
	BP070	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0018	86,6
	BP072	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0017	86,6
	BP078	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0017	86,6
	BP082	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0017	86,6
	BP083	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0018	93,4
	BP099	9	<0,002	0,005	0,002	<0,002	0,0018	93,4
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP068	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP070	5	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	37,3
	BP072	5	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	37,3
	BP078	5	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	37,3
	BP082	5	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	37,3
	BP083	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP099	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Posterior (2019)	BP036	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP068	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP070	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP072	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP078	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP082	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP083	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP099	4	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

Tabela 17 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Cianeto Livre, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Cianeto Livre		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 - BP068: NA	BP036 - BP068: NA	BP068: NA
BP036 = BP070	BP036 - BP070: NA	BP070: NA
BP036 = BP072	BP036 - BP072: NA	BP072: NA
BP036 = BP078	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 = BP082	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 - BP083: NA	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 - BP099: NA	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

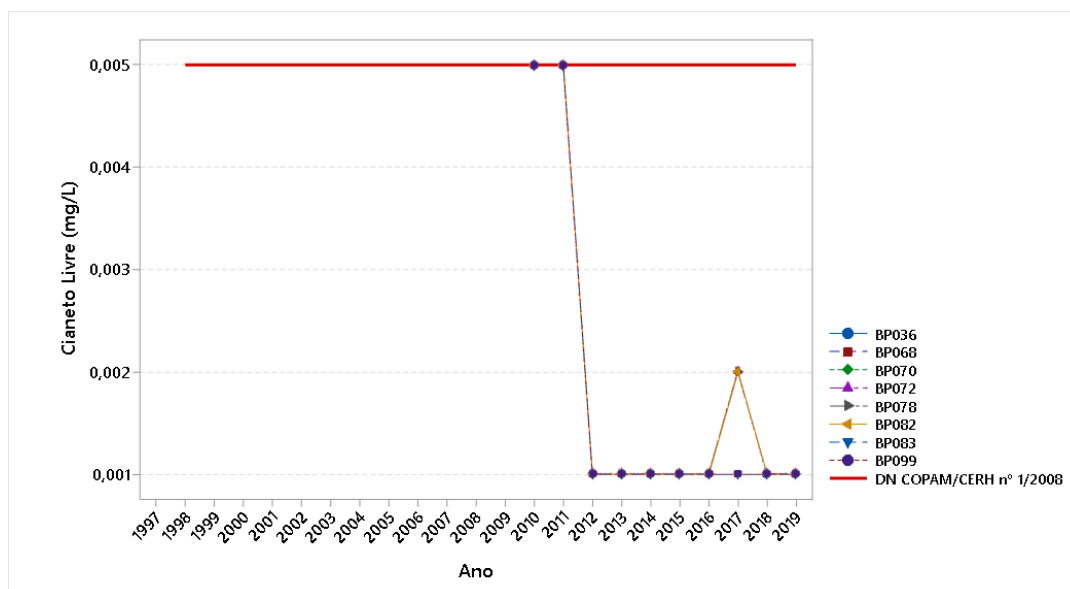


Figura 7 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para cianeto livre, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme apresentado na Figura 7, nenhuma média de cianeto livre para os primeiros trimestres dos anos que compõem esta série histórica estiveram acima do limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 0,05 mg/L CN. Entretanto, os picos observados em 2010, 2011 e 2017 podem estar relacionados com o lançamento de efluentes industriais no rio Paraopeba.

5.7. Cobre Dissolvido

As estatísticas descritivas dos resultados de Cu Dissolvido na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações médias desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, conjuntamente, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

O monitoramento da variável cobre dissolvido teve início em 2006. Sendo assim, a estatística descritiva para esse elemento para o período anterior ao rompimento abrange os anos de 2006 a 2018 e pode ser vista na Tabela 18, a seguir.

Tabela 18 – Estatística descritiva dos resultados de cobre dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (2006 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Cobre Dissolvido (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (2006-2018)	BP036	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP068	12	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP070	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP072	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP078	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP082	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP083	13	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP099	11	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP068	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP070	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP072	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP078	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP082	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP083	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP099	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Posterior (2019)	BP036	41	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP068	43	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,001	29,1
	BP070	43	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,001	29,1
	BP072	44	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,001	37,3
	BP078	44	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,001	49,5
	BP082	50	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,001	55,3
	BP083	42	<0,004	0,009	<0,004	<0,004	0,002	63,8
	BP099	59	<0,004	0,034	<0,004	<0,004	0,004	149

*Número de observações; **Coeficiente de Variação

No período anterior ao rompimento, todos valores de cobre dissolvido mantiveram-se abaixo do limite de detecção da metodologia de análise (Tabela 18). No entanto, após o rompimento da barragem, foram registrados alguns valores máximos superiores ao limite de detecção para esta variável (Tabela 18).

A Tabela 19 apresenta os resultados do teste estatístico de *Wilcoxon* pareado para cobre dissolvido. Devido ao elevado número de resultados abaixo do limite de detecção, o teste não foi aplicado em diversas comparações. Para o período após o rompimento, apenas as estações BP078, BP082, BP083 e BP099 apresentaram aumento significativo nas concentrações de Cu Total quando comparadas com a estação à montante, BP036 ($p < 0,05$; Tabela 18; Tabela 19).

Quanto à comparação dos últimos cinco anos pré-rompimento com o pós-rompimento, para uma mesma estação, as mesmas estações localizadas mais a jusante do ponto de rompimento da barragem (BP078, BP082, BP083 e BP099) apresentaram aumento significativo nos níveis de Cu Total ($p < 0,05$; Tabela 18; Tabela 19).

Tabela 19 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Cobre Dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Cobre Dissolvido		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 - BP068: NA	BP036 - BP068: NA	BP068: NA
BP036 - BP070: NA	BP036 - BP070: NA	BP070: NA
BP036 - BP072: NA	BP036 - BP072: NA	BP072: NA
BP036 - BP078: NA	BP036 < BP078	BP078: Antes < Depois
BP036 - BP082: NA	BP036 < BP082	BP082: Antes < Depois
BP036 - BP083: NA	BP036 < BP083	BP083: Antes < Depois
BP036 - BP099: NA	BP036 < BP099	BP099: Antes < Depois

NA – Não Aplicável

A média histórica dos resultados de Cu Total para os primeiros trimestres dos anos do período analisado está apresentada na Figura 8.

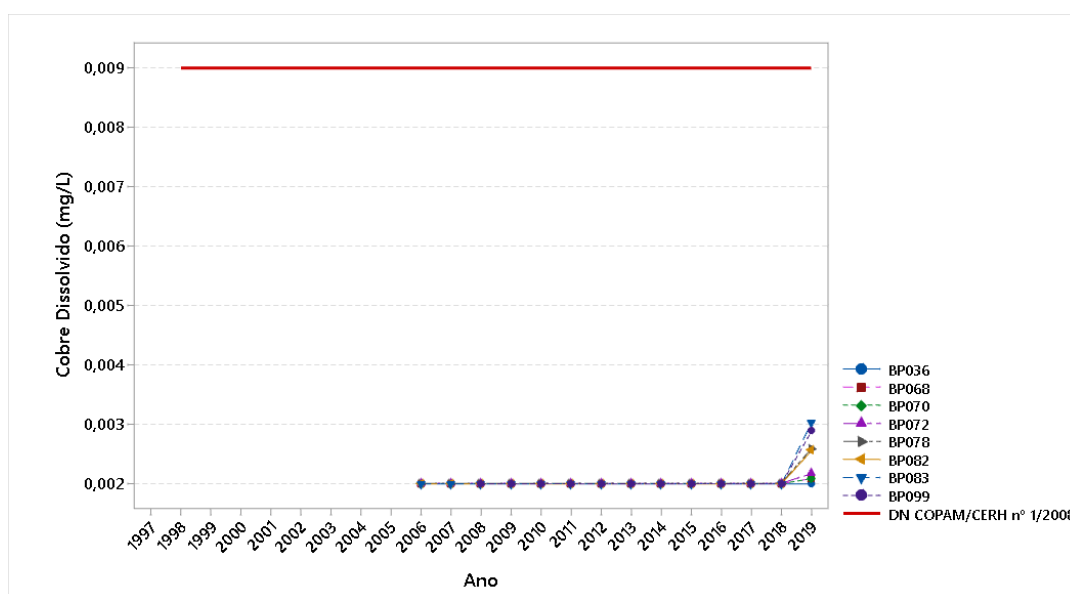


Figura 8 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Cobre Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Uma vez que o monitoramento do elemento em questão iniciou-se em 2006, os dados da série histórica apresentada no gráfico anterior iniciam-se neste ano para todas as estações, com exceção da estação BP099, a qual possui dados apenas a partir de 2008, para todos as variáveis analisados. Da análise do gráfico, observa-se que as médias dos primeiros trimestres de 2006 a 2019 encontram-se abaixo do limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 0,009 mg/L Cu, em todas as estações observadas. No entanto, percebe-se que houve um aumento na média de Cobre Dissolvido na maioria das estações de monitoramento, à exceção das estações BP036 (montante) e BP070, para o primeiro trimestre de 2019, que representa o cenário pós-rompimento (Figura 8). Quanto aos valores máximos observados, no período pós-rompimento, a estação localizada mais à jusante do ponto de rompimento (BP099) apresentou

a leitura máxima (0,034 mg/L Cu) acima do limite legal permitido e a estação BP083, próxima desta, apresentou leitura máxima igual a este limite (0,009 mg/L Cu) (Tabela 18).

5.8. Condutividade Elétrica in loco

As estatísticas descritivas dos resultados de Condutividade Elétrica mostraram maiores resultados nas estações à jusante em comparação com a estação à montante, tanto no período pré-rompimento (Tabelas 1 e 2) e quanto após o rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5). Os níveis dessa variável permaneceram praticamente os mesmos nas estações localizadas à jusante, durante todo o período de estudo (Tabelas 3 e 5).

Os resultados da estatística descritiva da Condutividade Elétrica por estação estão apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Estatística descritiva dos resultados de condutividade elétrica in loco nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Condutividade Elétrica in Loco ($\mu\text{S}/\text{cm}$)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	36,2	117	57,4	53,7	18,8	32,7
	BP068	20	35,7	88,8	53	51,6	13,4	25,3
	BP070	21	40,1	121	63,4	55,7	20,9	32,9
	BP072	21	46,9	145	72,6	62,4	25,2	34,7
	BP078	21	47,4	114	71,6	68,4	17,4	24,4
	BP082	21	39,4	108	67,2	64,5	18,3	27,2
	BP083	21	45,9	112	71,7	69,7	17,1	23,9
	BP099	11	50,1	93,1	67,3	62,4	13,6	20,2
Anterior (2014-2018)	BP036	5	62,0	117	82,6	75,9	22,9	27,7
	BP068	5	53,3	88,8	69,6	67,8	14,9	21,4
	BP070	5	73,1	121	95,1	98,6	18,8	19,8
	BP072	5	90,2	145	110	101	23,2	21,1
	BP078	5	77,6	114	95,8	102	15,3	16,0
	BP082	5	78,5	108	92,9	88,6	11,6	12,5
	BP083	5	72,9	112	94,9	101	15,8	16,6
	BP099	5	54,2	93,1	77,0	78,8	14,7	19,1
Posterior (2019)	BP036	41	42,8	104	72,7	70,8	13,4	18,5
	BP068	44	49,7	116	72,8	68,7	14,8	20,3
	BP070	42	40,1	128	86,2	84,1	18,2	21,1
	BP072	45	11,0	150	96,1	91,0	23,8	24,7
	BP078	45	77,1	131	101	97,6	15,1	14,9
	BP082	50	56,1	127	95,8	93,7	16,9	17,6
	BP083	43	69,2	137	101	97,7	18,0	17,8
	BP099	60	31,6	128	86,3	87,6	17,3	20,0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Encontram-se na Tabela 21 os resultados do teste *Wilcoxon* pareado para condutividade elétrica in loco.

Tabela 21 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Condutividade Elétrica in loco, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Condutividade Elétrica in loco		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 > BP068	BP036 = BP068	BP068: Antes = Depois
BP036 < BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 < BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 < BP078	BP036 < BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 < BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 < BP083	BP036 < BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 < BP099	BP099: Antes = Depois

Os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado confirmam que, de um modo geral, a Condutividade Elétrica média foi maior nas estações localizadas à jusante quando comparadas com a estação à montante, BP036, antes e após o rompimento da barragem ($p < 0,05$; Tabela 20; Tabela 21).

Ao analisar os últimos cinco anos do pré-rompimento (2014-2018) com o pós-rompimento, observa-se que nenhuma estação apresentou diferença significativa quando comparada com ela mesma ($p > 0,05$; Tabela 21). Este fato pode ser verificado na Tabela 20, uma vez que os valores permaneceram próximos.

A Figura 9 apresenta a série histórica para condutividade elétrica in loco durante o período analisado, em cada uma das estações de monitoramento estudadas. Uma vez que este parâmetro não é previsto pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, não foi verificado seu atendimento legal.

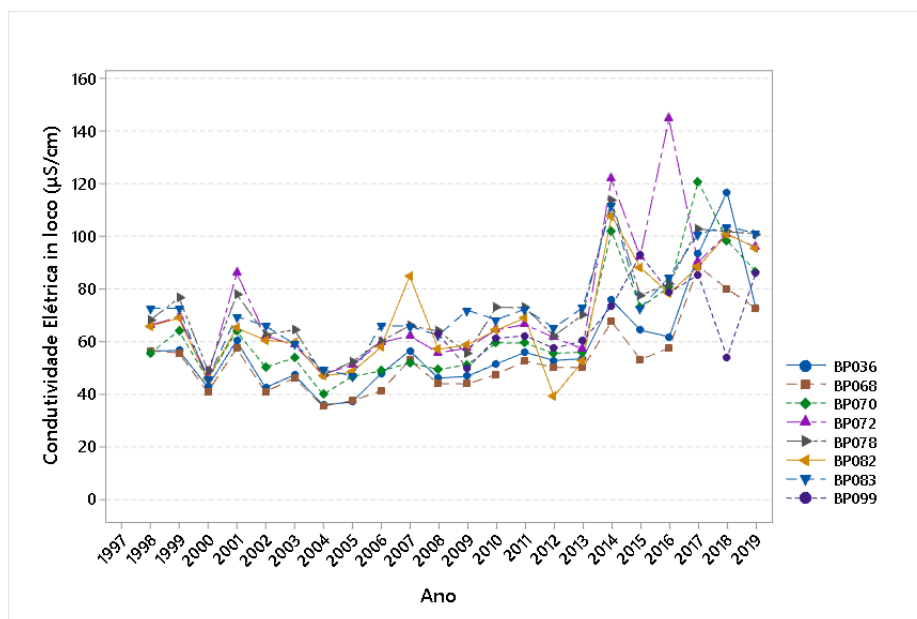


Figura 9 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Condutividade Elétrica in loco, em cada uma das estações de monitoramento.

Conforme observado na Fig. 9, uma tendência de aumento dos valores médios da variável condutividade elétrica in loco a partir de 2014, em todas as estações, conjuntamente.

5.9. Cromo Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Cr Total na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva para o elemento cromo total está apresentada na Tabela 22. A maioria dos valores de cromo total se apresentaram inferiores ao limite de detecção (0,04 mg/L) do método de análise adotados, para todo o período analisado (Tabela 22). Desta forma, não foi possível aplicar o teste de *Wilcoxon* pareado para a maioria das estações (Tabela 23).

Tabela 22 – Estatística descritiva dos resultados de cromo total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Cromo Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	75,0
	BP068	20	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	72,2
	BP070	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	71,5
	BP072	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	75,0
	BP078	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	71,5
	BP082	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	75,0
	BP083	21	<0,04	0,10	<0,04	<0,04	0,02	71,5
	BP099	11	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP068	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP070	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP072	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP078	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP082	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP083	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP099	5	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
Posterior (2019)	BP036	21	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP068	23	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP070	22	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP072	23	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP078	23	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP082	23	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP083	23	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0
	BP099	21	<0,04	<0,04	<0,04	<0,04	0	0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Tabela 23 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro cromo total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Cromo Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 - BP068: NA	BP068: NA
BP036 = BP070	BP036 - BP070: NA	BP070: NA
BP036 - BP072: NA	BP036 - BP072: NA	BP072: NA
BP036 = BP078	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 - BP082: NA	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 = BP083	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 - BP099: NA	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

A Figura 10 representa a série histórica de Cr Total durante o período analisado, em cada uma das estações que compõem este estudo.

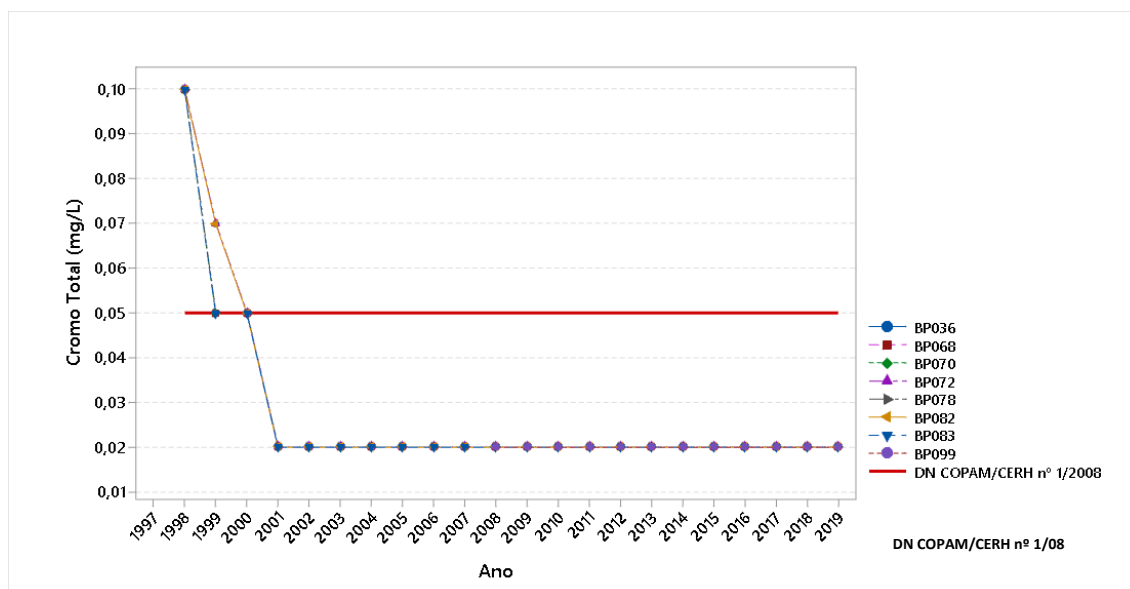


Figura 10 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Cromo Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme gráfico acima (Fig. 10), é possível observar que nos dois primeiros anos da série histórica (1998 e 1999), as medidas de cromo total encontravam-se acima do limite permitido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, mas que, a partir do ano 2000, houve uma normalização dos valores, que então se encontram abaixo do limite legal estabelecido, de 0,05 mg/L Cr.

5.10. Fenóis Totais

As estatísticas descritivas dos resultados de Fenóis Totais na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 24 apresenta a estatística descritiva das concentrações de fenóis totais para as estações de monitoramento de qualidade das águas estudadas, durante o período pré- e pós-rompimento da barragem. Observa-se que a concentração média desta variável se manteve abaixo dos limites de detecção, nos três cenários estudados, para todas as estações de monitoramento.

A análise estatística, realizada através do teste Wilcoxon pareado (Tabela 25), confirma que não há diferença significativa ($p > 0,05$) entre a estação de monitoramento de qualidade das águas à montante em comparação com as estações à jusante ($p > 0,05$). Para os

demais dados, o teste não foi aplicado. Conforme explanado anteriormente, isto se deve ao fato do grande número de resultados abaixo do limite de detecção.

Tabela 24 – Estatística descritiva dos resultados de fenóis totais nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Fenóis Totais (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,001	0,003	<0,002	<0,002	0,0010	74,3
	BP068	20	<0,001	0,003	<0,002	<0,002	0,0006	71,4
	BP070	21	<0,001	0,003	<0,002	<0,002	0,0006	71,4
	BP072	21	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	0,0002	36,2
	BP078	21	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	0,0002	36,2
	BP082	21	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	0,0002	36,2
	BP083	21	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	0,0002	36,2
	BP099	11	<0,001	<0,002	<0,002	<0,002	0,0003	30,8
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP068	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP070	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP072	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP078	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP082	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP083	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP099	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
Posterior (2019)	BP036	6	<0,002	0,002	<0,002	<0,002	0,0004	35,0
	BP068	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP070	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP072	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP078	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP082	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP083	6	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0
	BP099	5	<0,002	<0,002	<0,002	<0,002	0	0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Ressalta-se que o limite de detecção para fenóis totais mudou ao longo do período analisado. Nos anos de 1998 a 2011, este valor era de 0,001 mg/L. A partir de 2012, este valor foi dobrado, sendo o LD considerado foi igual a 0,002 mg/L. Sendo assim, para o período anterior ao rompimento, os valores mínimos observados nas estações analisadas foram inferiores ao LD, de 0,001 mg/L.

Tabela 25 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro fenóis totais, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Fenóis Totais		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 - BP068: NA	BP068: NA
BP036 = BP070	BP036 - BP070: NA	BP070: NA
BP036 = BP072	BP036 - BP072: NA	BP072: NA
BP036 = BP078	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 = BP082	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 = BP083	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 = BP099	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

A Figura 11 representa visualmente as leituras médias de fenóis totais em cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas selecionadas para este estudo, ao longo do período analisado.

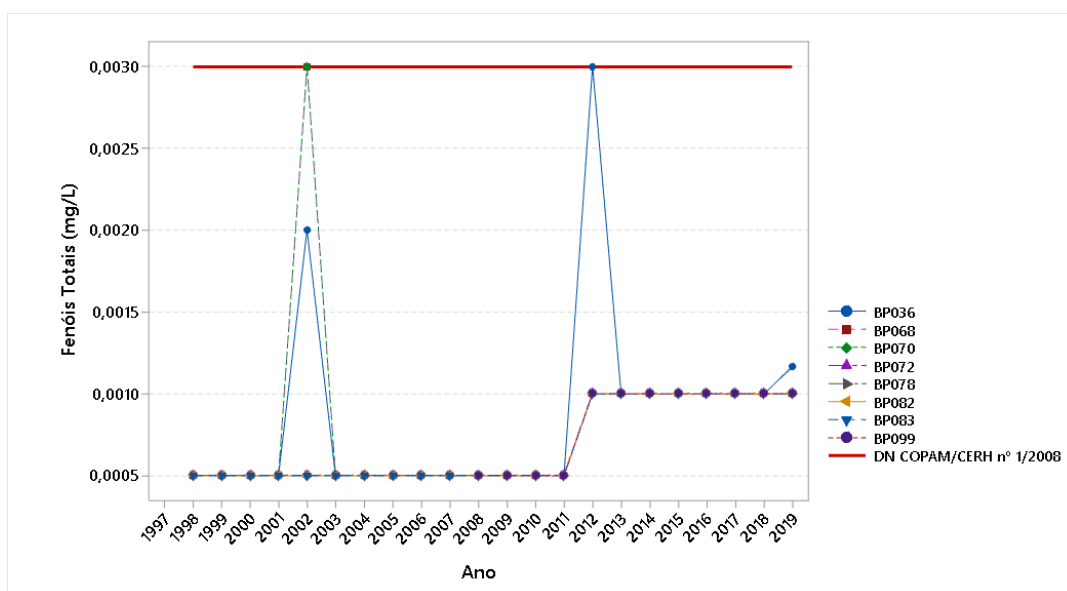


Figura 11 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Fenóis Totais, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme visto na figura acima, as médias de fenóis totais somente atingiram o limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 0,003 mg/L C_6H_5OH , nos primeiros trimestres de 2002 (BP070) e de 2012 (BP036). Para os demais anos, inclusive após o rompimento, os valores médios desta variável mantiveram-se abaixo do limite legal permitido.

5.11. Ferro Dissolvido

As estatísticas descritivas dos resultados de Fe dissolvido nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação manteve-se, aparentemente, após o

rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5). No entanto, ao comparar os resultados antes e após o rompimento, apenas nas estações à jusante, foi verificado um aumento os valores médios desta variável no período posterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 26 apresenta a estatística descritiva para ferro dissolvido para as estações de monitoramento de qualidade das águas selecionadas para o presente estudo, anterior e posteriormente ao rompimento da barragem. Os resultados do teste *Wilcoxon* estão representados na Tabela 27. Conforme esperado, houve um aumento nas médias de ferro dissolvido nas estações à jusante posteriormente ao rompimento da barragem, em comparação com o período anterior ($p < 0,05$; Tabela 26; Tabela 27). Isto provavelmente ocorreu devido a mina se localizar na região do Quadrilátero Ferrífero, cujas características geológicas são marcadas pela presença significativa de metais como o ferro e o ouro, fazendo com que esta variável esteja diretamente relacionada com a mineração e beneficiamento de minério de ferro.

Conforme mostrado na estatística descritiva, anteriormente e posteriormente ao rompimento da barragem não havia diferença significativa nas concentrações de Fe dissolvido entre a maioria das estações à jusante comparativamente com a estação à montante ($p > 0,05$; Tabela 26; Tabela 27).

Tabela 26 – Estatística descritiva dos resultados de ferro dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Ferro Dissolvido (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,03	0,64	0,23	0,23	0,17	73,6
	BP068	20	<0,03	0,53	0,23	0,23	0,16	72,2
	BP070	21	<0,03	0,66	0,23	0,19	0,19	79,6
	BP072	21	<0,03	0,77	0,24	0,21	0,20	81,3
	BP078	21	<0,03	1,19	0,22	0,21	0,25	113
	BP082	21	<0,03	0,67	0,24	0,20	0,20	83,7
	BP083	21	<0,03	0,56	0,19	0,19	0,15	78,8
	BP099	11	<0,03	0,39	0,11	0,07	0,12	105
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,03	0,64	0,22	0,02	0,29	133
	BP068	5	<0,03	0,39	0,16	0,02	0,20	124
	BP070	5	<0,03	0,49	0,17	0,02	0,22	132
	BP072	5	<0,03	0,50	0,18	0,02	0,24	128
	BP078	5	<0,03	1,19	0,30	0,02	0,51	167
	BP082	5	<0,03	0,38	0,13	0,02	0,16	129
	BP083	5	<0,03	0,26	0,10	0,02	0,12	118
	BP099	5	<0,03	0,39	0,12	0,02	0,17	135
Posterior (2019)	BP036	42	0,31	1,22	0,58	0,55	0,17	30,1
	BP068	44	<0,03	1,24	0,48	0,49	0,30	63,3
	BP070	43	<0,03	1,16	0,44	0,41	0,31	71,2
	BP072	46	0,06	1,27	0,52	0,51	0,31	58,6
	BP078	46	0,15	1,82	0,57	0,42	0,39	68,8
	BP082	51	0,07	1,27	0,57	0,53	0,33	59,0
	BP083	45	0,11	1,42	0,62	0,53	0,38	61,9
	BP099	60	0,12	1,00	0,48	0,43	0,22	46,4

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Tabela 27 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro ferro dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Ferro Dissolvido		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 = BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 > BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes < Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes < Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes < Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes < Depois
BP036 > BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes < Depois

A série histórica de ferro dissolvido no período analisado está demonstrada na Figura

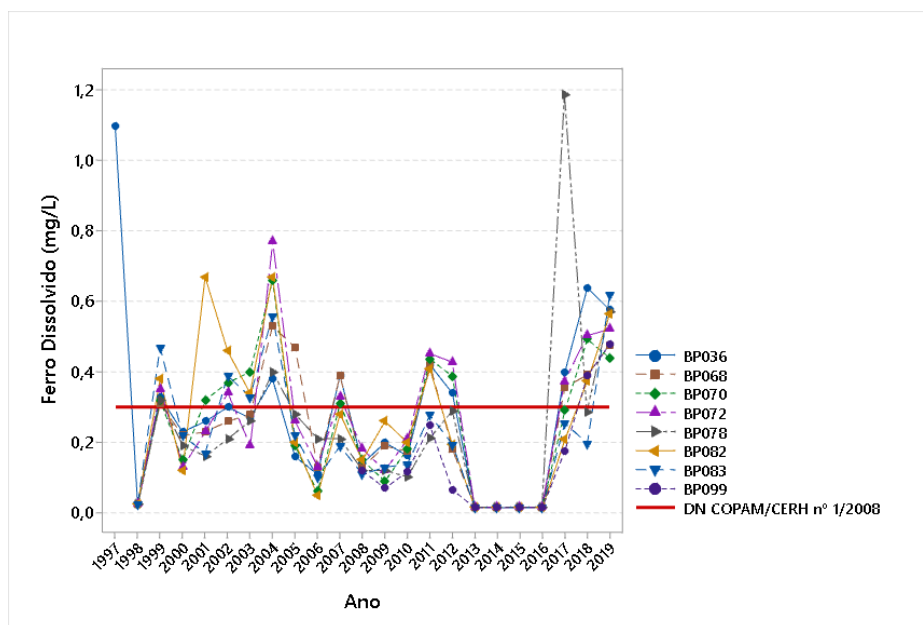


Figura 12 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Ferro Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme visto na Figura 12, os valores médios de ferro dissolvido ultrapassaram o limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 (0,3 mg/L Fe) em diversos períodos, inclusive antes do rompimento. Isto pode estar relacionado às características geológicas da região, já que o Quadrilátero Ferrífero é uma área rica em ferro e manganês, devido aos processos climatológicos característicos de ambientes subtropicais associados com a atividade minerária e atividades da indústria de aço presentes na região (COSTA et al, 2018). Assim como para alumínio dissolvido, esta elevação dos valores de ferro dissolvido pode estar associada ao aumento do carreamento de partículas, considerando que o primeiro trimestre do ano é marcado por uma estação chuvosa (ANA, 2012). No entanto, em 2019, os valores médios de Fe Dissolvido podem ter sido influenciados pelo rompimento da barragem, corroborando para que os valores médios de todas as estações ficassem acima do limite legal, no primeiro trimestre de 2019. Gomes et al (2011), ao estudarem o rejeito gerado em beneficiamento de minério de ferro, apontaram a presença de ferro em valores significativos, o que justifica o esperado aumento dos níveis deste elemento após o rompimento da barragem.

5.12. Manganês Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Mn Total nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, aparentemente, após o rompimento da barragem, pois foi registrada maior concentração média desta variável nas estações à jusante

em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e também nas estações à jusante em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva por estação para manganês total está apresentada na Tabela 28. Os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado estão apresentados na Tabela 29.

O teste estatístico confirma que, de uma forma geral, anteriormente ao rompimento, os níveis de Mn Total não variaram significativamente ao longo do rio ($p > 0,05$, Tabela 29). Apenas as estações mais distantes do ponto de rompimento (BP082, BP083 e BP099) apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) dos valores médios de manganês total comparada à estação à montante. Após o rompimento, foi evidenciado que, nas três primeiras estações logo à jusante da barragem, os valores médios de manganês foram superiores aos registrados na estação BP036 (montante) ($p < 0,05$, Tabela 28; Tabela 29). Ao analisar os dados dos últimos cinco anos antes do rompimento (2014-2018) com o período posterior ao acidente, para uma mesma estação, apenas as duas primeiras estações (BP068 e BP070) apresentaram diferença significativa ($p < 0,05$) entre o período anterior e posterior ao rompimento, com um aumento das medidas no pós-rompimento. As demais estações não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$) entre os períodos anterior e posterior ao acidente, quando comparadas com elas mesmas (Tabela 28; Tabela 29).

Tabela 28 – Estatística descritiva dos resultados de manganês total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Manganês Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,2	1,2	0,6	0,6	0,28	46,4
	BP068	20	<0,2	1,7	0,6	0,5	0,4	68,9
	BP070	21	0,2	1,5	0,6	0,4	0,3	58,6
	BP072	21	<0,2	1,7	0,6	0,5	0,4	71,0
	BP078	21	<0,2	1,3	0,7	0,4	0,3	62,4
	BP082	21	<0,2	1,0	0,4	0,3	0,3	67,3
	BP083	21	<0,2	0,9	0,4	0,3	0,2	61,5
	BP099	11	<0,2	0,7	<0,2	<0,2	0,2	145
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,2	1,2	0,6	0,4	0,4	73,1
	BP068	5	<0,2	1,3	0,5	0,3	0,5	92,2
	BP070	5	<0,2	1,1	0,5	0,3	0,4	82,6
	BP072	5	<0,2	1,7	0,5	0,3	0,7	127
	BP078	5	<0,2	0,3	0,2	0,3	<0,2	60,0
	BP082	5	<0,2	0,7	0,4	0,4	0,3	68,2
	BP083	5	<0,2	0,5	0,3	0,2	0,2	79,5
	BP099	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	72,2
Posterior (2019)	BP036	42	<0,2	2,6	0,5	0,4	0,4	89,6
	BP068	44	0,7	46,3	4,2	1,9	7,3	175
	BP070	43	0,2	24,8	2,7	1,4	4,2	153
	BP072	46	<0,2	10,3	1,3	0,6	2,0	162
	BP078	46	<0,2	1,7	0,4	0,5	0,4	90,9
	BP082	51	<0,2	7,4	0,9	0,6	1,2	139
	BP083	44	<0,2	3,9	0,5	0,3	0,7	133
	BP099	61	<0,2	3,8	<0,2	<0,2	0,5	365

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Tabela 29 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro manganês total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Manganês Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 > BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 > BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 > BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes = Depois

Da Tabela 29 observa-se que, nas estações localizadas mais próximas ao local de rompimento da barragem (BP068, BP070 e BP072), os valores de jusante foram significativamente superiores aos observados na estação de montante. Quanto aos valores máximos, destaca-se o encontrado na estação BP068, de 46,3 mg/L Mn.

A Figura 13 apresenta o gráfico com a série histórica das médias de manganês total obtidas em cada uma das estações de monitoramento selecionadas, para os primeiros trimestres dos anos do período analisado.

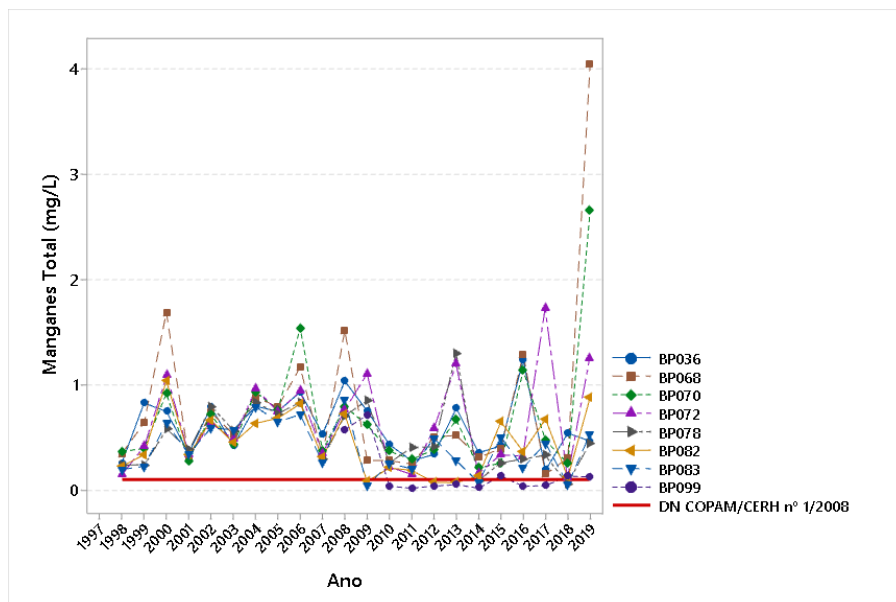


Figura 13 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Manganês Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Do gráfico acima tem-se que, historicamente, os valores de manganês total se encontravam acima do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, igual a 0,1 mg/L Mn em praticamente todo o período estudado. No entanto, o gráfico mostra uma elevação mais acentuada na concentração deste parâmetro nas duas primeiras estações localizadas logo à jusante da barragem, em 2019. Esta elevação pode ter sido influenciada pelo evento do rompimento da barragem. No entanto, assim como o ferro, o manganês também é um elemento característico da geologia da região (COSTA et al, 2018), fator que corrobora para as altas concentrações de manganês total encontrados no banco de dados, durante todo o período analisado, conforme esperado.

5.13. Mercúrio Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Hg Total na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações médias desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, conjuntamente, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva para mercúrio total por estação está apresentada na Tabela 30, para cada uma das estações, para o período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 30 – Estatística descritiva dos resultados de mercúrio total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Mercúrio Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP068	20	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP070	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP072	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP078	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP082	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP083	21	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP099	11	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP068	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP070	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP072	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP078	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP082	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP083	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP099	5	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
Posterior (2019)	BP036	41	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0
	BP068	43	<0,2	4,2	0,3	<0,2	0,7	206
	BP070	42	<0,2	1,8	0,2	<0,2	0,3	156
	BP072	45	<0,2	0,8	<0,2	<0,2	0,1	102
	BP078	45	<0,2	0,4	<0,2	<0,2	0,1	58,1
	BP082	50	<0,2	0,8	<0,2	<0,2	0,1	86,7
	BP083	43	<0,2	0,8	<0,2	<0,2	0,1	95,0
	BP099	61	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0	0

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Na tabela anterior observa-se que grande parte dos resultados de mercúrio total se encontraram abaixo do limite de detecção (0,2 mg/L).

De modo geral, o teste estatístico *Wilcoxon* pareado mostra que, anteriormente ao rompimento da barragem, não havia diferença significativa nos níveis de Hg Total entre a estação à montante e as estações localizadas à jusante ($p > 0,05$; Tabela 30, Tabela 31). Após o rompimento, o teste apontou que as estações mais próximas do ponto de rompimento, estações BP068, BP070 e BP072 apresentaram aumento significativo nas concentrações de Hg Total quando comparadas com a estação à montante ($p < 0,05$; Tabela 30, Tabela 31).

Tabela 31 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro mercúrio total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Mercúrio Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 - BP068: NA	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 - BP070: NA	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 - BP072: NA	BP036 < BP072	BP072: Antes < Depois
BP036 - BP078: NA	BP036 - BP078: NA	BP078: NA
BP036 - BP082: NA	BP036 - BP082: NA	BP082: NA
BP036 - BP083: NA	BP036 - BP083: NA	BP083: NA
BP036 - BP099: NA	BP036 - BP099: NA	BP099: NA

NA – Não Aplicável

Ao comparar cada estação com ela mesma, considerando apenas os últimos cinco anos anteriores ao rompimento da barragem (2014-2018), com o período pós-rompimento, o teste indicou que os níveis de Hg Total aumentaram nessas mesmas estações (BP068, BP070 e BP072) ($p < 0,05$; Tabela 30, Tabela 31).

A Figura 14 apresenta a série histórica dos valores médios de mercúrio total em cada uma das estações, para todo o período estudado.

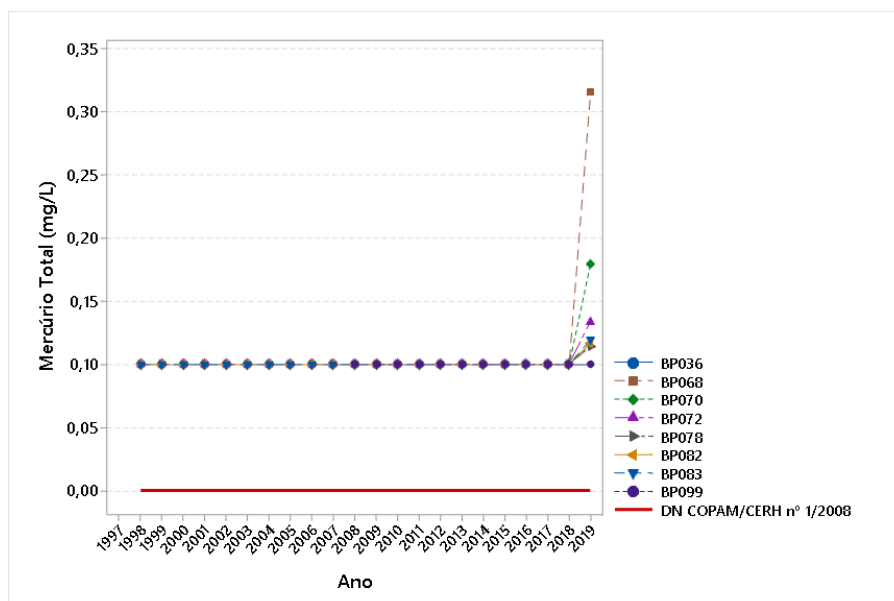


Figura 14 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para mercúrio total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Uma vez que a técnica utilizada apresenta limite de detecção superior ao limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 para corpos d'água de classe 2 (0,0002 mg/L Hg), não se pode afirmar se os valores médios de Hg estiveram acima do valor máximo permitido por lei durante todo o período analisado. Entretanto, fica visível o aumento dos

valores observados nas estações de monitoramento para o primeiro trimestre de 2019, quando comparado com o mesmo período dos anos anteriores.

Apesar deste elemento não estar relacionado com a mineração e beneficiamento de minério de ferro, este resultado é compreensível devido ao histórico da mineração de ouro no quadrilátero ferrífero durante os séculos XVIII e XIX, para a qual utilizava-se mercúrio nos garimpos, e ao fato de que este elemento pode ser naturalmente encontrado juntamente a óxidos de manganês (COSTA et al, 2003; WINDMOLLER et al, 2007; PEREIRA et al, 2008).

5.14. Níquel Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Ni Total nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, aparentemente, após o rompimento da barragem, pois foi registrada maior concentração média desta variável nas estações à jusante em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e também nas estações à jusante em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A estatística descritiva de níquel total está apresentada na Tabela 32, para cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas selecionadas, para o período anterior e posterior ao rompimento da barragem. Conforme observado na tabela em questão, anteriormente ao rompimento, os valores médios de níquel total estavam abaixo do limite de detecção dos métodos de análise utilizados. Após o rompimento da barragem, houve um aumento nas médias de níquel total em praticamente todas as estações de monitoramento de qualidade das águas estudadas.

Os resultados do teste estatístico *Wilcoxon* pareado para níquel total está apresentado na Tabela 33. Para o período anterior ao rompimento da barragem, o teste apontou que realmente não havia diferença significativa ($p > 0,05$) entre a estação à montante e as demais estações, localizadas à jusante. Para o período pós rompimento, os níveis de Ni Total nas estações BP068 e BP070, mais próximas do ponto de rompimento, apresentaram aumento significativo em relação às medidas da estação BP036 (montante) ($p < 0,05$, Tabela 31; Tabela 33).

A comparação dos resultados em cada estação à jusante, individualmente, durante os últimos cinco anos anteriores ao rompimento da barragem (2014-2018) com o período posterior ao acidente, mostrou que os níveis de Ni Total aumentaram nas estações BP068 e BP070, mais próximas do ponto de rompimento ($p < 0,05$, Tabela 32; Tabela 33).

Tabela 32 – Estatística descritiva dos resultados de níquel total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Níquel Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,004	0,009	<0,004	<0,004	0,002	68,2
	BP068	20	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,001	49,7
	BP070	21	<0,004	0,008	<0,004	<0,004	0,002	61,0
	BP072	21	<0,004	0,011	<0,004	<0,004	0,002	84,3
	BP078	21	<0,004	0,010	<0,004	<0,004	0,002	72,7
	BP082	21	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,001	49,0
	BP083	21	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,001	50,8
	BP099	11	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP068	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
	BP070	5	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,002	60,0
	BP072	5	<0,004	0,011	0,004	<0,004	0,004	109
	BP078	5	<0,004	0,005	<0,004	<0,004	0,001	52,5
	BP082	5	<0,004	0,007	<0,004	<0,004	0,002	69,5
	BP083	5	<0,004	0,006	<0,004	<0,004	0,002	64,3
	BP099	5	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	0	0
Posterior (2019)	BP036	41	<0,004	0,017	0,004	<0,004	0,003	76,0
	BP068	43	<0,004	0,109	0,013	0,008	0,017	134
	BP070	42	<0,004	0,058	0,010	0,007	0,011	103
	BP072	45	<0,004	0,024	0,006	0,005	0,005	90,2
	BP078	44	<0,004	0,009	0,004	<0,004	0,002	55,7
	BP082	50	<0,004	0,025	0,005	0,005	0,004	77,2
	BP083	43	<0,004	0,016	0,004	0,005	0,003	67,3
	BP099	60	<0,004	0,011	<0,004	<0,004	0,002	71,9

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Tabela 33– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro níquel total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Níquel Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 - BP099: NA	BP036 > BP099	BP099: Antes < Depois

NA – Não Aplicável

A Figura 15 representa a série histórica de níquel total em cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas, para o período analisado.

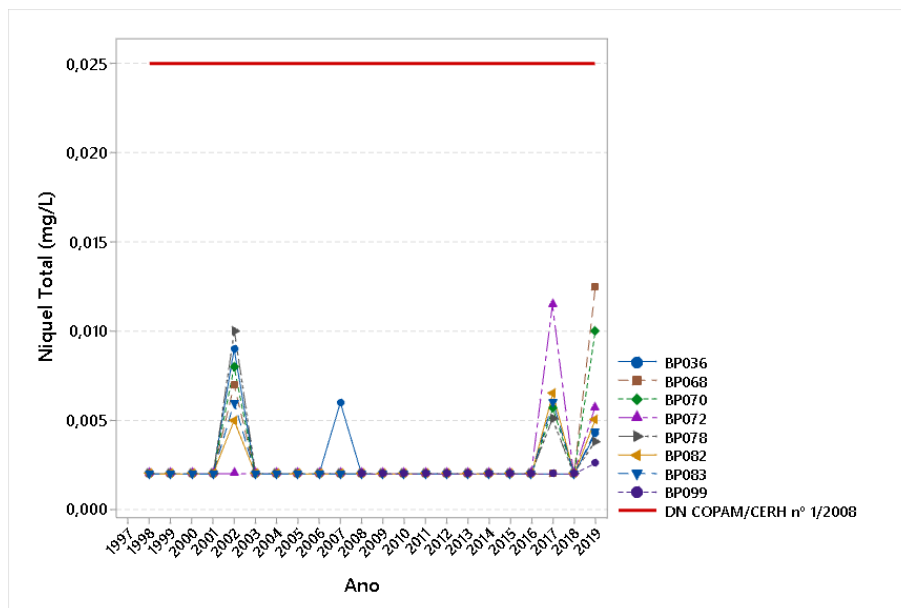


Figura 15 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para níquel total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Do gráfico acima nota-se que historicamente não houve violação ao limite legal, de 0,025 mg/L Ni, estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, em nenhum dos anos analisados. Observa-se também que antes do rompimento da barragem houve picos nas concentrações de níquel total no rio Paraopeba, especificamente em 2002 (BP036, BP068, BP070, BP078, BP082, BP083 e BP099), em 2007 (BP036 e BP099) e em 2017 (BP070, BP072, BP078, BP082 e BP083). Todavia, o primeiro trimestre de 2019 apresentou um acréscimo quando comparado com o primeiro trimestre do ano anterior, em todas as estações (Figura 15).

5.15. Nitrato

As estatísticas descritivas dos resultados de Nitrato na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 34 apresenta a estatística descritiva para a variável nitrato, em cada uma das estações de monitoramento selecionadas, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 34 – Estatística descritiva dos resultados de nitrato nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Nitrato (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	0,07	1,31	0,52	0,47	0,38	72,6
	BP068	20	0,05	1,44	0,51	0,43	0,40	78,1
	BP070	20	0,05	1,44	0,51	0,43	0,40	78,1
	BP072	21	0,06	1,89	0,55	0,40	0,46	84,1
	BP078	21	0,004	3,06	0,74	0,43	0,83	112
	BP082	21	0,03	2,83	0,74	0,50	0,74	101
	BP083	21	0,01	2,71	0,72	0,40	0,78	107
	BP099	11	0,03	2,48	0,83	0,74	0,87	105
Anterior (2014-2018)	BP036	5	0,57	1,31	1,01	1,01	0,32	31,3
	BP068	5	0,44	1,44	0,95	0,90	0,40	41,5
	BP070	5	0,56	1,78	1,10	0,94	0,49	44,7
	BP072	5	0,67	1,89	1,14	1,00	0,50	43,2
	BP078	5	0,77	2,61	1,49	1,30	0,69	46,2
	BP082	5	0,84	2,83	1,67	1,81	0,80	48,1
	BP083	5	0,80	2,61	1,45	1,14	0,73	50,5
	BP099	5	0,74	2,48	1,16	0,89	0,74	64,1
Posterior (2019)	BP036	6	0,27	3,17	1,04	0,66	1,10	106
	BP068	6	0,17	1,77	0,73	0,48	0,66	90,2
	BP070	6	0,12	2,92	1,07	0,74	1,00	94,2
	BP072	6	0,01	2,84	0,94	0,47	1,09	116
	BP078	6	0,23	3,53	1,22	0,59	1,32	108
	BP082	6	0,21	3,16	1,43	0,93	1,23	86,1
	BP083	6	0,21	2,83	1,14	0,69	0,99	86,9
	BP099	5	0,26	1,32	0,73	0,62	0,43	59,5

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

A Tabela 35 apresenta os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para nitrato, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 35 – Resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro Nitrato, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Nitrato		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 = BP068	BP068: Antes = Depois
BP036 = BP070	BP036 = BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 < BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 = BP099	BP099: Antes = Depois

O teste estatístico confirmou que não houve diferenças significativas nas concentrações de nitrato entre a estação localizada à montante com as estações à jusante da barragem, nem no período pré-rompimento, nem no pós-rompimento ($p > 0,05$; Tabela 34; Tabela 35). A

comparação dos resultados no período anterior (2014-2018) e posterior ao rompimento da barragem, em cada estação à jusante, individualmente, também não mostrou alteração significativa nos níveis de nitrato ($p > 0,05$; Tabela 34; Tabela 35).

Na Figura 16 está a série histórica das médias de nitrato para os primeiros trimestres dos anos do período analisado, para cada estação de monitoramento.

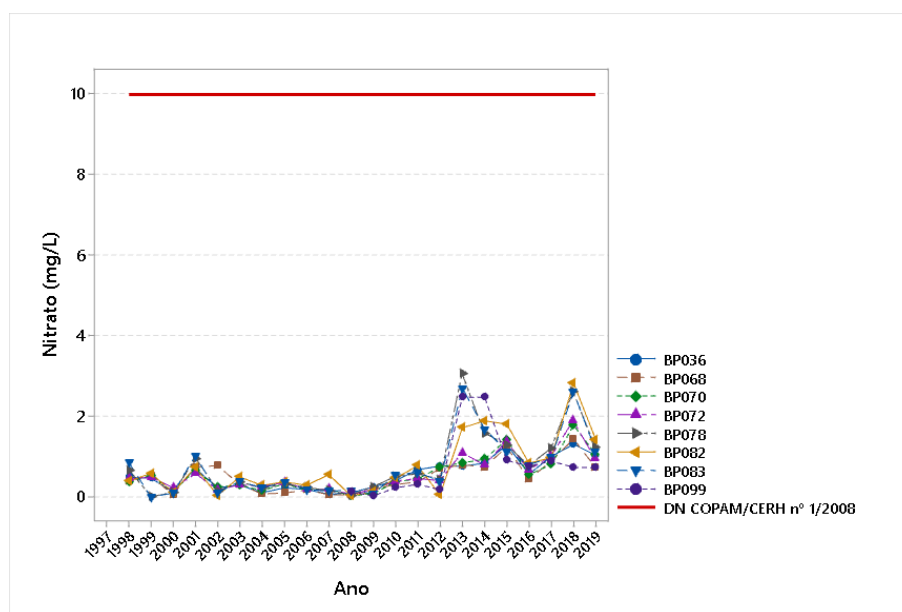


Figura 16 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Nitrato, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme visto no gráfico acima (Fig. 16), não houve violação do limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 10,0 mg/L N, durante todo o período analisado. Além disso, é possível visualizar que houve uma redução nos valores médios de nitrato durante o primeiro trimestre de 2019, em relação ao mesmo período do ano anterior. Todavia, cabe ressaltar que os valores máximos observados pós-rompimento foram superiores ao período anterior ao rompimento, na maioria das estações analisadas (Tabela 34).

5.16. Nitrito

As estatísticas descritivas dos resultados de Nitrito mostraram maiores resultados nas estações à jusante em comparação com a estação à montante, tanto no período pré-rompimento (Tabelas 1 e 2) e quanto após o rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5).

A estatística descritiva para o parâmetro nitrito está apresentada na Tabela 36, para cada uma das estações de monitoramento, nos períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 36 – Estatística descritiva dos resultados de nitrito nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Nitrito (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	0,001	0,022	0,008	0,006	0,005	58,94
	BP068	20	0,001	0,089	0,011	0,006	0,019	171
	BP070	21	0,030	0,065	0,533	0,380	0,446	83,6
	BP072	21	0,010	0,107	0,028	0,016	0,026	93,3
	BP078	21	0,002	0,020	0,008	0,007	0,005	61,8
	BP082	21	0,002	0,088	0,023	0,016	0,022	94,7
	BP083	21	0,004	0,041	0,011	0,008	0,009	79,9
	BP099	11	0,005	0,021	0,009	0,007	0,005	57,7
Anterior (2014-2018)	BP036	5	0,005	0,022	0,012	0,0110	0,006	52,3
	BP068	5	0,005	0,020	0,011	0,0120	0,006	49,5
	BP070	5	0,030	0,065	0,045	0,0360	0,016	36,2
	BP072	5	0,030	0,107	0,045	0,0360	0,016	36,2
	BP078	5	0,004	0,020	0,010	0,0070	0,006	66,1
	BP082	5	0,028	0,088	0,055	0,050	0,023	42,2
	BP083	5	0,007	0,041	0,020	0,0160	0,014	67,4
	BP099	5	0,006	0,021	0,011	0,0110	0,006	50,6
Posterior (2019)	BP036	5	0,010	0,040	0,016	0,010	0,013	83,9
	BP068	5	0,010	0,020	0,012	0,010	0,004	37,3
	BP070	5	0,010	0,040	0,022	0,020	0,011	49,8
	BP072	5	0,010	0,080	0,048	0,050	0,026	53,9
	BP078	5	0,010	0,070	0,024	0,010	0,026	109
	BP082	5	0,020	0,050	0,034	0,030	0,011	33,5
	BP083	5	0,010	0,020	0,018	0,020	0,004	24,9
	BP099	4	<0,001	0,010	0,008	0,010	0,005	66,7

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

A Tabela 37 apresenta os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para nitrito, considerando os primeiros trimestres dos anos que compõem o período estudado, em cada uma das estações selecionadas.

Tabela 37 – Resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro nitrito, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Nitrito		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 - BP068: NA	BP068: Antes = Depois
BP036 < BP070	BP036 = BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 < BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 - BP078: NA	BP078: Antes = Depois
BP036 < BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 - BP083: NA	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 - BP099: NA	BP099: Antes = Depois

NA – Não Aplicável

Observando-se a Tabela 37, apenas as estações BP070, BP072 e BP082 apresentaram aumento significativo ($p < 0,05$) nas concentrações de nitrito comparadas à da estação BP036, localizada à montante, para o período pré-rompimento. Posteriormente ao acidente, os níveis de nitrito nas estações BP072 e BP082 permaneceram superiores aos registrados na estação à montante ($p < 0,05$; Tabela 36; Tabela 37). Da análise dos últimos cinco anos anteriores (2014-2018) com o período pós-rompimento, para uma mesma estação, nenhuma delas apresentou diferença significativa, pelo teste de *Wilcoxon* pareado ($p > 0,05$; Tabela 36; Tabela 37).

A Figura 19 apresenta a série histórica de nitrito para as médias do primeiro trimestre dos anos do período analisado, em cada uma das estações de monitoramento estudadas.

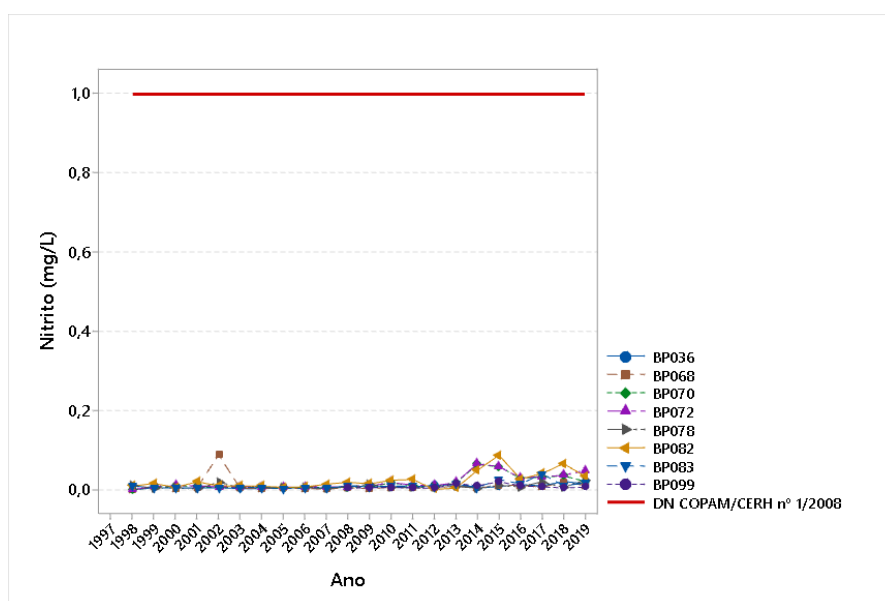


Figura 17 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Nitrito, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Analisando-se o gráfico acima, percebe-se que não houve violação do limite legal estabelecido para nitrito pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 1,0 mg/L N, em nenhum dos anos do período estudado.

5.17. Nitrogênio Amoniacal Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Nitrogênio Amoniacal nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação manteve-se, aparentemente, após o rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5). No entanto, ao comparar os resultados antes e após o rompimento, apenas nas estações à jusante, foi verificado um aumento os valores médios desta variável no período posterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 38 apresenta a estatística descritiva para o parâmetro nitrogênio amoniacal total, em cada uma das estações de monitoramento, para o período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 38 – Estatística descritiva dos resultados de nitrogênio amoniacal total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Nitrogênio Amoniacal Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	0,04	52,3
	BP068	20	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	0,04	53,9
	BP070	21	<0,10	0,30	<0,10	<0,10	0,07	82,9
	BP072	21	<0,10	1,35	0,20	<0,10	0,31	155
	BP078	21	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	0,05	63,2
	BP082	21	<0,10	0,30	<0,10	<0,10	0,07	75,2
	BP083	21	<0,10	0,20	<0,10	<0,10	0,05	61,4
	BP099	11	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,10	0,10	<0,10	<0,10	0,02	37,3
	BP068	5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0	0
	BP070	5	<0,10	0,26	0,12	<0,10	0,10	82,7
	BP072	5	<0,10	1,35	0,34	<0,10	0,57	165
	BP078	5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0	0
	BP082	5	<0,10	0,13	<0,10	<0,10	0,04	53,4
	BP083	5	<0,10	0,13	<0,10	<0,10	0,04	54,2
	BP099	5	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0	0
Posterior (2019)	BP036	6	<0,10	0,39	0,21	0,22	0,14	69,8
	BP068	6	<0,10	0,84	0,31	0,20	0,28	90,8
	BP070	6	<0,10	0,41	0,25	0,29	0,14	53,8
	BP072	6	<0,10	0,69	0,56	0,60	0,12	21,1
	BP078	6	<0,10	0,28	0,15	0,16	0,09	59,6
	BP082	6	<0,10	0,51	0,23	0,17	0,17	74,7
	BP083	6	<0,10	0,22	0,12	0,12	0,07	54,9
	BP099	5	<0,10	0,30	0,16	0,15	0,11	70,8

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para nitrogênio amoniacal total pode ser visto na Tabela 39, a seguir.

Tabela 39 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro nitrogênio amoniacal total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Nitrogênio Amoniacal Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 = BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 = BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 < BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes < Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 = BP099	BP099: Antes < Depois

O teste estatístico indicou que, de modo geral, as concentrações de Nitrogênio Amoniacal não variaram ao longo do rio, em todas as estações de monitoramento, tanto antes quanto após o rompimento da barragem ($p > 0,05$; Tabela 38; Tabela 39).

Da comparação do período de 2014 a 2018 com o período pós rompimento, para uma mesma estação, apresentaram aumento significativo nas concentrações de Nitrogênio Amoniacal apenas as estações BP068, BP078 e BP099 ($p < 0,05$; Tabela 38; Tabela 39).

A Figura 18 representa a série histórica das médias do primeiro trimestre dos anos estudados, em cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas selecionada.

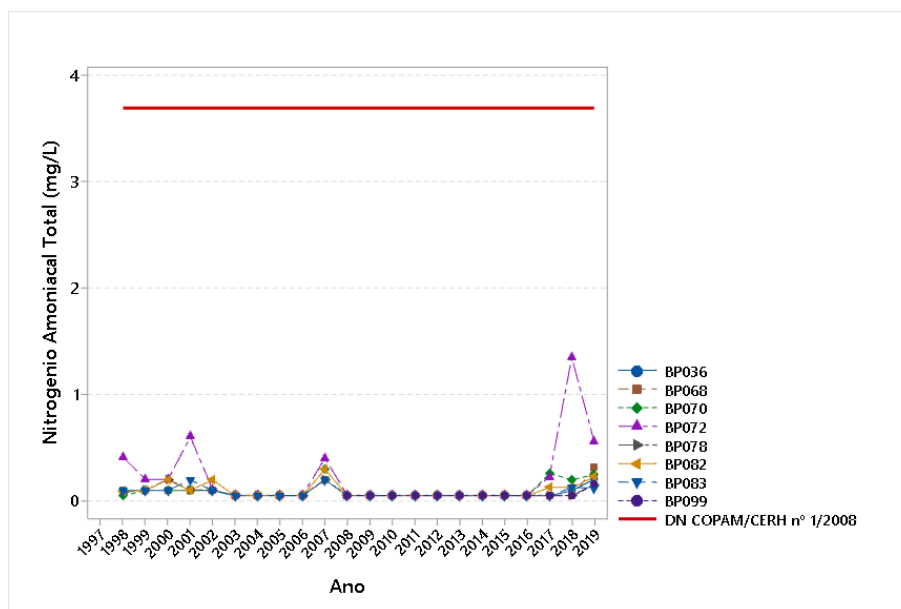


Figura 18 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para nitrogênio amoniacal total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Levando-se em consideração que a DN COPAM/CERH nº 1/2008 estabelece um limite legal para nitrogênio amoniacal total, a depender da faixa de pH na qual o corpo d'água se encaixa, utilizou-se o limite de 3,7 mg/L N, já que grande parte das medidas de pH in loco estão

entre 6 e 7,5. Sendo assim, não foi detectada nenhuma inconformidade com os limites legais estabelecidos para nitrogênio amoniacal total, em nenhuma das estações, durante o período estudado. O gráfico nos permite observar, também que houve um pequeno aumento das concentrações da variável em questão para o pós-rompimento, ao ser comparada com mesmo período do ano anterior, 2018.

5.18. Oxigênio Dissolvido

As estatísticas descritivas dos resultados de OD nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram mais baixas nas estações localizadas à jusante em comparação com as estações à montante, tanto no período pré quanto pós rompimento da barragem (Tabelas 1 e 2; Tabelas 4 e 5). Ao comparar os resultados antes e após o rompimento, apenas nas estações à jusante, individualmente, foi verificado que os níveis médios desta variável permaneceram os mesmos, ao longo do tempo (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 40 apresenta a estatística descritiva para o parâmetro oxigênio dissolvido, em cada uma das estações, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem. É importante ressaltar que, no ano de 2018, não foram encontradas leituras para oxigênio dissolvido no banco de dados disponibilizado no portal InfoHidro.

Na Tabela 41 é possível visualizar os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro oxigênio dissolvido. Os resultados do teste de *Wilcoxon* apontam que, tanto para o período anterior quanto posterior ao rompimento da barragem, os resultados de Oxigênio Dissolvido eram mais baixos nas estações à jusante da barragem, em comparação com a estação localizada à montante ($p < 0,05$; Tabela 40; Tabela 41). Quanto aos últimos cinco anos do período pré-rompimento com o período pós-rompimento, em uma mesma estação, nenhuma das estações apresentou diferença significativa nos teores de Oxigênio Dissolvido ($p > 0,05$; Tabela 40; Tabela 41).

Tabela 40 – Estatística descritiva dos resultados de oxigênio dissolvido nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2017) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Oxigênio Dissolvido (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2017)	BP036	21	6,5	8,1	7,3	7,4	0,44	6,0
	BP068	20	6,1	7,9	7,1	7,1	0,43	6,1
	BP070	21	6,4	7,9	6,9	6,9	0,38	5,45
	BP072	21	3,7	8,0	6,9	7,1	0,89	12,9
	BP078	21	5,6	7,9	6,5	6,5	0,53	8,1
	BP082	21	5,7	7,7	6,5	6,4	0,55	8,4
	BP083	21	5,3	7,9	6,5	6,5	0,55	8,4
	BP099	11	5,3	7,4	6,6	6,9	0,83	12,5
Anterior (2014-2017)	BP036	4	7,4	7,9	7,6	7,6	0,25	3,2
	BP068	4	6,9	7,8	7,4	7,4	0,38	5,1
	BP070	4	6,4	7,3	6,8	6,8	0,37	5,5
	BP072	4	7,0	7,3	7,1	7,1	0,14	2,0
	BP078	4	6,5	7,1	6,7	6,7	0,29	4,3
	BP082	4	6,3	6,8	6,5	6,4	0,24	3,7
	BP083	4	5,9	6,9	6,5	6,6	0,42	6,5
	BP099	4	5,3	7,4	6,1	5,9	1,01	16,6
Posterior (2019)	BP036	42	7,2	8,0	7,6	7,6	0,16	2,1
	BP068	44	6,0	7,8	7,3	7,4	0,30	4,1
	BP070	43	6,1	7,5	7,0	7,1	0,29	4,1
	BP072	46	6,1	7,5	7,0	7,1	0,32	4,7
	BP078	46	6,5	7,7	7,0	7,0	0,23	3,4
	BP082	51	5,9	7,0	6,6	6,6	0,23	3,5
	BP083	44	6,3	8,8	6,9	6,8	0,36	5,3
	BP099	61	5,4	8,4	6,8	6,6	0,70	10,4

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Tabela 41 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro oxigênio dissolvido, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Oxigênio Dissolvido		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 > BP068	BP036 > BP068	BP068: Antes = Depois
BP036 > BP070	BP036 > BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 > BP072	BP036 > BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 > BP078	BP036 > BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 > BP082	BP036 > BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 > BP083	BP036 > BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 > BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes = Depois

A figura 21 apresenta a série histórica de oxigênio dissolvido para o período analisado, em cada uma das estações escolhidas para compor este estudo.

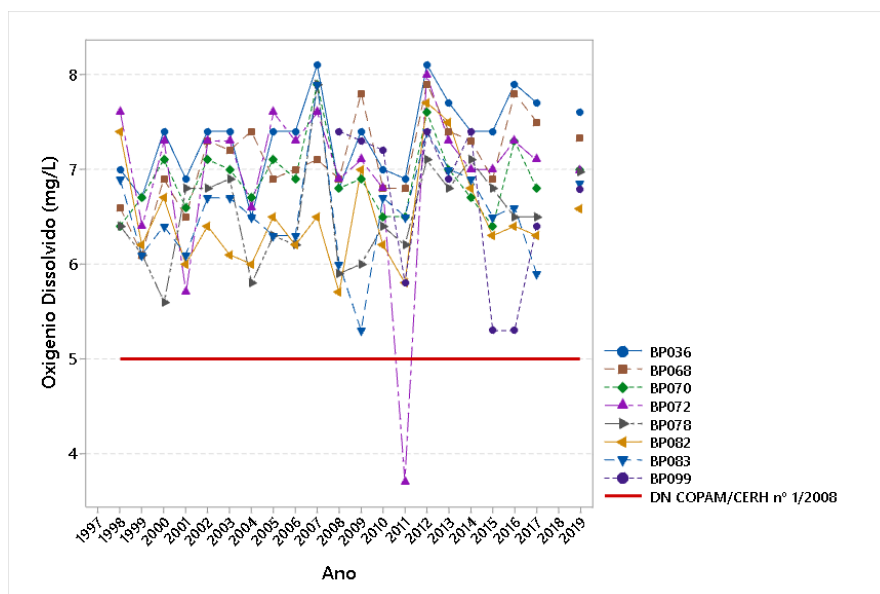


Figura 21 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Oxigênio Dissolvido, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Conforme apresentado no gráfico acima, apenas em 2011 houve violação do limite legal estabelecido na DN COPAM/CERH nº 1/2008, a qual estabelece que a concentração de oxigênio dissolvido não deve ser inferior a 5,0 mg/L O₂, em qualquer amostra de água de corpos d'água de classe 2. Nos demais anos, houve cumprimento do requisito legal.

5.19. pH in loco

As estatísticas descritivas dos resultados de pH na estação à montante e todas à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes (Tabelas 1 e 2) e após o rompimento (Tabelas 4 e 5). Também não foi observada alteração na concentração média desta variável em todas as estações à jusante, no período pós-rompimento, em comparação com o período anterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 42 apresenta a estatística descritiva para o parâmetro pH in loco, nos períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem, em cada uma das estações de monitoramento de qualidade das águas selecionadas para este estudo.

Tabela 42 – Estatística descritiva dos resultados de pH in loco nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

pH in Loco								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	6,3	7,5	7,0	7,1	0,36	5,2
	BP068	20	6,4	7,7	7,1	7,1	0,40	5,6
	BP070	21	6,3	7,6	7,0	7,1	0,42	6,0
	BP072	21	6,3	7,5	7,0	7,0	0,37	5,4
	BP078	21	6,4	7,6	7,0	7,0	0,38	5,3
	BP082	21	6,2	7,5	7,0	7,0	0,37	5,3
	BP083	21	6,3	7,4	7,0	7,1	0,36	5,1
	BP099	11	6,3	7,5	7,0	6,9	0,38	5,5
Anterior (2014-2018)	BP036	5	6,4	7,4	7,0	7,2	0,47	6,8
	BP068	5	6,4	7,5	7,2	7,4	0,45	6,3
	BP070	5	6,3	7,3	7,0	7,3	0,48	6,7
	BP072	5	6,5	7,5	7,1	7,1	0,39	5,5
	BP078	5	6,7	7,5	7,2	7,2	0,30	4,1
	BP082	5	6,5	7,3	7,0	7,1	0,31	4,5
	BP083	5	6,4	7,4	7,1	7,3	0,41	5,7
	BP099	5	6,6	7,5	7,0	6,9	0,35	5,1
Posterior (2019)	BP036	42	5,9	7,9	7,1	7,2	0,53	7,4
	BP068	44	5,8	7,7	6,9	7,0	0,49	7,1
	BP070	43	5,8	7,8	6,9	7,0	0,49	7,0
	BP072	46	6,0	7,5	6,9	7,1	0,42	6,0
	BP078	46	6,1	7,8	6,9	6,8	0,43	6,2
	BP082	51	6,1	7,8	6,9	6,8	0,43	6,2
	BP083	44	6,1	7,7	6,9	6,8	0,42	6,1
	BP099	61	6,0	7,9	6,9	6,8	0,44	6,3

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

A tabela acima mostra que houve uma pequena queda nos valores médios de pH in loco observados após o rompimento da barragem, em todas as estações de jusante. O teste estatístico de *Wilcoxon* pareado (Tabela 43) apontou que, anteriormente ao rompimento, nenhuma estação à jusante apresentou diferença significativa nos níveis de pH em relação à estação à montante ($p > 0,05$), assim como demonstrado na estatística descritiva (Tabela 42). No entanto, posteriormente ao rompimento, praticamente todas as estações à jusante, apresentaram uma diminuição nos valores médios de pH em relação aos resultados registrados à montante ($p < 0,05$; Tabela 42; Tabela 43).

Tabela 43– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro pH in loco, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

pH in loco		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 > BP068	BP068: Antes = Depois
BP036 = BP070	BP036 > BP070	BP070: Antes = Depois
BP036 = BP072	BP036 > BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 = BP082	BP036 > BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 > BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 = BP099	BP099: Antes = Depois

Da análise dos últimos cinco anos anteriores ao rompimento em comparação com o pós rompimento, em cada estação à jusante, individualmente, o teste não apontou diferença significativa nos níveis de pH ($p > 0,05$; Tabela 42; Tabela 43).

A Figura 19 apresenta a série histórica de pH in loco para as estações selecionadas, tanto no período anterior quanto posterior ao rompimento da barragem.

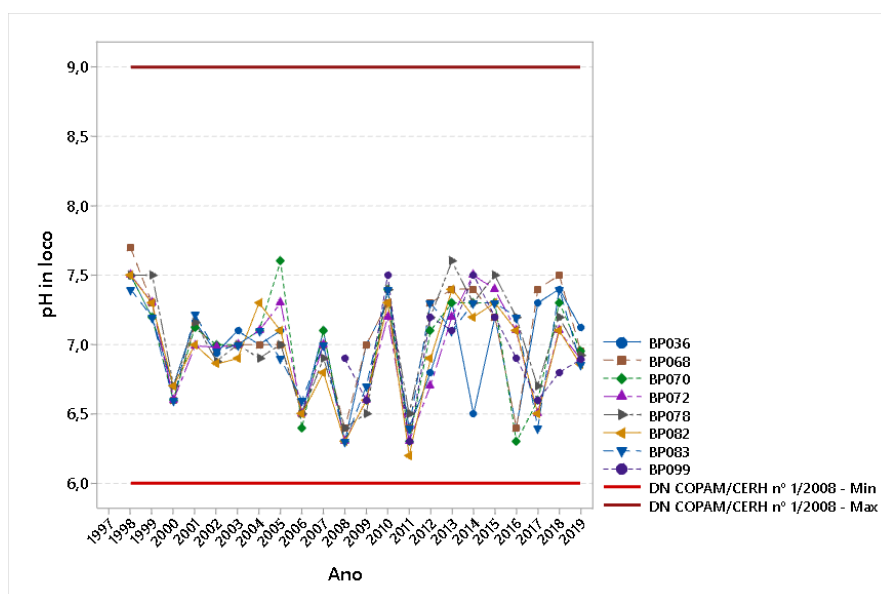


Figura 19 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para pH in loco, em cada uma das estações de monitoramento. As linhas sólidas vermelhas representam a faixa do limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Do gráfico acima, é possível perceber que as médias para pH in loco permanecem, historicamente, dentro dos limites legais estabelecidos pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, entre 6,0 e 9,0.

5.20. Sólidos Totais

As estatísticas descritivas dos resultados de ST nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do

rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, após o rompimento da barragem, pois foi registrada maior concentração média desta variável nas estações à jusante em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e também nas estações à jusante, conjuntamente, em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 44 apresenta a estatística descritiva para o parâmetro sólidos totais em cada estação, para o período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Tabela 44 – Estatística descritiva dos resultados de sólidos totais nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Sólidos Totais (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	71	642	254	208	173	68
	BP068	20	91	589	266	250	160	60
	BP070	21	74	861	266	187	202	76
	BP072	21	66	791	276	211	197	72
	BP078	21	76	603	234	212	136	58
	BP082	21	50	810	256	204	196	76
	BP083	21	43	704	248	209	159	64
	BP099	11	69	781	173	105	205	119
Anterior (2014-2018)	BP036	5	120	642	261	200	216	83
	BP068	5	117	518	235	133	172	73
	BP070	5	127	497	249	189	155	62
	BP072	5	105	702	275	188	243	88
	BP078	5	115	372	209	202	104	49
	BP082	5	114	540	256	204	175	68
	BP083	5	107	476	246	169	168	68
	BP099	5	69	130	104	104	23	22
Posterior (2019)	BP036	42	86	878	189	157	131	69
	BP068	44	218	13792	1538	667	2585	168
	BP070	43	102	3150	610	416	586	96
	BP072	45	80	5038	391	201	782	200
	BP078	46	66	505	177	166	96	54
	BP082	51	81	1890	277	209	285	103
	BP083	44	79	786	209	159	153	73
	BP099	61	54	710	125	85	128	102

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

A Tabela 47 mostra os resultados do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro Sólidos Totais, para o período analisado.

Tabela 45– Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Sólidos Totais, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Sólidos Totais		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 = BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 = BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes = Depois

Observa-se que não havia diferença significativa entre a estação à montante (BP036) e as estações à jusante, para o período anterior ao rompimento da barragem ($p > 0,05$; Tabela 44; Tabela 45). Posteriormente ao rompimento, as três estações localizadas logo à jusante da barragem mostraram um aumento significativo nas concentrações de Sólidos Totais em relação à estação BP036 (montante) ($p < 0,05$; Tabela 44; Tabela 45). Para o teste entre o antes e o depois em uma mesma estação à jusante, apenas as estações BP068 e BP070, mais próximas do local do rompimento, apresentaram aumento significativo nos níveis de Sólidos Totais ($p < 0,05$; Tabela 44; Tabela 45).

A Figura 20 apresenta a série histórica das médias de sólidos totais em cada uma das estações de monitoramento, durante o período analisado.

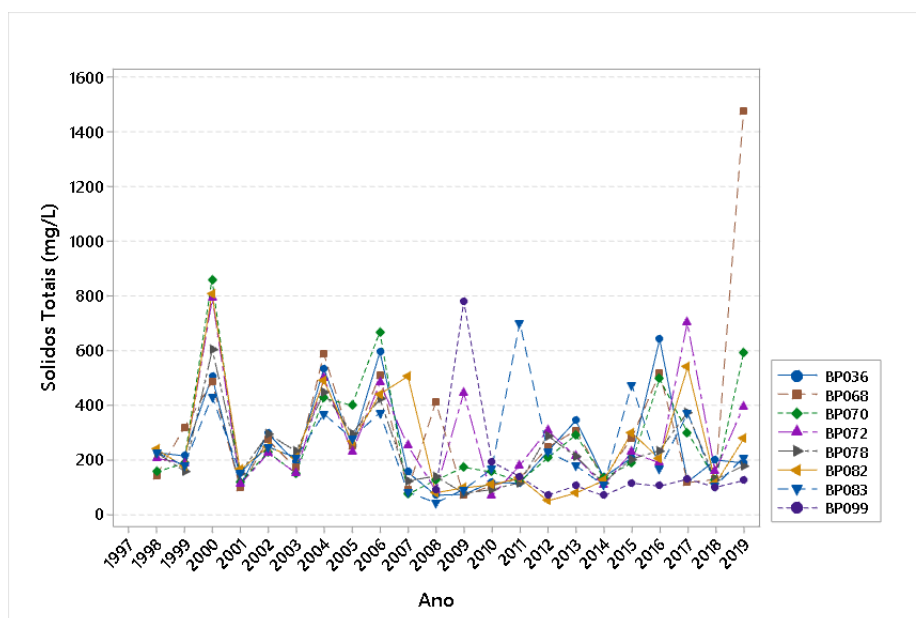


Figura 20 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para sólidos totais, em cada uma das estações de monitoramento.

Através do gráfico acima, percebe-se que a concentração de sólidos totais medido nas estações de tratamento de águas é variável ao longo dos anos, tendo momentos de pico e

momentos cujos valores médios se apresentam mais baixos. Comparando-se as médias de 2019 com o ano anterior, é possível dizer que houve um aumento significativo dos valores de Sólidos Totais, em todas as estações, conforme esperado, uma vez que este elemento está presente em grande quantidade nas barragens de rejeitos (COSTA et al, 2003). Por não ser um parâmetro previsto pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, não foi possível verificar o atendimento legal de sólidos totais conforme o estabelecido para corpos d'água de classe 2.

5.21. Turbidez

As estatísticas descritivas dos resultados de Turbidez nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação alterou-se, após o rompimento da barragem, pois foi registrada maior concentração média desta variável nas estações à jusante em comparação com a estação localizada à montante (Tabelas 4 e 5) e também nas estações à jusante, conjuntamente, em comparação com a situação pré-rompimento (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 46 apresenta a estatística descritiva para Turbidez, em cada uma das estações de monitoramento analisadas, tanto para o período anterior ao rompimento da barragem quanto posterior.

Da tabela a seguir, percebe-se que houve um aumento das médias de turbidez nas estações BP068, BP070, BP072, BP082 e BP083, após o rompimento da barragem, em relação ao mesmo período dos anos anteriores ao rompimento.

Tabela 46 – Estatística descritiva dos resultados de turbidez nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Turbidez (UNT)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	18	609	238	197	181	76
	BP068	20	9,1	596	209	190	169	81
	BP070	21	41	1856	274	155	387	141
	BP072	21	30	944	246	157	250	102
	BP078	21	16	766	215	157	182	85
	BP082	21	19	911	189	106	207	109
	BP083	21	20	489	175	152	115	65
	BP099	11	15	546	104	52	158	152
Anterior (2014-2018)	BP036	5	39	447	178	88	173	97
	BP068	5	29	432	156	70	171	110
	BP070	5	41	458	186	129	173	93
	BP072	5	30	415	136	80	161	119
	BP078	5	18	350	136	118	133	98
	BP082	5	40	501	176	106	190	108
	BP083	5	20	344	162	102	155	96
	BP099	5	15	64	38	34	24	63
Posterior (2019)	BP036	42	34	439	136	126	84	62
	BP068	44	388	34500	3494	1326	6044	173
	BP070	43	44	18588	1644	786	2957	180
	BP072	46	23	17148	794	232	2547	321
	BP078	46	11	818	181	153	177	98
	BP082	51	13	4854	393	214	732	186
	BP083	44	12	1545	233	149	287	123
	BP099	61	6	1140	85	36	190	223

*Número de observações; **Coeficiente de Variação.

Conforme visto na Tabela 47 (teste *Wilcoxon* pareado), a análise estatística para o período anterior ao rompimento mostrou que, de modo geral, a turbidez nas estações à jusante não variou em relação à estação localizada à montante ($p > 0,05$).

Tabela 47 – Resultado do teste de *Wilcoxon* pareado para o parâmetro Turbidez, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Turbidez		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 < BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 > BP082	BP036 < BP082	BP082: Antes = Depois
BP036 = BP083	BP036 < BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 > BP099	BP036 > BP099	BP099: Antes = Depois

No período posterior ao rompimento, as estações localizadas à jusante, de um modo geral, apresentaram aumento significativo nos níveis de Turbidez em relação aos níveis registrados na estação à montante (BP036) ($p < 0,05$; Tabela 46; Tabela 47). Quanto à comparação das estações à jusante individualmente, para os cinco anos anteriores e o período após o rompimento da barragem, apenas as duas primeiras estações BP068 e BP070 apresentaram aumento significativo nos teores de Turbidez no período pós rompimento da barragem ($p < 0,05$; Tabela 46; Tabela 47).

A série histórica dos valores médios turbidez para o período analisado, em todas as estações de monitoramento estudadas está apresentada na figura 21.

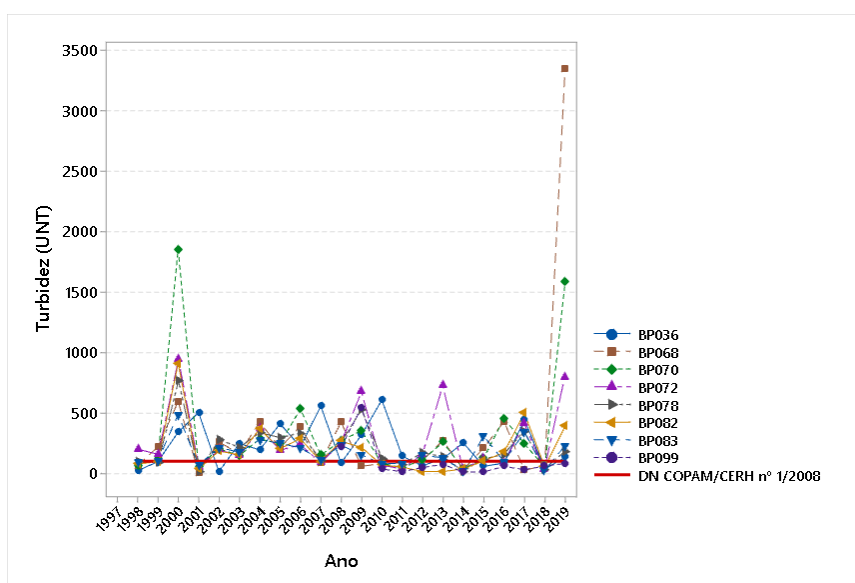


Figura 21 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para turbidez, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Historicamente, as médias de turbidez medidas nas estações de monitoramento de qualidade das águas encontravam-se acima do limite estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008 para corpos d'água de classe 2, de 100 UNT, conforme visto na Figura 21. Do gráfico percebe-se, também, que em relação à 2018, houve um salto das médias de turbidez no primeiro trimestre de 2019, em todas as estações. Segundo Libânio (2010), a turbidez nos corpos d'água brasileiros é particularmente elevada em regiões cujos solos são suscetíveis à erosão, nos quais a precipitação pode carrear partículas de argila, silte, areia, fragmentos de rocha e óxidos metálicos do solo, fazendo com que a água seja naturalmente turva em virtude das características geológicas das bacias de drenagem, dos índices pluviométricos e de atividades agrícolas.

5.22. Zinco Total

As estatísticas descritivas dos resultados de Zn Total dissolvido nas estações à montante e à jusante indicam que as concentrações desta variável eram similares ao longo do trecho do rio antes do rompimento (Tabelas 1 e 2). Esta situação manteve-se, aparentemente, após o rompimento da barragem (Tabelas 4 e 5). No entanto, ao comparar os resultados antes e após o rompimento, apenas nas estações à jusante, foi verificado um aumento os valores médios desta variável no período posterior (Tabelas 3 e 5).

A Tabela 48 apresenta a estatística descritiva de zinco total, em cada uma das estações de monitoramento, para os períodos anterior e posterior ao rompimento da barragem. Da análise da referida tabela, nota-se que os valores médios do período anterior ao rompimento mantiveram-se abaixo dos limites de detecção dos métodos de análise utilizados. No período posterior, houve um aumento destes valores, nas estações estudadas (montante e jusante), exceto BP099, localizada na extrema jusante, ponto mais afastado do local de rompimento.

Os resultados do teste *Wilcoxon* pareado estão apresentados na Tabela 49. Conforme indicado na análise estatística descritiva, anteriormente ao rompimento da barragem não havia diferença significativa nas concentrações de Zn Total entre as estações à jusante, quando comparadas com a estação à montante (BP036) ($p > 0,05$; Tabela 48; Tabela 49).

Tabela 48 – Estatística descritiva dos resultados de zinco total nas estações de monitoramento de qualidade das águas do rio Paraopeba, no período anterior (1998 a 2018) e posterior (2019) ao rompimento da barragem.

Zinco Total (mg/L)								
	Estação	N*	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio Padrão	CV**
Anterior (1998-2018)	BP036	21	<0,02	0,10	<0,02	<0,02	0,02	142
	BP068	20	<0,02	0,07	<0,02	<0,02	0,02	107
	BP070	21	<0,02	0,09	<0,02	<0,02	0,02	125
	BP072	21	<0,02	0,07	<0,02	<0,02	0,02	110
	BP078	21	<0,02	0,06	<0,02	<0,02	0,01	97,2
	BP082	21	<0,02	0,09	<0,02	<0,02	0,02	125
	BP083	21	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	0,01	76,3
	BP099	11	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	0
Anterior (2014-2018)	BP036	5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	0
	BP068	5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	0
	BP070	5	<0,02	0,04	<0,02	<0,02	0,01	75,3
	BP072	5	<0,02	0,05	0,02	<0,02	0,02	100
	BP078	5	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	0,01	66,1
	BP082	5	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	0,01	69,0
	BP083	5	<0,02	0,03	<0,02	<0,02	0,01	72,7
	BP099	5	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	0	0
Posterior (2019)	BP036	40	<0,02	0,08	0,03	0,04	0,02	57,1
	BP068	43	<0,02	0,25	0,04	0,04	0,04	92,9
	BP070	43	<0,02	0,16	0,04	0,04	0,03	77,5
	BP072	44	<0,02	0,09	0,03	0,04	0,02	68,5
	BP078	44	<0,02	0,08	0,03	0,04	0,02	65,5
	BP082	49	<0,02	0,08	0,04	0,04	0,02	61,9
	BP083	43	<0,02	0,12	0,04	0,04	0,03	77,0
	BP099	48	<0,02	0,05	<0,02	<0,02	0,01	78,9

*N – Número de leituras; DP – Desvio Padrão; CV – Coeficiente de Variação.

Tabela 49 – Resultado do teste de Wilcoxon pareado para o parâmetro Zinco Total, no período anterior e posterior ao rompimento da barragem.

Zinco Total		
Antes do rompimento	Após o rompimento	Últimos 5 anos x pós
BP036 = BP068	BP036 < BP068	BP068: Antes < Depois
BP036 = BP070	BP036 < BP070	BP070: Antes < Depois
BP036 = BP072	BP036 = BP072	BP072: Antes = Depois
BP036 = BP078	BP036 = BP078	BP078: Antes = Depois
BP036 = BP082	BP036 = BP082	BP082: Antes < Depois
BP036 = BP083	BP036 = BP083	BP083: Antes = Depois
BP036 - BP099: NA	BP036 > BP099	BP099: Antes = Depois

NA – Não Aplicável

No pós-rompimento, as estações BP068 e BP070, mais próximas do ponto de rompimento, apresentaram aumento significativo nos valores médios de zinco total aos encontrados na estação BP036, à montante ($p < 0,05$; Tabela 48; Tabela 49).

A análise dos últimos cinco anos antes do rompimento da barragem com o período pós-rompimento, para uma mesma estação à jusante, individualmente mostrou que as duas primeiras

estações BP068 e BP070, além da estação BP082, apresentaram aumento significativo nos níveis de Zn Total após o rompimento da barragem ($p < 0,05$; Tabela 48; Tabela 49).

A Figura 22 apresenta graficamente a série histórica de zinco total em cada uma das estações de monitoramento, durante o período estudado.

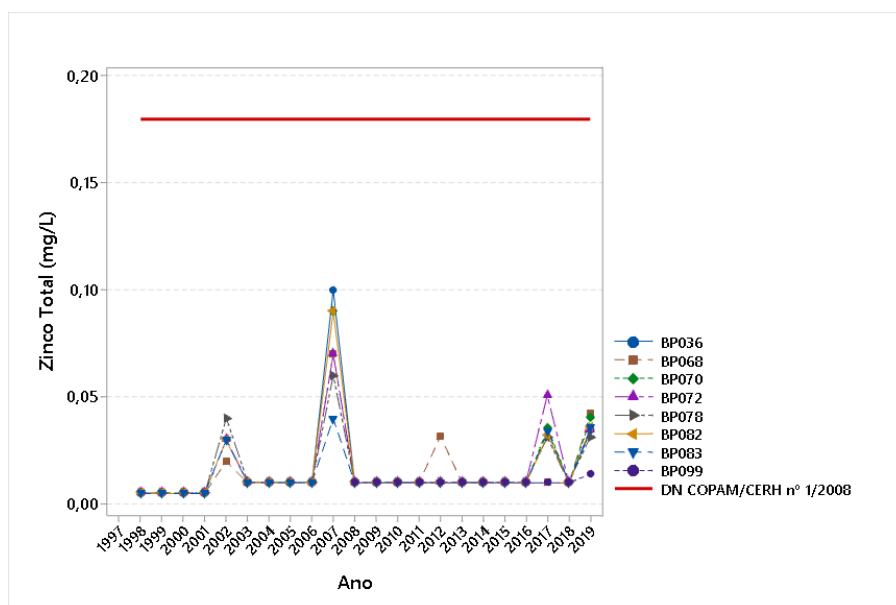


Figura 22 - Série histórica das médias do primeiro trimestre de cada ano do período estudado, para Zinco Total, em cada uma das estações de monitoramento. A linha sólida vermelha representa o limite legal estabelecido pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, para corpos d'água de classe 2.

Ao observar a Figura 22, percebe-se que, apesar de os valores médios de zinco total permanecerem abaixo dos limites legais estabelecidos pela DN COPAM/CERH nº 1/2008, de 0,18 mg/L Zn, houve um aumento das médias do primeiro trimestre de 2019 (pós-rompimento) com relação ao mesmo período do ano anterior, e que a estação BP068 apresentou sua leitura máxima (0,25 mg/L Zn) acima do limite preconizado por legislação (Tabela 48). A presença deste elemento também pode estar associada com a mineração de ouro histórica na região (COSTA et al., 2003), fazendo com que partículas presentes no fundo e/ou leito de rio fossem disponibilizadas na coluna d'água.

5.23. Análise Geral

A análise individual de cada variável apontou que os parâmetros de qualidade das águas influenciados pela presença da lama de rejeitos no rio Paraopeba, foram a concentração média de alumínio dissolvido, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total, sólidos totais e zinco total, e os valores médios de turbidez.

Destas, apenas as variáveis ferro dissolvido, manganês total, sólidos totais e turbidez possuem relação direta com a mineração de ferro, devido às características geológicas da região, uma vez que a área de estudo se localiza no Quadrilátero Ferrífero, conhecido por suas importantes jazidas de ferro, ouro e manganês (COSTA et al, 2018; COSTA et al, 2003; NICHOLSON, 2014). Por este motivo, a presença da lama de rejeitos alterou os valores médios destas variáveis, o que pode ser observado nas estações de monitoramento de qualidade das águas após o rompimento. Este fato também pode ter corroborado para que, historicamente, mesmo antes do rompimento, os valores médios observados destas variáveis se encontrassem acima dos limites legais estabelecidos pela DN COPAM/CERH nº 1/2008.

As variáveis alumínio dissolvido, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido, mercúrio total, níquel total e zinco total, foram indiretamente influenciadas pelo rompimento da barragem, uma vez que não possuem relação direta com a extração de minério de ferro (GOMES et al., 2011; COSTA et al, 2003; WINDMOLLER et al, 2007; PEREIRA et al, 2008). Acredita-se que estes elementos tenham sido disponibilizados nas águas do rio Paraopeba através da força da passagem da lama de rejeitos e, posteriormente, devido à variação do potencial redox e do pH, fazendo com que partículas de fundo e/ou leito de rio se deslocassem para a coluna d'água. Segundo Gomes et al. (2011), a presença de alumínio dissolvido pode estar relacionada com a formação geológica do Quadrilátero Ferrífero, na qual este elemento pode ser encontrado em níveis significativos. Por outro lado, a presença de mercúrio, chumbo, zinco e cobre possivelmente estão relacionadas com os depósitos arqueológicos de ouro e com a histórica mineração de Au na região, além de outras atividades industriais presentes na região (COSTA et al, 2003; WINDMOLLER et al, 2007; PEREIRA et al, 2008).

O deslocamento da pluma afetou, de modo geral, as variáveis bário total, boro total, cádmio total, chumbo total, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total, níquel total, nitrato, nitrogênio amoniacal, pH, sólidos totais, turbidez e zinco total nas estações localizadas mais próximas do local do rompimento, já que demonstraram ter suas leituras influenciadas após o acidente de maneira notável nessas estações. Por outro lado, as variáveis alumínio dissolvido, cobre dissolvido, condutividade elétrica in loco e oxigênio dissolvido apresentaram valores de pós-rompimento notavelmente alterados nas estações mais distantes do local de rompimento.

Quanto aos efeitos sinérgicos das variáveis estudadas, resultantes da presença da lama no rio Paraopeba, acredita-se que as alterações do pH tenham desempenhado papel importante na solubilização de íons como alumínio, cádmio, ferro dissolvido, manganês e zinco, fazendo com que as concentrações de tais variáveis fossem especialmente superiores no período pós-

rompimento. Consequentemente, houve um aumento da condutividade elétrica, variável diretamente relacionada com a quantidade de íons presentes na solução (LIBÂNIO, 2010). No entanto, é interessante o fato de que o aumento dos valores observados para turbidez e sólidos totais não resultarem na redução dos níveis de oxigênio dissolvido do rio Paraopeba.

Outro ponto relevante é que, devido às características do rejeito armazenado na Barragem B1, que apresentavam uma certa rigidez e comportamento frágil (ROBERTSON et al, 2019), o deslocamento da lama deu-se através de uma massa sólida, a qual foi sedimentando ao longo do leito do rio. Isto pode ter corroborado para que, juntamente com as chuvas que ocorreram nos dias subsequentes, a vazão do rio se elevasse. Diante do exposto, considera-se que esta seja uma possível explicação para o aumento dos valores observados na estação localizada à montante do ponto de rompimento (BP036), para variáveis como Al dissolvido, por exemplo.

Pode ser pertinente levar-se em consideração que a massa de rejeitos não foi diretamente lançada sobre o corpo d'água, mas que, antes de alcançar o ribeirão Ferro-Carvão e posteriormente o rio Paraopeba, ela se deslocou através de diversas instalações da mina (como refeitório, escritórios, dentre outras) e também por casas, fazendas, pousadas, pontes e estradas da região (ROBERTSON et al, 2019). Esta ocorrência pode ter interferido nas elevações de valores médios observados para variáveis como alumínio dissolvido, cádmio total, chumbo total, cobre dissolvido e níquel total, uma vez que estão presentes em equipamentos eletrônicos, em quantidades significativas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do presente trabalho foi possível constatar que de uma forma geral, os resultados indicam que o rompimento da barragem B1 contribuiu para aumentar os níveis de diversos parâmetros de qualidade da água do rio Paraopeba. Isto é especialmente relevante para as variáveis diretamente relacionadas à mineração e beneficiamento de minério de ferro, tais como sólidos totais, turbidez, ferro dissolvido e manganês total. Quanto aos metais, tais como alumínio dissolvido, cádmio total, cobre total, chumbo total, mercúrio total, níquel total e zinco total, os resultados indicaram influência do rompimento no aumento nos níveis dessas variáveis, evidenciadas principalmente nas estações localizadas à jusante mais próximas do local do rompimento.

Alumínio dissolvido, ferro dissolvido, manganês total, mercúrio total e turbidez apresentaram valores históricos, no período anterior ao rompimento, superiores aos determinados pela Deliberação Normativa COPAM/CERH nº 1/2008. Este resultado é compreensível, considerando-se as características geológicas da região e o histórico da mineração de ouro no quadrilátero ferrífero (uso de mercúrio nos garimpos). Quanto aos metais chumbo total, níquel total e zinco total, historicamente os valores médios atenderam aos limites legais, salvo exceções pontuais (para o chumbo). Tendo em vista que estes elementos não estão diretamente relacionados com as atividades de mineração de ferro, concentrações mais elevadas pós-rompimento podem ter sido registradas devido ao desprendimento de partículas de fundo e/ou leito do rio, que possivelmente deslocaram-se para a coluna d'água devido à força da lama após o rompimento.

7. PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Haja vista que este trabalho é um registro da qualidade das águas do rio Paraopeba no período imediatamente após o rompimento da barragem, é pertinente que levantamentos futuros façam uma avaliação a longo prazo, com o intuito de avaliar a atual situação da qualidade das águas do corpo d'água em estudo.

Sugere-se, também, que próximos trabalhos façam uma correlação dos dados analisados com condições climatológicas, para possibilitar um melhor entendimento da relação das médias e/ou concentrações médias das variáveis estudadas com a qualidade das águas do rio Paraopeba, principalmente no que concerne a dados pluviométricos.

REFERÊNCIAS

ALAMINO, R C. J.; VILA VERDE, R. B. R.; FERNADES, F. R. C. O peso da mineração na Região Sudeste. Em: **Recursos Minerais e Comunidade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

AMPLO Engenharia e Gestão de Projetos Ltda. Estudo de Impacto Ambiental EIA. **LICENCIAMENTO AMBIENTAL CORRETIVO – OBRAS EMERGENCIAIS DECORRENTES DA RUPTURA DA BARRAGEM DA MINA CÓRREGO DO FEIJÃO E RECUPERAÇÃO AMBIENTAL DE SUA ÁREA DE INFLUÊNCIA**. Vol. 1. Belo Horizonte, 2019

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **INDICADORES DE QUALIDADE - ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS (IQA)**. Portal da Qualidade das Águas, 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil: 2012**. Brasília, 264 p., 2012.

ARAUJO, E. R.; OLIVIERI, R. D. FERNANDES, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. Em: **Recursos Minerais e Comunidade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Zinc – ToxFAQs™**. CAS n.º 7440-66-6. 2005.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Cyanide – ToxFAQs™**. CAS n.º 74-90-8, 143-33-9, 151-50-8, 592-01-8, 544-92-3, 506-61-6, 460-19-5, 506-77-4. 2006.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Boro – ToxFAQs™**. CAS n.º 7440-42-8. 2007.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. . Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Chromium – ToxFAQs™**. CAS n.º 7440-47-3. 2012a.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. . Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Cadmium – ToxFAQs™**. CAS n.º 7440-43-9. 2012b.

ATSDR – AGENCY FOR TOXIC SUBSTANCES AND DISEASES. . Division of Toxicology and Environmental Medicine. **Barium – ToxFAQs™**. CAS n.º 7440-39-3. 2013.

BAETEN, J.; LANGSTON, N.; LAFRENIERE, D. A spatial evaluation of historic iron mining impacts on current impaired Waters in Lake Superior's Mesabi Range. **Ambio**, p.231-244. 2018.

BARBIERI, E; MARQUES, H. L. A; BONDIOLI, A. C. V.; CAMPOLIM, M. B.; FERRARINI, A. T. Concentrações do nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato em áreas de engorda de ostras no município de Cananéia-SP. **Mundo da Saúde**, n. 38, p.105-115. São Paulo, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 de mar. de 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 410 de 05 de maio de 2009. Prorroga o prazo para complementação das condições e padrões de lançamento de efluentes, previsto no art. 44 da Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, e no art. 3o da Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 05 de mai de 2009.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA No 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 de mai de 2011.

BURRITT, R. L.; CHRIST, K. L. Water risk in mining: Analysis of the Samarco dam failure. **Journal of Cleaner Production**, n. 178, p.196-205, jan. 2018.

BYRNE, P.; HUDSON-EDWARDS, K. A.; BIRD, G.; MACKLIN, M. G.; BREWER, P. A.; WILLIAMS, R. D.; JAMIESON, H. E. Water quality impacts and river system recovery following the 2014 Mount Polley mine tailings dam spill, British Columbia, Canada. **Applied Geochemistry**, n. 91, p.64-74, 2018.

CARMO, F. F.; KAMINO, L. H. Y.; TOBIAS JUNIOR, R.; CAMPOS, I. C. DE; CARMO, F. F.; SILVINO, G.; CASTRO, K. J. S. X.; MAURO, M. L.; ROFRIGUES, N. U. A.; MIRANDA, M. P. S.; PINTO, E. F. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of

the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. **Perspectives In Ecology And Conservation**. v. 3, n. 15, p.145-151, jul. 2017.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Bário – Identificação da Substância**. Governo do Estado de São Paulo, 2017.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Qualidade das águas interiores do estado de São Paulo – Relatório de 2017**. Governo do Estado de São Paulo, 2018.

CPRM – COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Monitoramento Especial do Rio Paraopeba: Relatório 01: Monitoramento Hidrológico e Sedimentométrico**. Belo Horizonte, 2019.

COSTA, A. S. V. DA; BRAVIM, E. C.; VASCONCELLOS, C. D. Análise das alterações dos parâmetros de qualidade da água do Rio Do Carmo, afluente do Rio Doce, após rompimento da barragem de Fundão, em Mariana-MG. **Holos Environment**, v. 18, n. 2, p.160-176, 2018a.

COSTA, R. V. F. da; MATSCHULLAT, J.; LEITE, M. G. P.; NALINI Jr, H. A.; LEÃO, L. P. Geochemical mapping of potentially hazardous elements in surface waters and stream sediments of the Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v.32, n.2, p.243 - 267, 2018b.

COSTA, A. T.; NALINI, H. A.; LENA, J. C.; FRIESE, K.; MAGES, M. Surface water quality and sediment geochemistry in the Gualaxo do Norte basin, eastern Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. **Environmental Geology**, v. 45, p. 226–235, 2003.

DIAS, C. A.; COSTA, A. S. V.; GUEDES, G. R.; UMBELINO, G. J. M.; ALVES, J. H.; SILVA, T. G. M. Impactos do rompimento da barragem de Mariana na qualidade da água do rio Doce. **Revista Espinhaço**, Diamantina, v. 1, n. 7, p.21-35, ago. 2018.

DUBIŃSKI, J. Sustainable Development of Mining Mineral Resources. **Journal of Sustainable Mining**. Elsevier BV. v. 12, n. 1, p.1-6, 2013.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Condutividade**. 2001. Disponível em: < <http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/ecoagua/eco/condu.html> >. Acesso em: 05 jun. 2019.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. **O alumínio no corpo humano**. Bélgica, 2011a.

EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION. **O alumínio no tratamento da água**. Bélgica, 2011b.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 1998.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 1999.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2000.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2001.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2002.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2003.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2004.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2005.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2006.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2007.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2008.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2009.

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente; IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2010.

FERNANDES, G. W.; GOULART, F. F.; RANIERI, B. D.; COELHO, M. S.; DALES, K.; BOESCHE, N.; BUSTAMANTE, M.; CARVALHO, F. A.; CARVALHO, D. C.; DIRZO, R.; FERNANDES, S.; GALETTI JR, P.; MILLAN, V. E. G.; MIELKE, C.; RAMIREZ, J. L.; NEVES, A.; ROGASS, C.; RIBEIRO, S. P.; SCARIOT, A.; SOARES-FILHO, B. Deep into the mud: ecological and sócio-economical impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. **Natureza e Conservação.** Brazilian Journal of Nature Conservation. v.14, p.35-45, 2016.

FREITAS, C. M. DE; BARCELLOS, C.; ASMUS, C. I. R. F.; SILVA, M.A. DA; XAVIER, D. R. Da Samarco em Mariana à Vale em Brumadinho: desastres em barragens de mineração e Saúde Coletiva. **Cadernos de Saúde Pública.** v.35, n.5, 2019.

GLOTOV, V. E.; CHLACHULA, J.; GLOTOVA, L. P.; LITTLE, E. Causes and environmental impact of the gold-tailings dam failure at Karamken, the Russian Far East. **Engineering Geology,** v.245, p.236-247, 2018.

GOLDER ASSOCIATES LTD. **Mount Polley Mining Corporation post-event environmental impact assessment report – key findings report.**2015.

GOMES, M. A.; PEREIRA, C. A.; PERES, A. F. C. Caracterização tecnológica de rejeito de minério de ferro. **Revista Escola de Minas,** Ouro Preto, n. 64, p.233-236, 2011.

GRANATO, M. Utilização do aguapé no tratamento de efluentes com cianetos. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, 39p, 1995.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. A. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. The environmental impacts of the largest tailing dam failures worldwide. **Scientific Reports**, v. 7, p.1-13, 2017.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapa de Vegetação do Brasil. 3ed. 2004.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Informativo Nº 51: Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba, após o desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego do Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais.** 2019.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Portal HidroInfo – Informações sobre Recursos Hídricos.** 2018b. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/318-agua-superficial> >. Acesso em: 28 out. 2019.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2011.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2012.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2013.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2014.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2015.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2016.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2017.

IGAM – INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Relatório de qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais: projeto de monitoramento da qualidade das águas superficiais do Estado de Minas Gerais.** 360p. 2018a.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 1997-2001. Planilha.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 2002-2006. Planilha.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 2007-2011. Planilha.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 2012-2016. Planilha.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 2017. Planilha.

IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Séries Históricas de Monitoramentos da Qualidade das Águas Superficiais no Estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: Igam, 2018. Planilha.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil – 1981-2010: Precipitação Acumulada (mm).** 2010. Planilha.

KOSSOFF, D.; DUBBIN, W. E.; ALFREDSSON, M.; EDWARDS, S. J.; MACKLIN, M. G.; HUDSON-EDWARDS, K. A. Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation. **Applied Geochemistry**, v. 51, p.229–245, 2014.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** Campinas, SP: Editora Átomo, 3ed., 2010.

MACKLIN, M; G.; BREWER, P. A.; BALTEANU, D.; COULTHARD, T. J.; DRIGA, B.; HOWARD, A. J.; ZAHARIA, S. The long term fate and environmental significance of

contaminant metals released by the January and March 2000 mining tailings dam failures in Maramures, County, upper Tisa Basin, Romania. **Applied Geochemistry**, v. 18, 2ed., p.241-257, 2003.

MELO FILHO, A. B.; BISCONTINI, T. M. B.; ANDRADE, S. A. C. Níveis de nitrito e nitrato em salsichas comercializadas na região metropolitana do recife. **Ciência e Tecnologia Alimentar**, Campinas, n.24, p.390-392, 2004.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa COPAM nº 14, de 28 de dezembro de 1995. Dispõe sobre o enquadramento das águas da Bacia do rio Paraopeba. **Diário Executivo de Minas Gerais**, 1995.

MINAS GERAIS. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de Maio de 2008. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Executivo de Minas Gerais**, 2008.

MINAS GERAIS. **Parecer Único Nº 0786757/2018 (SIAM)**. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. 2018.

MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 9, n. 1, 2004.

MOURA, P. M.; BAPTISTA, M. B.; SCOTTI, M. R. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **Journal of Environment Quality**, v. 48, n. 2, p.439-449, 2019.

NICHO Engenheiros e Consultores Ltda. Estudo de Impacto Ambiental e Plano de Controle Ambiental EIA/PCA. **Continuidade das Operações da Mina da Jangada**. Belo Horizonte, 2014.

OLIVEIRA, A. R, M; BORGES, A. C.; MATOS, A. T.; NASCIMENTO, M. Estimation on the Concentration of Suspended Solids from Turbidity in the Water of Two Sub-Basins in the Doce River Basin. **Engenharia Agrícola**, v.38, n.5, 2018.

PEREIRA, R. S. Identificação e Caracterização das Fontes de Poluição em Sistemas Hídricos. **Revista Eletrônica de Recursos Hídricos - ReRH**, v. 1, n. 1, p.20-36, 2004.

PEREIRA, A. A.; van HATTUM, B.; BROUWER, A.; van BODEGON, P. M.; REZENDE, C. E.; SALOMONS, W. Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon. **J Soils Sediments**, v. 8, p. 239–252, 2008.

PICANÇO, F. E. L.; LOPES, E. C. S.; SOUZA, E. L. Fatores responsáveis pela ocorrência de ferro em águas subterrâneas da região metropolitana de belém/PA. Suplemento - Anais do XII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. **Revista Águas Subterrâneas**. p.1-17, 2002.

PONTALTI, G. C. **Nitritos e Nitratos: Venenos ou Nutrientes?** Seminário Bioquímica do tecido animal. Programa de Pós-Graduação em Ciências Veterinárias da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 8 p., 2011.

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

ROBERTSON, P. K.; MELO, L.; WILLIAMS, D. J.; WILSON, G. W. **Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão**. 88p., 2019.

RODRIGUES, A. S. L.; MALAFAIA, G.; COSTA, A. T.; NALINI Jr, H. A. Evaluation of the mineral exploration influence on sediment composition in the Gualaxo do Norte River Basin (MG-Brazil) based on geochemical and stratigraphic data. **Environmental Earth Sciences**, v.68, p. 965–972, 2013.

SANTOS, O. S. H., AVELAR, F. C.; ALVES, M.; TRINDADE, R. C.; MENEZES, M. B.; FERREIRA, M. C.; FRANÇA, G. S.; CORDEIRO, J.; SOBREIRA, F. G.; YOSHIDA, L. M.; MOURA, P. M.; BAPTISTA, M. B.; SCOTTI, M.R. Understanding the Environmental Impact of a Mine Dam Rupture in Brazil: Prospects for Remediation. **Journal of Environmental Quality**. v. 48, p. 439-449, 2019.

SCHPREJER, P. Exploração de minério de ferro em Caetité (BA) afeta meio ambiente e comunidades locais. 2014. Em: **Recursos Minerais e Comunidade: impactos humanos, socioambientais, econômicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2014.

SECRETARIA DE ESTADO DE SAÚDE DE SÃO PAULO. **Informe Técnico nº 1 – Mercúrio Metálico**. São Paulo, 2010.

SEGURA-SALAZAR, J.; TAVARES, L. Sustainability in the Minerals Industry: Seeking a Consensus on Its Meaning. **Sustainability**, v. 10, n. 5, p.1429-1467, 2018.

SEMA - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. **Nota de Esclarecimento 7 – Desastre Barragem B1: Área impactada entre Barragem B1 e rio Paraopeba chega a 290 hectares**. 2019. Disponível em: <<http://www.meioambiente.mg.gov.br/noticias/1/3745-nota-de-esclarecimento-7-desastre-barragem-b1>>. Acesso em 29 mar. 19

SEMAD - SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **Portal Infohidro Informações sobre Recursos Hídricos: Água Superficial**. 2018. Disponível em:

<<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/318-agua-superficial>>. Acesso em 02 set. 19

STEFANIAK, K.; WRÓŻYŃSKA, M. On possibilities of using global monitoring in effective prevention of tailings storage facilities failures. **Environmental Science and Pollution Research**. v. 25, p. 5280-5297, 2017.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Data Quality Assessment: Statistical Methods for Practitioners**. Washington: Office of Environmental Information, 2006.

VASCONCELOS, F. M.; TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Avaliação da Qualidade de Água – Base Tecnológica para a Gestão Ambiental**. 1. ed., Belo Horizonte, MG: SMEA, 2009.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade da água e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

WHO WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programs**. UNEP/WHO, 1996.

WINDMOLLER, C. C.; SANTOS, R. C.; ATHAYDE, M.; PALMIERI, H. E. L. Distribuição e especiação de mercúrio em sedimentos de áreas de garimpo de ouro do quadrilátero ferrífero (MG). **Química Nova**, São Paulo, v. 30, n. 5, p. 1088-1094, Oct. 2007

WISE URANIUM PROJECT. **Chronology of major tailings dam failures**. 2019. Disponível em: <<https://www.wise-uranium.org/mdaf.html>>. Acesso em: 26 out. 2019.