



UFOP



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

Universidade Federal de Ouro Preto

Escola de Minas – Departamento de Engenharia Ambiental

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental



Daniel Silva Neiva

**UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORMIDADE AO
ENQUADRAMENTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DAS
ÁGUAS EM ESTAÇÕES DA SUB-BACIA DO RIO PIRANGA,
ANTES E APÓS O ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE
FUNDÃO**

Ouro Preto

2021

DANIEL SILVA NEIVA

**UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE CONFORMIDADE AO
ENQUADRAMENTO PARA ANÁLISE DA QUALIDADE DAS
ÁGUAS DA SUB-BACIA DO RIO PIRANGA, ANTES E APÓS O
ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO**

Trabalho Final de Curso apresentado
como parte dos requisitos para obtenção
do Grau de Engenheiro Ambiental na
Universidade Federal de Ouro Preto.

Data da aprovação: 16/12/2021

Área de concentração: Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago – UFOP

Co-orientadora: M.Sc. Grazielle Rocha dos Santos – UFOP

Ouro Preto

2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

N417u Neiva, Daniel Silva.

Utilização do índice de conformidade ao enquadramento para análise da qualidade das águas da sub-bacia do Rio Piranga, antes e após o rompimento da Barragem de Fundão. [manuscrito] / Daniel Silva Neiva. - 2021.

77 f.

Orientador: Prof. Dr. Aníbal da Fonseca Santiago.

Coorientadora: Ma. Grazielle Rocha dos Santos.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Ambiental .

1. Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE). 2. Barragens de rejeito - Barragens de Fundão - Santa Rita Durão (Mariana, MG). 3. Sub-bacia - Rio Piranga (MG). 4. Água - Qualidade. 5. Meio ambiente - Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE). 6. Recursos hídricos. I. Santiago, Aníbal da Fonseca. II. Santos, Grazielle Rocha dos. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 504:502

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL



FOLHA DE APROVAÇÃO

Daniel Silva Neiva

Utilização do Índice de Conformidade ao Enquadramento para Análise da Qualidade das Águas da Sub-Bacia do Rio Piranga, Antes e Após o Rompimento da Barragem de Fundão

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Ambiental

Aprovada em 16 de dezembro de 2021.

Membros da banca

Dr. Aníbal da Fonseca Santiago - Orientador – Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Hubert Mathias Peter Roeser – Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Múcio André dos Santos Alves Mendes - Universidade Federal de Ouro Preto

Aníbal da Fonseca Santiago, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 23/12/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Aníbal da Fonseca Santiago, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2021, às 19:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0262157** e o código CRC **9E6705DF**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.013451/2021-37

SEI nº 0262157

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35400-000
Telefone: 3135591546 - www.ufop.br

*Dedico este trabalho a minha mãe,
por ser um exemplo de perseverança,
e a todos os alunos que se dispuseram
a aperfeiçoar os seus conhecimentos e
contribuir com o desenvolvimento do país.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus pela conclusão desta importante etapa na minha vida, à vida por ter me proporcionado momentos e ensinamentos que levarei sempre comigo, à minha mãe, por todo amor, ensinamentos e lições de vida que me ensinaram a sempre querer evoluir, seus conselhos, e por ter me ensinado a buscar aquilo que é mais valioso primeiramente “o conhecimento”.

À minha Tia Glória, por ter sido uma pessoa tão especial para mim, por todo amor e amizade, todo suporte, pela atenção, conversas e conselhos.

Aos meus avós que sempre estiveram comigo e me apoiaram durante todo esse tempo.

Aos meus irmãos, pela amizade, todo apoio e incentivo.

Aos meus amigos Ryan, Henrique, Felipe (Crazy), Victor (Tomson), pela amizade, companheirismo e todos os memoráveis momentos compartilhados comigo, como também aqueles que não pude aqui mencionar, mas estiveram presentes e contribuíram com a minha evolução pessoal e profissional.

Aos professores da UFOP, pela grande competência e ensinamentos. Especialmente ao professor Aníbal, pela orientação, conselhos, ensinamentos e ideias compartilhadas, ao professor Gilson Nunes (Labmeca e SEAOP), pela confiança e saberes astronômicos (bons céus para todos nós).

Á Grazielle, pela co-orientação, ideais, todo apoio e suporte.

A UFOP, por ter me proporcionado um ensino de qualidade, a PRACE, a PROGRAD, a Fundação Gorceix e ao DEAMB, por todo suporte fundamental e apoio durante a realização do curso. A todos os técnicos e colaboradores envolvidos nesta instituição, por todos os serviços prestados, sempre com simpatia e um sorriso no rosto.

A todos vocês, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

No final do ano de 2015, a sub-bacia do rio Piranga foi palco de um grave desastre ambiental no Brasil, causado pelo rompimento das estruturas de contenção da Barragem de Fundão de propriedade da mineradora Samarco S.A., localizada no subdistrito de Mariana, Bento Rodrigues, em Minas Gerais. Devido aos impactos advindos com a passagem dos rejeitos, estes que chegaram ao oceano atlântico em alguns dias, causando fortes alterações na qualidade das águas do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e Doce. Neste contexto e após se passado seis anos, o presente trabalho teve como objetivo principal aplicar o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE), no período de 2011 a 2020, de forma a entender a situação dos parâmetros de qualidade da água mais impactados nos períodos anteriores e após o rompimento da barragem, comparando-os com os limites estabelecidos pela resolução CONAMA nº 357. Ao observar outros estudos de dados disponíveis na literatura, foram considerados para o cálculo do ICE os parâmetros: alumínio dissolvido, cloreto, ferro dissolvido, fósforo, manganês, nitrogênio amoniacal, oxigênio dissolvido, pH, sólidos em suspensão total e turbidez. Os dados da série histórica foram obtidos a partir do portal INFOHIDRO disponibilizados pelo IGAM. Foram escolhidas duas estações diretamente afetadas pela passagem dos rejeitos, uma no rio do Carmo e outra no rio Doce, e a título de comparação foi escolhida também uma estação onde não houve influência dos rejeitos no rio Piranga. O índice mostrou uma grande sensibilidade para detecção de variações na qualidade da água, mostrando alterações em seu resultado final frente à violação da legislação de um único parâmetro, mostrando uma grande vantagem para ser utilizado em sistemas com grande periodicidade de coletas. A desvantagem de se utilizar o ICE com dados públicos é que não há uma padronização de coletas para diferentes estações o que pode interferir nos resultados. Nos períodos críticos os parâmetros que exerceram maior impacto sobre o resultado do ICE foram os sólidos em suspensão total, turbidez e manganês. Para presença de metais na água, foi verificada uma forte relação no aumento da concentração de alumínio, ferro e manganês juntamente com o aumento da concentração de sólidos em suspensão

nas águas, para todas as estações, mostrando que a presença destes elementos nas águas tem relação com aspectos geológicos locais. Pode-se concluir também que os rejeitos depositados nas calhas e leitos dos corpos hídricos têm contribuído no aumento da concentração de ferro na estação no rio Doce em anos mais recentes, como possivelmente também para o alumínio, pois a concentração destes elementos apresentaram valores máximos superiores aos registrados em períodos anteriores ao rompimento com tendência de elevação.

Palavras-chaves: Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE); Rompimento Barragem de Fundão; Sub-bacia do Rio Piranga; Qualidade de águas. Índices Ambientais; Recursos hídricos.

ABSTRACT

At the end of 2015, the Piranga River sub-basin was the scene of a serious environmental disaster in Brazil, caused by the rupture of the containment structures of the Fundão Dam owned by the mining company Samarco S.A., located in the sub-district of Mariana, Bento Rodrigues, in Minas Gerais. Due to the arising impacts from the passage of mud tailings, which reached the Atlantic Ocean in a few days, causing strong changes in the water quality on the Gualaxo do Norte, Carmo and Doce rivers. In this context and after six years have passed, the main objective of this work was to apply the Canadian Water Quality Index (CWQI), in the period from 2011 to 2020, in order to understand the situation of the water quality parameters which has been most impacted, in the periods previous and after the dam rupture, comparing them with the limits established by CONAMA resolution n° 357. When observing other studies and data available in the literature, the following parameters were considered for the CWQI calculation: dissolved aluminum, chloride, dissolved iron, phosphorus, manganese, ammonia nitrogen, dissolved oxygen, pH, solids in total suspension and turbidity. The historical data series were obtained from the INFOHIDRO website provided by IGAM. Two monitoring stations directly affected by the passage of mud tailings were chosen, one in the Carmo river and the other in the Doce river, and in terms of comparison, another monitoring station where there was no influence of the mud tailings in the Piranga river was also chosen. The index showed a great sensitivity for detecting variations in water quality, showing changes in its final result against the violation of the law of only a single parameter, showing a great advantage to be used in systems with a larger frequency of sampling. The disadvantage of using CWQI with public data is that there is no standardization of sampling for different monitoring stations, which can interfere with the results. In critical periods, the parameters that had the greatest impact on the CWQI result were total suspended solids, turbidity and manganese. For the presence of metals in water, a strong relationship was found in the increase of aluminum, iron and manganese concentration along with the increase in the concentration of suspended solids in the water, for all monitoring stations, showing that the presence of these elements in the water is related with local geological aspects. It can be also concluded that the mud tailings deposits deposited in gutters and beds of water bodies have contributed to

the increase the iron concentration at the Doce river station in the most recent years, as well as possibly for aluminum, as the concentration of these elements showed maximum values higher than those recorded in periods prior to the dam rupture with an upward trend.

Keywords: Canadian Water Quality Index (CWQI); Rupture of the Fundão Dam; Piranga river sub-basin; Water quality. Environmental indexes; Water resources

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Curvas médias de variação da qualidade das águas.	13
Figura 2: Pontos de monitorados pela CPRM e ANA durante a primeira campanha de campo em 2015.	25
Figura 3: UPGRH do Rio Piranga inserida dentro da bacia do Rio Doce e estações utilizadas	33
Figura 4: Estações de monitoramento utilizadas neste trabalho.....	34
Figura 5: Concentrações de Al, Fe e Mn na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2011 a 2020	38
Figura 6: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2011 a 2020	39
Figura 7: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD071 no Rio do Carmo entre 2011 a 2020.....	42
Figura 8: Concentrações de Al, Fe, P e Mn na estação RD013 – Rio Piranga entre 2011 a 2020	44
Figura 9: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD013 – Rio Piranga entre 2011 a 2020	45
Figura 10: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD13 no Rio Piranga entre 2011 a 2020	47
Figura 11: Concentrações de Al, Fe, P e Mn na estação RD072 – Rio Doce entre 2011 a 2020	49
Figura 12: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD072 – Rio Doce entre 2011 a 2020	50
Figura 13: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD072 no Rio Doce entre 2011 a 2020.....	52
Figura 14: Concentrações de Pb na estação RD072 - Rio Doce, entre 2012 a 2020	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de enquadramentos de corpos d'água e seus usos.....	9
Tabela 2: Parâmetros de qualidade da água utilizados no IQA e seus respectivos pesos.....	12
Tabela 3: Classificação do IQA no Brasil.....	14
Tabela 4 Classificação e descrição do ICE.....	22
Tabela 5: Síntese da base cartográfica digital utilizada.....	31
Tabela 6: Descrição das estações de monitoramento utilizadas.....	33
Tabela 7: Parametros utilizados no cálculo do ICE e limites de qualidade para corpos d'água classe 2 segundo os usos preponderantes.....	35
Tabela 8: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD071 – Rio do Carmo.....	37
Tabela 9: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD013 – Rio do Piranga.....	43
Tabela 10: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD072 – Rio Doce.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	5
2.1	Objetivo Geral.....	5
2.2	Objetivos Específicos	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1	LEGISLAÇÃO E ENQUADRAMENTO DE CURSOS D'ÁGUA.....	6
3.2	ÍNDICES AMBIENTAIS	11
3.3	ÍNDICE DE CONFORMIDADE AO ENQUADRAMENTO - ICE.....	17
3.3.1	Descrição Conceitual e Cálculo do ICE	19
3.4	SUB-BACIA DO RIO PIRANGA E ESTUDOS PÓS-ROMPIMENTO DA BARRAGEM	23
3.4.1	Sub-bacia do rio Piranga.....	23
3.4.2	Estudos pós-rompimento da Barragem de Fundão.....	24
4	METODOLOGIA	31
4.1	Base cartográfica digital	31
4.2	Área de Estudo	32
4.3	Dados Utilizados.....	35
5	Resultados e discussão	37
5.1	Rio do Carmo (RD071)	37
5.2	Rio Piranga (RD013)	43
5.3	Rio Doce (RD072)	48
5.4	Considerações.....	52
6	Conclusão	57

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
7 Bibliografia	59
ANEXO A – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd071 – rio do carmo 64	
ANEXO B – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd013 – rio piranga 66	
ANEXO C – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd072 – rio doce 69	
ANEXO D – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2012 a 2020.	72
ANEXO E – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD072 – Rio Doce entre 2012 a 2020.	74
ANEXO F – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD013 – Rio Piranga entre 2012 a 2020.	76

1 INTRODUÇÃO

No dia 5 de Novembro de 2015, a barragem de rejeitos de mineração de ferro, conhecida como Barragem de Fundão, rompeu-se despejando aproximadamente 33 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro, sílica e outros materiais particulados na bacia hidrográfica do rio Gualaxo do Norte. Essa estrutura de contenção é de propriedade da Samarco Mineração S/A, controlada pela Vale e BHP Billiton, situada no Complexo Industrial de Germano no município de Mariana – MG.

A avalanche de lama liberada pelo rompimento de grande magnitude, alta energia e velocidade, inicialmente atingiu a barragem de Santarém, situada logo a jusante, esta teve parte de sua estrutura superior do maciço erodida, mas não se rompeu, mesmo após incorporar grandes volumes de água e rejeitos que não foram projetados para serem depositados ali. Em seu trajeto a onda de lama atingiu o Córrego de Fundão e o Córrego de Santarém, destruindo totalmente suas calhas e cursos naturais (MPF, 2020).

A seis km da barragem de Santarém, a lama soterrou e destruiu grande parte do Subdistrito de Bento Rodrigues, matando 19 pessoas e desabrigando várias famílias. No rio Gualaxo do Norte, o rejeito percorreu 55 km até atingir o rio do Carmo seguindo por mais 22 km até encontrar com o rio Piranga onde se forma o rio Doce. Neste trecho, a onda de lama ocorreu de forma mais agressiva, sendo o volume de rejeitos recebidos desproporcional à capacidade de drenagem natural desse corpo d'água, acarretando o transbordamento e deposição de rejeitos nas margens, remoção da cobertura vegetal e das camadas superficiais do solo e sedimentos de fundo por arraste, soterramento da vegetação aquática, além de atingir diretamente várias comunidades rurais como Paracatu de Baixo, Camargos, Águas Claras, Pedras, Ponte do Gama, Gesteira e os Municípios de Barra Longa, Rio Doce e Santa Cruz do Escalvado (MPF, 2020).

No rio Doce, grande partes dos rejeitos ficaram retidos na barragem da Usina Hidroelétrica (UHE) Risoleta Neves – Candonga. Segundo dados apresentados pela Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), a UHE Candonga foi capaz de reter cerca de 9 milhões de metros cúbicos do rejeito, um equivalente a 30% do volume total de rejeitos liberados com o rompimento (ANA, 2016). Após esse trecho, foi observada uma onda de cheia, com menor concentração de sedimentos e elevada

turbidez, gerando alguns alagamentos em seu trecho médio e deposições de sedimentos conforme o fluxo perdia intensidade e energia, onde praticamente a lama passou a correr apenas na calha central do rio, conforme a força da onda ia dissipando-se, até desaguar no Oceano Atlântico no dia 21 de Novembro de 2015 na localidade de Regência – ES. Os principais danos associados a este trecho foram relacionados à poluição hídrica, interrompendo total ou parcialmente a captação e distribuição de água em 12 municípios, restringindo o uso da água para a indústria e demais atividades, irrigação, criação de animais além de perda de vida aquática e meio de subsistência, afetando uma população estimada em 424.000 pessoas (ANA, 2016).

Dentre os principais impactos causados pelo rompimento da barragem pode-se destacar o assoreamento e alteração morfológica dos corpos hídricos atingidos, destruição de áreas de preservação permanente nos trechos de cabeceira, interrupção no abastecimento e prejuízos econômicos às atividades de dependem da qualidade das águas destes corpos hídricos, prejuízos à produção de energia nas hidrelétricas, comprometimento da pesca em toda a extensão do rio e na transição com o ambiente marinho, comprometimento do turismo na região da foz do rio Doce, além da perturbação do equilíbrio dos ecossistemas aquáticos (ANA, 2016).

O rompimento da Barragem de Fundão provocou fortes danos econômicos, sociais e ambientais, tirando a vida de 19 pessoas, degradando uma área aproximadamente de 240 hectares de Mata Atlântica, impactando 41 cidades foram afetadas nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, três reservas indígenas antigas e mais de 14 toneladas de peixes mortos, degradando o total de aproximadamente 633,2 km de cursos d'água. O acidente é tido como um dos maiores desastres ambientais do Brasil e seus prejuízos são perenes e continuarão ainda por muitas gerações (MPF, 2020).

No estado de Minas Gerais, o Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), desenvolve o projeto Águas de Minas desde 1997, que conta com mais de 600 estações de monitoramento distribuídas nas bacias hidrográficas do estado, disponibilizando a série e histórica, permitindo assim uma análise qualitativa dos parâmetros de qualidade da água ao longo do tempo O projeto é executado em parceria com o Instituto SENAI de Tecnologia e Meio Ambiente, que realiza a coleta e análises laboratoriais de aproximadamente 50 parâmetros físico, químicos e microbiológicos (IGAM, 2017).

Em virtude do rompimento da barragem de Fundão, o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) foi acionado para a execução de um plano

emergencial de monitoramento da qualidade das águas dos principais corpos d'água atingidos pelo desastre. O monitoramento contou com as 12 estações já implantadas na bacia hidrográfica do rio Doce, por disporem de uma séria história robusta para comparação (sendo adicionado mais um ponto na foz do Rio Gualaxo do Norte). Também houve a seleção e aumento da frequência de observação dos parâmetros relevantes que permitissem uma melhor avaliação dos níveis de poluição advindos com o rompimento (IGAM, 2017).

De forma a lidar com uma grande quantidade de informações relativas a diferentes aspectos e parâmetros de qualidades das águas, Costa (2016) destaca a utilização de índices ambientais como uma estratégia importante nos programas de monitoramento, por traduzirem as várias informações em um único número, símbolo, cor ou texto de fácil compreensão, agilizando o processo de interpretação dos dados. Segundo a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) em CETESB (2017), os diferentes tipos de índices e indicadores ambientais aplicam-se a situações e usos específicos, por considerarem apenas parâmetros de qualidade da água representativos frente ao que se deseja analisar, como a qualidade da água para abastecimento público, nível de eutrofização de rios e reservatórios, proteção de comunidades aquáticas, dentre outros índices que podem ser desenvolvidos, ou adaptados como observado em (ZAGATTO, *et al.*, 1999).

O *Canadian Council of Ministers of the Environment* (CCME) destaca a utilização dos índices como uma importante ferramenta para refletir uma situação atual e geral da qualidade da água ao longo do tempo. Neste sentido, diversos índices ou indicadores ambientais vem sendo utilizados no Brasil e no mundo por diversas entidades públicas, companhias de distribuição de água e pesquisadores, para reportarem a qualidade das águas. Neste sentido, em 1997, o (CCME) realizou adaptações em outro índice, criando o *CCME Water Quality Index* (CCME WQI), traduzido e utilizado no Brasil como Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE). Diferenciando-se dos outros índices ambientais já desenvolvidos, que possuem propostas objetivas de aplicação, o ICE permite a livre escolha dos parâmetros de qualidade de entrada para o seu cálculo. Estes parâmetros podem variar dependendo das condições locais ou o propósito de uso, pois o índice baseia-se na abrangência, frequência e amplitude das variáveis que não

atendem os padrões de qualidades propostos por lei ou valor limite predeterminado (CCME, 2017).

Diante da problemática apresentada e conforme destacado por Reis (2019) e Santos (2018) sobre a necessidade de dados de qualidade das águas nas regiões impactadas pelo rompimento da barragem que subsidiem propostas ou novos estudos mais efetivos para a gestão destes recursos, torna-se plausível a aplicação do ICE, índice proposto por CCME (2001a). O presente trabalho propõe levantar as principais características impactadas em decorrência do rompimento da barragem, avaliar o impacto decorrendo do rompimento utilizando o ICE, e analisar como os impactos afetaram a qualidade das águas e se manifestam ao longo dos anos, de acordo com o Índice de Conformidade ao Enquadramento.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Obter o Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) de estações de monitoramento de qualidade da água do IGAM afetadas (rio do Carmo e Doce) e não afetadas (rio Piranga) pelo rompimento da barragem de Fundão para o entendimento da dinâmica dos impactos advindos pela passagem dos rejeitos da barragem na qualidade das águas.

2.2 Objetivos Específicos

- Obter junto ao IGAM os dados do monitoramento de qualidade da água para as estações localizadas no rio do Carmo, Doce e Piranga para avaliar a condição dos parâmetros impactados pelo rompimento da barragem nas estações afetadas.
- Selecionar as variáveis de qualidade da água para a obtenção do ICE e verificar o comportamento do ICE nas estações escolhidas no período de 2011 a 2020.
- Inferir sobre os possíveis fatores responsáveis pelo comportamento do ICE no período avaliado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 LEGISLAÇÃO E ENQUADRAMENTO DE CURSOS D'ÁGUA

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA) criada pela Lei nº 6.938 de 1981 instituiu o Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA), integrado por diversos órgãos federais, estaduais e municipais, sendo o órgão superior desse sistema o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Esse órgão delibera à respeito das diretrizes e políticas governamentais do meio ambiente, no âmbito de sua competência, estabelecendo normas, condições e padrões de qualidade, relativos ao controle e à manutenção dos recursos hídricos (BRASIL, 1981).

Com base nessa atribuição em 1986 em sua resolução de nº 20, o CONAMA iniciou a gestão da qualidade das águas em âmbito nacional, classificando as águas doces, salobras e salinas, de acordo com seus níveis de qualidade, determinados por indicadores e parâmetros específicos. E o enquadramento como um determinante de nível de qualidade (classe) à qual o corpo hídrico deveria estar enquadrado, não necessariamente refletindo o seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir, expressando metas finais a serem mantidas ou alcançadas ao longo do tempo (BRASIL, 1986).

A Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como Lei das Águas, institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria a Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos composto pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), a Agência Nacional das Águas (ANA), os Conselhos de Recursos Hídricos dos estados, como também os Comitês de Bacia Hidrográfica. A lei define e classifica o enquadramento dos corpos de águas em classes, como um instrumento de planejamento, fundamental para a adequação e melhoria da gestão dos recursos hídricos, de forma racional e integrada, segundo seus usos preponderantes, em padrões de qualidade compatíveis com seus respectivos usos mais exigentes, visando o desenvolvimento sustentável e o uso racional destes recursos (BRASIL, 1997).

No ano 2005, a Resolução CONAMA nº 357 revogou e substituiu a Resolução nº 20 de 1986 e passou a dispor sobre as novas diretrizes de classificação dos corpos d'água. Conforme ANA (2020), as adequações da CONAMA nº 357 foram necessárias e são mais compatíveis com a Política Nacional de Recursos Hídricos, representando um

avanço normativo ao considerar que as metas para o enquadramento final poderiam ser fixadas em metas progressivas intermediárias ou obrigatórias para a sua efetivação.

Do ponto de vista estratégico político a CONAMA nº 357 permite a implementação das ações previstas para o enquadramento de forma mais participativa e gradual, pois anteriormente as classes de usos eram definidas assim que a norma de enquadramento fosse publicada, de modo que para corpos hídricos onde a qualidade da água era compatível com seus respectivos usos, poderia parecer uma abordagem razoável quanto à preservação destes ambientes, mas para corpos de águas com qualidade já comprometidas, dificilmente haviam discussões e ações voltadas para a recuperação destes, sendo a implantação do enquadramento uma das etapas mais desafiadoras nos processos de gestão (ANA, 2020).

Ficou definido também no artigo de nº 38 da CONAMA 357, que o enquadramento dos corpos de água seriam feitos de acordo com as normas e procedimentos definidos pelo Conselho Nacional de Recurso Hídricos (CNRH) e Conselho Estaduais de Recursos Hídricos (BRASIL, 2005). Em 2008 o CNRH em sua Resolução de nº 91, que dispõe sobre os procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos, estabelece em seu Art. 2º que nos procedimentos para o enquadramento os valores a serem observados serão conforme os dispostos na CONAMA nº 357 e, acrescenta também no seu Art. 11º que cabe aos órgãos gestores articularem-se nos diferentes níveis da federação para que os enquadramentos de corpos d'água de uma mesma bacia hidrográfica sejam compatíveis (BRASIL, 2005).

Atualmente as propostas para o enquadramento são elaboradas pelas agências de águas ou entidades delegatárias e discutidas nos Comitês de Bacias. Como um instrumento de planejamento, deve ser orientado em três perspectivas: i) o rio que temos; ii) o rio que queremos; iii) o rio que podemos ter, levando em consideração também os interesses sociais, econômicos, políticos e ambientais. Em caráter normativo cabe a ANA, implementar e operar controle e avaliação dos instrumentos da PNRH, onde a aprovação final do enquadramento acontece em âmbito dos CRH de acordo com a esfera de jurisdição do corpo hídrico (ANA, 2020).

As classes para enquadramento definidas pela Resolução CONAMA n° 357/2005, são determinadas conforme limites individuais estabelecidos para cada substância em cada classe. As águas doces são divididas em cinco classes, sendo elas: classe especial e classes de 1 a 4. Águas doces de classe especial são aquelas destinadas aos usos mais exigentes, como o consumo humano ou a preservação e equilíbrio de ambientes aquáticos, sendo proibido o lançamento de qualquer tipo de efluentes, mesmo que tratados. Quanto maior a classe, menor é o nível de qualidade da água, como também menor são as restrições referentes às atividades que possam impactar a qualidade dessas águas. A Tabela 1 mostra as classes de enquadramento dos corpos de águas doces segundo os usos a que se destinam.

Tabela 1: Classes de enquadramentos de corpos d'água e seus usos.

USOS DAS ÁGUAS DOCES	CLASSES DE ENQUADRAMENTO DOS CORPOS D'ÁDUA				
	ESPECIAL	1	2	3	4
Preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas	Classe mandatória em Unidades de Conservação e Proteção Integral				
Proteção das comunidades aquáticas		Classe mandatória em Terras Indígenas			
Recreação do contato primário					
Aquicultura					
Abastecimento para o consumo humano	Após desinfecção	Após tratamento simplificado	Após tratamento convencional	Após tratamento convencional avançado	
Recreação do contato secundário					
Pesca					
Irrigação		Hortaliças consumidas cruas e frutas que se desenvolvem rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção da película	Hortaliças, Frutíferas, parques, jardins, capos de esporte e lazer	Culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras	
Dessedentação de animais					
Navegação					
Harmonia paisagística					

Fonte: Adaptado de ANA (2020)

Apesar das águas de classe 4 serem destinadas somente à navegação e harmonia paisagística, existem padrões de qualidade estabelecidos para conformidade com a classe como odor, materiais flutuantes, óleos e graxas, faixa de pH e oxigênio dissolvido (ANA, 2020). Em Minas Gerais, o Conselho Estadual de Política Ambiental

(COPAM) junto como Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH-MG) em sua Deliberação Normativa Conjunta de n.º 1 de 2008 estabelece as diretrizes ambientais para o processo de enquadramento de águas superficiais no estado de Minas Gerais, como também dispõe sobre os limites individuais para cada substância. A normativa estadual segue os mesmos princípios e critérios de classes dispostos pela CONAMA, contudo é mais restritiva à certos limites e leva em consideração também parâmetros adicionais e aspectos biológicos não observados pela resolução nacional.

O termo “qualidade de água” por vezes transmite a ideia onde o estado da água está relacionado especificamente à sua pureza ou ausência de substâncias. Entretanto, do ponto de vista da gestão ambiental, a qualidade da água refere-se mais propriamente as características físicas, químicas e biológicas, desejáveis ou necessárias para determinado uso, do que grau de pureza das águas de determinado corpo hídrico (GLORIA, HORN e HILGEMANN, 2017).

A degradação ambiental, conforme conceituada no Brasil pela PNMA é “a alteração adversa das características do meio ambiente” e apesar de características naturais como a geomorfologia, topografia e vegetação da bacia de drenagem serem fontes de contaminação natural de cursos d’águas, tornando as águas restritas a determinados usos, as fontes antrópicas são as principais causadoras da depleção da qualidade das águas no mundo.

Fatores como a expansão urbana e o crescimento populacional, a má utilização do solo, processos produtivos na agricultura, agropecuária e o despejo de efluentes domésticos ou industriais *in-natura* sem qualquer tipo de tratamento, tem causado efeitos negativos na qualidade das águas superficiais, superando a capacidade autodepurativa dos corpos hídricos e criando vários pontos de poluição pontuais e difusos dentro da bacia hidrográfica (GLORIA, HORN e HILGEMANN, 2017).

Como resultado da crescente preocupação social os aspectos ambientais, visando o desenvolvimento sustentável e, a fim de garantir um meio ambiente ecologicamente equilibrado para as gerações atuais e futuras, foram instituídos os índices e indicadores ambientais de qualidade, como modelos matemáticos considerados ferramentas eficientes no diagnóstico ambiental. Os programas de monitoramento ambiental requerem cada vez mais uma maior quantidade de dados em níveis de complexidade cada vez mais elevados, onde os índices tem um papel importante no processo decisório de políticas públicas, por tratarem um grande número de dados de maneira

sistemática, com resultados acessíveis de fácil interpretação e comunicação com o público leigo (CETESB, 2017).

3.2 ÍNDICES AMBIENTAIS

O primeiro índice de qualidade das águas a ser utilizado no Brasil foi o Índice de Qualidade de Águas (IQA), criado em 1970 nos Estados Unidos pela *National Sanitation Foundation*, e em 1975 após algumas adaptações começou a ser utilizado pela (CETESB), sendo hoje o principal índice de qualidade de águas utilizado no país. O IQA foi desenvolvido principalmente para a avaliação da qualidade da água bruta para o abastecimento público, pois os parâmetros de qualidade que fazem parte deste índice refletem a contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos e considera apenas os aspectos inerentes ao tratamento dessas águas (CETESB, 2017).

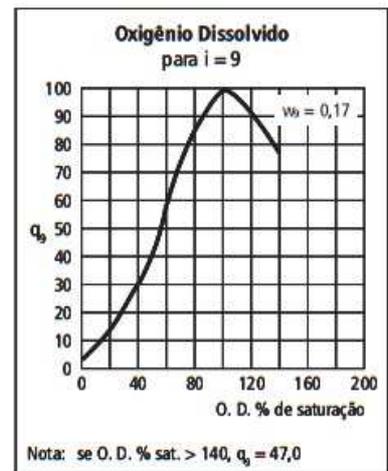
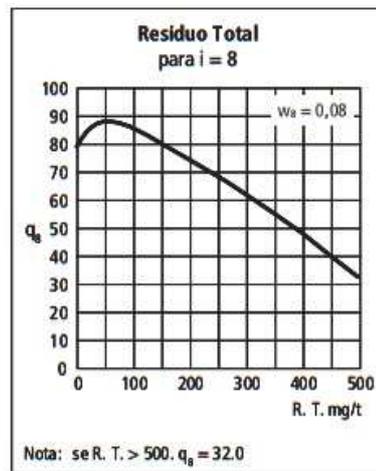
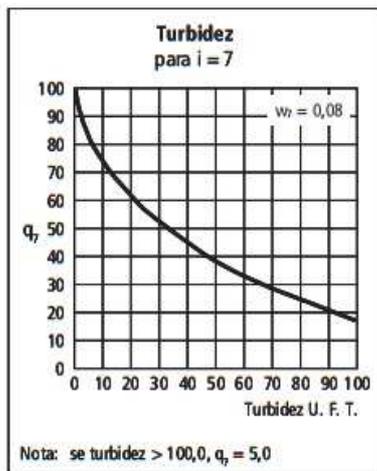
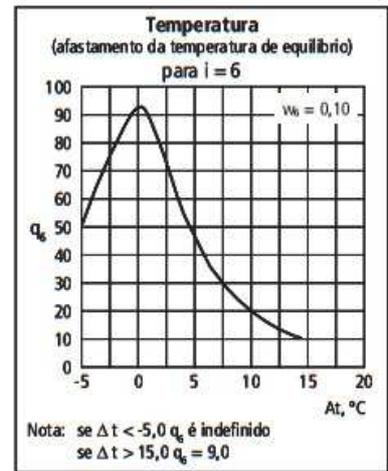
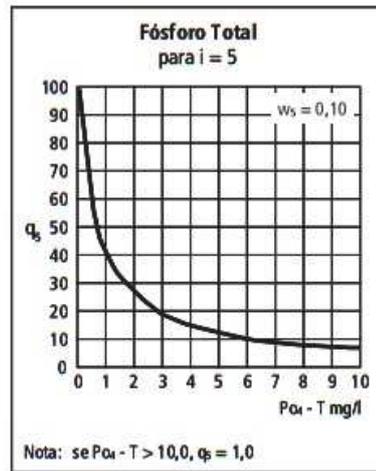
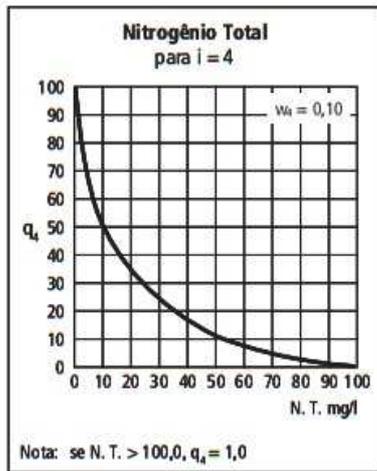
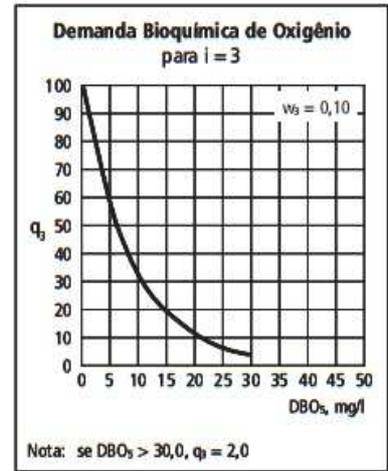
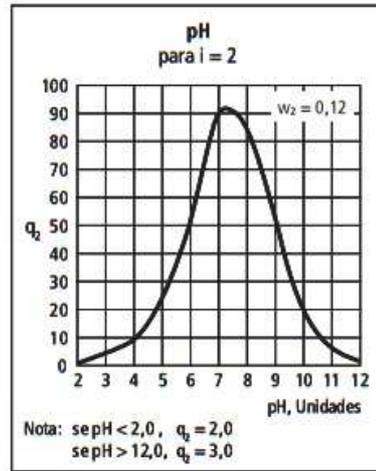
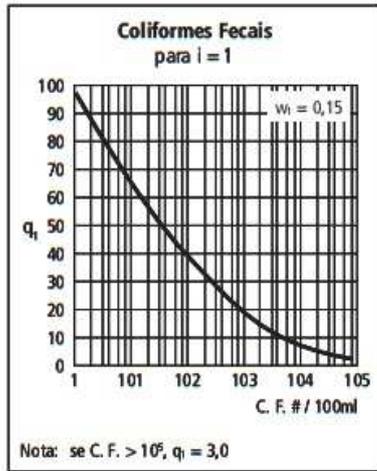
O IQA é composto por nove parâmetros, onde cada um possui seu respectivo peso dentro do índice, pré-determinados conforme a sua importância na qualidade global das águas para o consumo humano. Os parâmetros utilizados no IQA e seus respectivos pesos (w_i) são mostrados na Tabela 2. Para cada um destes parâmetros também é atribuído um valor de qualidade (q_i), que é obtido através das respectivas curvas médias de variação da qualidade das águas em função de da concentração, conforme a Figura 1.

Tabela 2: Parâmetros de qualidade da água utilizados no IQA e seus respectivos pesos.

Parâmetro de Qualidade	Peso (w)
Oxigênio Dissolvido	0,17
Coliformes Termotolerantes	0,15
PH	0,12
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5,20)	0,10
Temperatura	0,10
Nitrogênio Total	0,10
Fósforo Total	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo Total	0,08

Fonte: Adaptado de ANA (2021).

Figura 1: Curvas médias de variação da qualidade das águas.



Fonte: CETESB (2017).

Por fim, o IQA é calculado através do produtório ponderado de cada parâmetro, conforme a fórmula.

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i}$$

Onde:

IQA: Índice de Qualidade das Águas, variando número entre 0 a 100;

q_i : qualidade do i-ésimo parâmetro, número entre 0 e 100, obtido da respectiva curva média de variação de qualidade em função da concentração;

w_i : peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, conforme Tabela 2, em que;

n : número de variáveis que entram no cálculo do IQA.

Após o cálculo do IQA, os valores de qualidade das águas são classificados em cinco categorias, sendo estes variando conforme definido por cada estado brasileiro.

Tabela 3: Classificação do IQA no Brasil

Faixa de IQA utilizada nos estados; AL, MG, MT, PR, RJ, RN, RS	Faixa de IQA utilizada nos estados; BA, CE, ES, GO, MS, PB, PE, SP	Categoria
91-100	80-100	Ótima
71-90	52-79	Boa
51-70	37-51	Razoável
26-50	20-36	Ruim
0-25	0-19	Péssima

Fonte: adaptado de ANA (2021).

Por considerar o seu uso especialmente para o abastecimento público após tratamento, o IQA apresenta limitações por não incorporar em seu cálculo parâmetros como os metais pesados, compostos orgânicos com potencial mutagênico, pesticidas, potencial de formação de trihalometanos, microrganismos patogênicos, substâncias que

alteram as propriedades organolépticas da água, além da perda detalhada das informações individuais de cada variável e não substitui um estudo detalhado da qualidade das águas de determinada bacia hidrográfica (CETESB, 2017).

Outro indicador existente no país é o Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP). Esse é utilizado para a verificação da qualidade da água nos pontos de captação e reservatórios de abastecimento público. Este índice é calculado a partir do produto ponderado do IQA original e do Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas (ISTO).

O IAP é composto por três grupos principais: o primeiro são as variáveis que compõem o IQA (conforme Tabela 2), o segundo e o terceiro grupo são parâmetros que compõem o ISTO que considera substâncias tóxicas e as que alteram as propriedades organolépticas da água, respectivamente.

Desta maneira o IAP é composto por:

IQA – grupo de variáveis básicas: (Temperatura da Água, pH, Oxigênio Dissolvido, Demanda Bioquímica de Oxigênio, Coliformes Termotolerantes/E. coli, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Sólidos Totais e Turbidez);

ISTO – a) Variáveis indicadoras de substâncias tóxicas: Cádmio, Chumbo, Cromo Total, Mercúrio, Níquel, Número de Células de Cianobactérias, Potencial de Formação de Trihalometanos – PFTHM;

b) Variáveis que alteram a qualidade organoléptica da água: Ferro, Manganês, Alumínio, Cobre e Zinco.

Ainda existe o Índice de Estado Trófico (IET), utilizado para avaliar o nível de eutrofização da água causado pelo crescimento excessivo de algas e cianobactérias, em ambientes onde há grande disponibilidade de elementos como o fósforo e o nitrogênio. O IET considera em seu cálculo as concentrações de fósforo total (P), clorofila α total (CL) e a transparência da coluna d'água. Para o uso do IET deve-se levar em consideração fatores como a temperatura, luminosidade, o tipo de ambiente que se

deseja avaliar (lêntico ou lótico), pois o metabolismo de microrganismos aquáticos em ambientes de clima tropical se diferencia daqueles em regiões de clima temperado, e deve ser levado em consideração o modelo de IET mais adequado para a região de estudo, conforme os principais estudos e adaptações (SILVA, QUEIROZ, *et al.*, 2018).

Segundo a CETESB (2017), para o cálculo do IET em reservatórios e rios no estado de São Paulo, os valores de transparência da coluna d'água não são considerados, visto que estes valores são frequentemente alterados pela turbidez devido a materiais em suspensão, sendo esta medida pouco eficiente para identificar a densidade de organismos planctônicos na água. Para a CETESB (2017), o índice médio calculado com a concentração fósforo e clorofila α total são satisfatórios, pois o IET(P) pode ser compreendido como uma medida do agente causador da eutrofização e o IET(CL) a causa em reação ao agente causador.

Zagatto, *et. al* (1999) propôs o aperfeiçoamento de um índice de qualidade de águas, e modificou o Índice de Parâmetros Mínimos para a Proteção de Comunidade Aquática (IPMCA), este que incorpora ponderações do grupo de substâncias tóxicas (cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, zinco, fenóis e surfactantes) e o grupo de parâmetros essenciais (oxigênio dissolvido, pH, e teste de toxicidade). Como o IPMCA não considera os parâmetros que dão informações sobre os processos de eutrofização da água, foi criado o Índice de Qualidade da Água para a Proteção da Vida Aquática (IVA), que além de considerar a presença e concentração de contaminantes com efeitos toxicológicos sobre a biota aquática do IPMCA, incorpora também o Índice de Estado Trófico (IET) em seu cálculo. Segundo CETESB (2017) o IVA é considerado um indicador mais adequado para a qualidade da água para fins de proteção da fauna e flora aquática, e foi observado também que este índice pode ser aprimorando, suprimindo ou adicionando variáveis que sejam relevantes.

Outros índices que também auxiliam no diagnóstico da qualidade da água para fins de preservação da vida aquática, são os Índices de Comunidades Fitoplanctônica, Zooplanctônica e Bentônica. Considerando também os usos múltiplos da água, tem-se ainda o Índice de Balneabilidade (IB) que visa avaliar a qualidade da água para fins de recreação de contato primário, aplicado em praias, rios e reservatórios (CETESB, 2017). Outro índice utilizado para medir a presença e concentração de elementos químicos tóxicos é o Índice de Contaminação por Tóxicos (ICT) este adotado pelo IGAM para mensurar a qualidade das águas mineiras. É estruturado de forma a observar os

parâmetros tóxicos como: arsênio total, bário total, cádmio total, cianeto livre, cianeto total, cobre dissolvido, cromo total, fenóis total, mercúrio total, nitrito, nitrato, nitrogênio amoniacal total e zinco total (IGAM, 2018).

Vale considerar, que índices de qualidade da água podem não refletir diretamente a complexidade de todo o sistema aquático e a escolha do modelo matemático ou índice deve ser direcionada a atingir os objetivos propostos de maneira individualizada. Os índices de qualidade de água são hoje ferramentas eficazes para comparar e comunicar a qualidade das águas e são de fácil aplicação. O levantamento de dados sobre a qualidade das águas de determinada bacia hidrográfica auxiliam na prevenção e gestão de impactos causados por atividades antrópicas e outros fatores (BATISTA e CABRAL, 2017).

3.3 ÍNDICE DE CONFORMIDADE AO ENQUADRAMENTO - ICE

Como parte essencial de todo programa de monitoramento ambiental é necessário a amostragem de parâmetros que precisam ser analisados e reportados aos órgãos fiscalizadores, como também os disponibilizar para o público em geral. Este fato depara-se com um problema que devido à complexidade destes dados e o grande número de variáveis envolvidas, como é o caso do monitoramento de águas, onde os valores dos parâmetros obtidos nas análises são comparados com o valor de referência, e na maioria das vezes, avaliar essas matrizes é um desafio para os gestores, que por vezes comprometem a compreensão dos resultados (CCME, 2001a).

Partindo dessa premissa e levando em consideração que os métodos mais tradicionais de monitoramento de águas que em 1997, junto a um subcomitê especializado o *Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME)* examinou e adaptou um outro índice inicialmente desenvolvido pelo *British Columbia Ministry of Environment*, criando o *CCME Water Quality Index (CCME WQI)*. O índice poderia ser usado para refletir uma condição de estado geral da água a partir dos parâmetros de qualidade definidos, sintetizados em um resultado mais compreensível, medindo a distância entra a meta de qualidade proposta pelo enquadramento, ou os valores limites

estabelecidos para cada substancia, como também refletir o estado do atual corpo hídrico nos instantes observados (CCME, 2001a).

O Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) originalmente traduzido e utilizado como o *CCME WQI* referido também as vezes como “Índice de Qualidade de Água Canadense”, combina matematicamente todas as variáveis escolhidas de qualidade mensuradas e pode ser utilizado para rastrear mudanças na qualidade da atual água ou na qualidade relativa à seu estado de conformidade desejável ao longo do tempo. É uma importante ferramenta para fornecer *insights* sobre o grau de impacto por atividades humanas, descrever o estado da coluna d’água, sedimentos como também um status quanto a adequabilidade à vida aquática, consumo humano ou animal. Os parâmetros de qualidade da água de entrada para o cálculo do ICE não são específicos e podem variar dependendo das condições locais ou o propósito de uso, pois o índice se baseia na abrangência, frequência e amplitude das variáveis que não atendem os padrões de qualidades propostos por lei (CCME, 2017).

O CCME WQI tem sido usado extensivamente no Canadá e em outros lugares no mundo. O *United Nations Environment Programme* (UNEP), tem usado o índice sobre três formas: o Índice Global de Qualidade de Água Potável, Índice de Qualidade de Água Saudável, e Índice de Qualidade de Água Aceitável. Países como Argentina, Japão, Rússia, Bélgica, Suíça, Polônia, Índia, Paquistão, África do Sul, Marrocos, usam usado o índice para reportar o estado de qualidade da água, como também é utilizado em trabalhos e pesquisas por diversos autores (CCME, 2017).

No Brasil a ANA (2012) e ANA (2017), utilizou o índice como um dos indicadores de qualidade de águas superficiais em diversas regiões hidrográficas do país, para acompanhamento do estado de qualidade das águas em relação às metas de enquadramento. Cabral e Mello (2015) usaram o ICE para demonstrar a influência dos despejos domésticos e industriais na qualidade da água em um trecho do Rio das Velhas entre os anos de 2006 à 2013 obtendo resultados condizentes com estudos realizados durante a elaboração do Plano Diretor da Bacia do Rio das Velhas. Oliveira et al. (2018), também usaram o ICE para verificar a qualidade da água nos reservatórios Jucazinho, Bituri, Botafogo e Pirapama no estado de Pernambuco, observando o decaimento da condição hídrica em função do uso e ocupação do solo como também a influência de períodos chuvosos em relação ao aumento de volume nos reservatórios e melhoria do ICE.

3.3.1 Descrição Conceitual e Cálculo do ICE

Conforme o CCME (2017), o índice é baseado na combinação de três fatores:

Fator 1 - F_1 (Abrangência): Representa o número de parâmetros que não atendem os objetivos de qualidade da água ao menos uma vez no período observado, ou seja, a abrangência das desconformidades com o enquadramento dentro da amostra. A fórmula para o cálculo do fator 1 é representada pela equação 1:

$$F_1 = \left(\frac{\text{Número de variáveis que falharam}}{\text{Número total de variáveis}} \right) * 100 \quad (1)$$

Fator 2 - F_2 (Frequência): Representa a frequência com que os parâmetros de qualidade da água não são atendidos, ou seja, a porcentagem das variáveis individuais que falham ao atender os objetivos em relação ao número total de testes realizados, conforme observado pela equação 2.

$$F_2 = \left(\frac{\text{Número de variáveis que falharam}}{\text{Número total de Testes}} \right) * 100 \quad (2)$$

Fator 3 – F_3 (Amplitude): Representa a amplitude das desconformidades, ou seja, a diferença entre o valor observado para determinada variável que falha em atender os objetivos de qualidade e o valor limite definido pela classe do enquadramento, sendo calculado em três etapas.

A primeira etapa leva em consideração o número de vezes que a concentração da variável observada é maior que o limite estabelecido (ou menor, em caso de limites mínimos):

$$\Delta V_i = \left(\frac{\text{Valor da variável que falhou}}{\text{Valor Objetivo}} \right) - 1 \quad (3.1)$$

Para testes que o valor da variável observada é inferior ao mínimo estabelecido (como por exemplo o oxigênio dissolvido), usa-se:

$$\Delta V_i = \left(\frac{\text{Valor objetivo}}{\text{Valor da variável que falhou}} \right) - 1 \quad (3.2)$$

Segundo, é feita a soma normalizada das variações (snv), que é obtida através da soma das variações individuais de todos os testes (obtido no item anterior), dividida pelo número total de testes, equação 3.3:

$$snv = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta V_i}{n^{\circ} \text{ total de testes}} \quad (3.3)$$

A amplitude (F_3) é então calculada por uma função assintótica que dimensiona a soma normalizada das variações (snv) para produzir um intervalo e variação de F_3 entre 0 e 100, conforme a equação 4:

$$F_3 = \frac{snv}{0,01 * snv + 0,01} \quad (4)$$

Calculados os fatores F1 (abrangência), F2 (frequência) e F3 (amplitude) o Índice de Conformidade ao Enquadramento pode ser obtido somando os três fatores como se os mesmos fossem vetores, onde a soma dos quadrados dos vetores é igual ao quadrado índice. Esta aproximação trata o índice como um espaço tridimensional onde, o resultado representa um vetor no espaço e cada fator representa um eixo deste espaço tridimensional, alterando em direção e proporção às variações em cada fator, conforme a equação 5:

$$ICE = 100 - \left(\frac{\sqrt{(F_1^2 + F_2^2 + F_3^2)}}{1,732} \right) \quad (5)$$

O divisor 1,732 normaliza os resultados para um intervalo entre 0 e 100, onde 0 representa a pior qualidade da água (ou a maior desconformidade com o enquadramento proposto) e 100 representa a melhor qualidade da água (ou a melhor conformidade ao enquadramento). Estes valores são divididos em cinco categorias conforme a Tabela 4.

Tabela 4 Classificação e descrição do ICE

Classificação	ICE	Descrição
Excelente	(100 - 95)	Condições muito próximas às naturais ou puras, a qualidade da água esta protegida com ausencia virtual de ameaças ou impactos.
Boa	(94 - 80)	Condições de qualidade da água raramente se desviam dos níveis naturais ou desejáveis, a qualidade da água está protegida com apenas um pequeno grau de impacto.
Razoável	(79- 65)	Condições as vezes fogem do nível natural ou desejado, a qualidade da água geralmente está protegida mas, ocasionalmente ameaçada ou impactada.
Ruim	(64 - 45)	Condições muitas vezes fogem do nível natural ou desejado, a qualidade da água é frequentemente ameaçada ou impactada.
Pessíma	(44 - 0)	Condições geralmente distantes dos níves naturais ou desejados, a qualidade da água ésta quase sempre ameaçada ou impactada.

Fonte: Adaptado de CCME (2017)

O cálculo do ICE é bastante flexível e pode ser aplicado em uma variedade de situações até mesmo na comparação entre lugares diferentes desde que os objetivos de comparação sejam os mesmos, também as variáveis de entrada no índice sejam as iguais em tipo e em número, como também o período de aplicação dos testes e os tipos dos corpos de águas devem ser correspondentes. Ainda segundo o CCME (2017), a seleção de parâmetros apropriados para uma região em particular é necessária para produzir resultados significativos, pois a escolha somente de variáveis que não irão atender os padrões de qualidade, pode produzir resultados bastantes diferentes daqueles em amostras onde somente algumas variáveis estão em desconformidade.

De acordo com o manual do usuário CCME (2001a), o ICE deve ser aplicado com pelo menos quatro parâmetros e quatro amostras por ano, entretanto em uma recente atualização baseada na sensibilidade e no comportamento do índice, o CCME (2017) recomenda o uso de no mínimo oito e no máximo vinte parâmetros. Para o cálculo do ICE em rios e corredeiras de alta velocidade é recomendado aproximadamente dez amostras por ano ou mais, enquanto rios mais estáveis e lagos requerem menos do que dez amostras para capturar variações.

3.4 SUB-BACIA DO RIO PIRANGA E ESTUDOS PÓS-ROMPIMENTO DA BARARGEM

3.4.1 Sub-bacia do rio Piranga

Considerando o conceito de bacia hidrográfica que, constituiu-se no conjunto de terras delimitadas topograficamente pelos divisores de águas (pontos de cota máxima entre bacias que dividem o deflúvio superficial direto), afluentes e subafluentes drenados por um rio principal, este que desagua em outro curso d'água, baía, lago ou oceano. Pode-se sempre definir dentro de uma bacia maior, sub-bacias menores, que são limitadas pela seção de confluência com outro curso d'água (BARBOSA, 2015).

A Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) atravessa o território dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo, sendo uma bacia de domínio federal. Possui uma área total de drenagem de 86.700 km² e 86% desta área pertencente a região leste do estado de Minas Gerais, onde se encontram as cabeceiras do rio Piranga e o rio do Carmo formadores do rio Doce. Com uma população aproximada de 3,5 milhões de habitantes a bacia do rio Doce abrange total ou parcialmente 200 municípios mineiros e os outros 14% de sua área é distribuída entre 28 municípios no nordeste do Espírito Santo (DOCE, 2021).

Em Minas Gerais, a BHRD é subdividida em seis Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRHs), as quais correspondem respectivamente à zona de planejamento e gestão de cada sub-bacia e Comitês de Bacia Hidrográfica (CBHs), Rio Piranga, Rio Piracicaba, Rio Santo Antônio, Rio Suaçuí, Rio Caratinga e Rio Manhuaçu (DOCE, 2021). Sendo uma das principais bacias hidrográficas do estado de Minas, devido a sua disponibilidade hídrica e importância econômica, seus recursos hídricos são utilizados para o abastecimento público, geração de energia, setores industriais, produção de alimentos, criação de animais, destacando-se substancialmente as atividades minerárias (SANTOS, 2018).

A sub-bacia do Rio Piranga e a UPGRH DO1 (Rio Piranga) foram criadas em 2002 pelo decreto de nº 43.101, sendo parte integrante do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos. No âmbito da gestão, a região da sub-bacia tem por finalidade oferecer viabilização técnica, econômica e financeira, para promover a

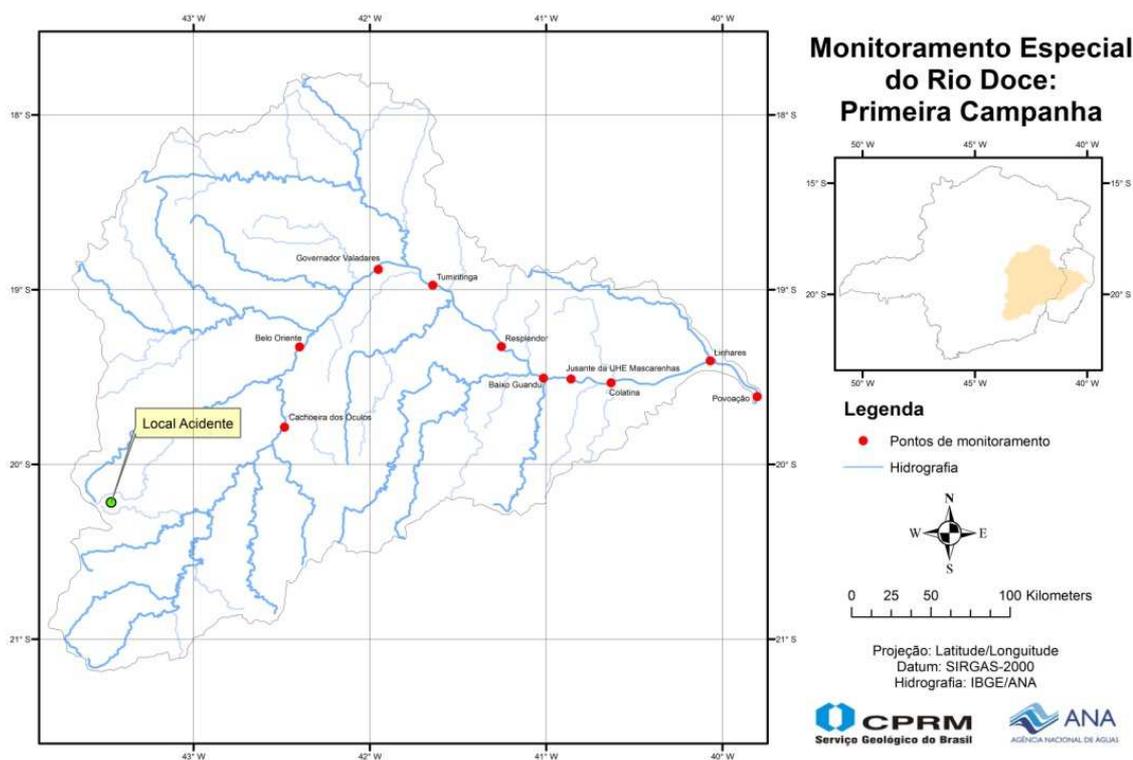
consolidação de políticas, investimentos, estruturação e desenvolvimento urbano, com base nos princípios do desenvolvimento sustentável.

A sub-bacia do rio Piranga tem uma área total de 17.571 km², estando em sua maior parte em regiões da Zona da Mata e Campos das Vertentes, é composta pelo rio Piranga, do Carmo, Casca, Matipó e outros córregos menores. O rio Piranga nasce no município de Ressaquinha e percorre 470 quilômetros até encontrar com o rio do Carmo, formando o rio Doce. Na economia há predominantemente os setores de serviços, indústria e agropecuária, com a pecuária ocupando cerca de 53% da área da bacia, com destaque para a criação de suínos, atividades estas que demandam ações de controle e tratamento de dejetos. A agricultura representa 41% do uso e ocupação do solo na bacia. A bacia do Rio Piranga apresenta grande susceptibilidade à erosão, situação esta, que alinhada ao desmatamento e mau uso da terra, tem contribuído para a elevada produção de sedimentos (CBH-PIRANGA, 2021).

3.4.2 Estudos pós-rompimento da Barragem de Fundão

Após o rompimento da barragem, a Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM – Serviço Geológico do Brasil) em conjunto com a ANA, realizaram uma campanha de monitoramento especial na BHRD para o levantamento de dados em campo e informações sobre o evento. O comitê especial fez o acompanhamento da passagem da onda de cheia desde a estação de monitoramento Cachoeira dos Óculos, localizada no Parque Estadual do Rio Doce, a jusante da Unidade Hidroelétrica (UHE) Risoleta Neves - Candonga, até a foz no rio Doce, coletando ao longo das estações pré-existentes amostras de água, sedimentos em suspensão, sedimentos de fundo, medição de vazões, levantamento de perfil transversal e emitindo boletins diários de previsão de turbidez da água para o acompanhamento pelas autoridades competentes em vários municípios (CPRM e ANA, 2015a). Os pontos monitorados durante a primeira campanha pela CPRM e ANA são mostrados na Figura 2.

Figura 2: Pontos de monitorados pela CPRM e ANA durante a primeira campanha de campo em 2015.



Fonte: CPRM e ANA (2015a)

As campanhas de campo para o acompanhamento emergencial especial foram realizadas a partir do dia 7 de Novembro até o dia 22 de Dezembro do mesmo ano, e os primeiros parâmetros a serem verificados foram: a condutividade elétrica, oxigênio dissolvido, pH, temperatura e turbidez. Segundo CPRM e ANA (2015a), durante a passagem da onda de cheia e massa os valores para o parâmetro turbidez atingiram valores de centenas de milhares de UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez) na estação Cachoeira dos Óculos, valores próximos a 120.000 NTU em seu trecho médio no município de Governador Valadares - MG (1.200 vezes acima do limite definido pela CONAMA 357/2005 de 100 NTU para corpos d'água Classe 2), e valores próximos ou inferiores a 12.000 NTU em regiões mais próximas a foz já no estado do Espírito Santo,

valores estes incompatíveis com o tratamento de água para abastecimento, o que acarretou a suspensão das captações no rio Doce durante este período.

A turbidez pode ser entendida como o grau de interferência a passagem da luz através do líquido, onde o nível de interferência está diretamente relacionado a quantidade de materiais sólidos em suspensão no meio aquoso, sendo expresso por unidades de turbidez (NTU). Para fins de potabilidade e tratamento de água, níveis muito altos de turbidez afetam de maneira significativa a eficiência dos processos, como também a maior quantidade de material particulado de vários formatos e tamanhos diferentes podem atuar como escudo ou abrigo para microrganismos patogênicos que podem adsorver-se facilmente a estas partículas sólidas, impedindo a ação do agente desinfetante. Outro fator importante relacionado à passagem de luz nos corpos de água é a realização de fotossíntese pelas algas e vegetação subaquática, necessária para o equilíbrio destes ecossistemas (BRASIL, 2006); (COSTA, 2016).

Ainda segundo CPRM e ANA (2015a), em termos da concentração de sólidos em suspensão, os valores na estação Cachoeira dos Óculos atingiram a ordem de 400 mil vezes acima do valor limite estabelecido pela CONAMA de 100 mg.L^{-1} , em Governador Valadares 50 mg.L^{-1} , em Resplendor valores próximos a 8.000 mg.L^{-1} , e valores da ordem de 1.500 mg.L^{-1} próximo a Linhares. Quanto aos sedimentos, houve sedimentação da fração mais grossa ao longo do curso e principalmente nos reservatórios das UHE's ao longo do rio Doce (UHE Risoleta Neves – Candonga, Baguari, Aimorés e Mascarenhas), como também uma diminuição do diâmetro médio dos sedimentos em suspensão no sentido de montante para jusante.

Outro parâmetro bastante afetado foi a condutividade elétrica que atingiu valores da ordem de aproximadamente 10 vezes superior aos valores médios dos anos anteriores em alguns pontos do monitoramento. Embora a condutividade elétrica não possua valores limites definido em lei e, portanto, não há um valor referencial para este parâmetro ser utilizado no cálculo do ICE, este parâmetro indica a capacidade da água de transmitir corrente em função da presença de cátions e íons dissolvidos, tendo relação direta também com a quantidade de metais e outros cátions não-metálicos que serão discutidos mais à frente. Ainda sobre os parâmetros analisados no Relatório de Monitoramento Especial da CPRM e ANA durante o período de campanha, os parâmetros pH e temperatura sofreram pouca variação e estiveram dentro dos limites estabelecidos, sendo o oxigênio dissolvido a variável que alcançou os valores mais

críticos, estes chegando a quase zero nas regiões a montante da bacia, devido à alta concentração de sedimentos em suspensão e turbidez elevada, e valores de OD próximos à 3 ou 5 mg.L⁻¹ nos trechos mais baixos da bacia.

Os valores do pH da água, podem interferir no nível de solubilidade das substâncias, na distribuição de formas livres de íons em meio aquoso além de deslocar o equilíbrio químico de diversas reações naturais (BRASIL, 2006). Reis (2019), afirma que apesar dos metais serem mais estáveis como soluto do que como íons dissolvidos em solução, alterações nos valores de pH e outros fatores podem causar a remobilização destes metais presentes nos sedimentos de fundo ou em suspensão, para a coluna d'água.

Para as condições de vida aquática de forma equilibrada e consumo humano, os valores de pH devem situar-se na faixa de 6 a 9 (BRASIL, 2005), com algumas exceções para ecossistemas que se desenvolveram em condições provocadas por influências naturais, como nos casos onde ocorre a acidificação da água por decomposição de matéria orgânica e produz ácidos húmicos, onde os valores de pH variam entre 4 a 6. Características geológicas e geoquímicas da bacia hidrográfica também podem interferir nas faixas de pH, como em regiões de rochas alcalinas onde os valores podem ser até superiores a 10 (BRASIL, 2006). O pH é um importante fator frequentemente utilizado na caracterização de águas sendo importante o seu controle para uma boa eficiência dos processos unitários de tratamento de água para consumo humano (SABESP, 2021).

O oxigênio dissolvido na água é um dos parâmetros mais importantes para expressar a qualidade de um ambiente aquático. Este pode sofrer influência de fatores como a temperatura, pressão, processos químicos e biológicos que ocorrem nos corpos d'água. Para a maioria das espécies piscícolas, a concentração de oxigênio dissolvido mínimo disponível no ambiente necessária para a sobrevivência é de 4 a 5 mg/L, e para a manutenção da vida aquática aeróbia são necessários teores mínimos de 2 a 5 mg/L, dependendo do nível de exigência de cada organismo (BRASIL, 2006). As taxas de concentrações de OD e matéria orgânica também são parâmetros essenciais em monitoramento de ambientes fluviais, servindo como indicadores de contaminação das águas por efluentes sanitários (REIS, 2019).

Na segunda campanha de campo realizada pela CPRM e ANA (2015b) que ocorreu entre 12 a 23 de Novembro, durante a segunda e terceira semana após o desastre, foram coletadas amostras de águas para a análise de metais dissolvidos e sedimentos em todas as estações existente da seção impactada da bacia e também em pontos não atingidos pelos rejeitos da barragem. Os valores mensurados durante este período foram comparados com valores de *background* da região, obtidos em levantamentos geoquímicos feitos pela CPRM em 2010, na região do Quadrilátero Ferrífero e na BHRD.

Para os valores dos cátions metálicos e ânions dissolvidos na água, estes não excederam os limites aceitáveis, tendo pouca diferença em relação aos valores obtidos em 2010, com exceção para ferro e manganês. Para os metais considerados tóxicos, como o arsênio, chumbo, cobre, mercúrio e zinco, os valores permaneceram abaixo do limite de detecção. Em relação a composição dos sedimentos foram encontradas diferenças como, a diminuição da composição de metais ao longo do trecho, com teores abaixo dos valores de *background*, houve aumento na concentração de ferro, este que chegou a teores de 15% nas amostras de sedimentos coletadas próximas a Bento Rodrigues, e a diminuição da concentração de matéria orgânica, indicado que houve arraste e remoção da matriz sedimentar de fundo e zonas marginais, e deposição de sedimentos de granulometria mais fina provenientes da barragem (CPRM e ANA, 2015b).

Embora as análises elaboradas pela CPRM e ANA no ano de 2015 não ter relatado a presença de outros metais nas águas com concentração acima do limite estabelecido pela legislação, durante o monitoramento emergencial realizado pelo IGAM, também iniciado logo após rompimento e permanece até os dias atuais em menor frequência, além do impacto evidente em termos das variáveis que se relacionam com a presença de sólidos na água, foi verificado altas concentrações de alumínio nas estações de monitoramento no rio Gualaxo do Norte e rio do Carmo e Rio Doce (IGAM, 2017). Em ANA (2016), também foi observada uma concentração elevada de alumínio durante a passagem da pluma de sedimentos.

Em um estudo no Rio Gualaxo do Norte Reis (2019) também observou concentrações anômalas de ferro e manganês nos pontos a jusante do local do desastre, evidenciando que o enriquecimento destes elementos nas águas e nos sedimentos provavelmente foram influenciados pelo rompimento da barragem de Fundão. As análises feitas por Reis (2019) também corroboram com os dados

apresentados pela CPRM e ANA, onde as concentrações dos elementos metálicos considerados tóxicos permaneceram abaixo do limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005.

Santos (2018) também ao estudar a bacia do Rio Gualaxo do Norte, durante um ciclo hidrológico nos anos de 2017 e 2018, utilizando-se análises de estatísticas multivariadas, concluiu que as principais variáveis responsáveis por variações espaciais, considerando regiões afetadas e não afetadas pelo rompimento, foram alcalinidade, condutividade elétrica, teor de cloretos e turbidez, destacando a importância do monitoramento destas variáveis em campanhas futuras nas regiões afetadas pelo rejeito da barragem.

Outro fato importante responsável pelo decaimento da qualidade das águas superficiais da bacia destacado por Santos (2018) é o descarte de esgoto sanitário sem tratamento, o que tem causado um aumento da concentração do elemento fósforo e compostos nitrogenados nas águas, sendo estes intensificados pelo uso de fertilizantes a base de fosfato e nitrogênio no processo de recuperação das matas ciliares. Esta condição também é corroborada por Reis (2019), que observa também um alto Índice de Toxicidade (ICT) para todas as estações estudadas, causado principalmente pela alta concentração de compostos fenólicos oriundos do esgoto sanitário, atribuídos também a óleos e graxas oriundos de caminhões e maquinários utilizados pelas mineradoras e empresas que trabalham nos processos de restauração da área.

Ainda sobre as características do rejeito da barragem que poderia afetar ou contribuir para o incremento de nitrogênio nas águas são as aminas, utilizadas no processo de concentração mineral (flotação) adotado pela SAMARCO, observado por Santos (2018), que são utilizadas como agentes coletores para a modificação das propriedades de superfície dos minerais em meio alcalino. Em meio aquoso e em ambientes naturais, o nitrogênio pode ser encontrado na forma de nitrogênio molecular (N_2), íon amônio (NH_4^+), íon nitrito (NO_2^-), íon nitrato (NO_3^-) e compostos orgânicos, sendo alterados por processos de oxidação ou redução bacteriana como parte do ciclo do nitrogênio. Em condições alcalinas ocorre o predomínio da amônia livre ou não ionizável (NH_3), que é altamente tóxica para organismos aquáticos (BRASIL, 2005).

Em ambos os estudos de Santos (2018) e Reis (2019), observa-se nos resultados das análises, uma alta concentração de organismos indicadores de contaminação fecal, com uma contração acima do limite estabelecido pela a legislação para coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*, atrelados ao lançamento de esgoto sem tratamento pelos municípios. Apesar destes parâmetros biológicos não terem relação com o rompimento da barragem, Reis (2019) observa uma relação entre a resistência e maior sobrevivência de *E.coli*, *Salmonella spp.* e o vírus HAdV com a alta concentração de metais presentes nestas águas.

Em um estudo mais recente, Fraga *et. al* (2021) ao analisar a qualidade da água em estações do IGAM na bacia do rio Piranga no ano de 2020, aponta que ainda persistem um alto índice de violação à legislação para as variáveis manganês, ferro dissolvido, fósforo como também *Escherichia coli*, e observa também que há uma forte tendência de elevação da concentração de nitrato em todas as estações estudadas, fato que corrobora com os dados dos estudos previamente apresentados nesta seção.

Ao considerar os estudos aqui apontados e a percepção do grande impacto nas águas da bacia em relação as variáveis que se relacionam com a presença de sólidos nas águas e uma possível alteração da dinâmica químico-ambiental no que se refere aos metais e a solubilidade destes em água, o presente estudo se propõe a aplicar o Índice de Conformidade ao Enquadramento de modo a interpretar a dinâmica da qualidade das águas da bacia em pontos não afetados e pontos diretamente impactados, em períodos pré-rompimento e pós-rompimento da Barragem de Fundão.

4 METODOLOGIA

4.1 Base cartográfica digital

Para a confecção das cartas temáticas da área estudada, foi utilizada a versão de longa duração do *software* QGIS 3.4.14 – Madeira. Os dados vetoriais georreferenciados (*shape files*) foram obtidos à partir de diversas fontes conforme a Tabela 5.

Tabela 5: Síntese da base cartográfica digital utilizada

Camada	Fonte	Escala	Datum
Divisão territorial do Brasil	(IBGE, 2020)	1:250.000	SIRGAS 2000
Bacias Hidrográficas do Brasil	(ANA, 2021)		
Sub-bacias - MG	(IDE-SISEMA, 2021)		
Municípios de Minas Gerais	(PRISTINO, 2010)		
Rios Principais em MG	(IEDE, 2021)		
Drenagem da Bacia do Rio Doce	(IGAM, 2010)	1:50.000	

Fonte: Elaboração própria

4.2 Área de Estudo

Os dados para o cálculo do ICE foram obtidos à partir do website www.portainfohidro.igam.mg.gov.br, que disponibiliza a série histórica de 50 parâmetros em 17 pontos espalhados pela UPGRH do Rio Piranga (DO1).

Dentre as estações escolhidas foi considerado o objetivo de se analisar entre 2011 à 2020, um ponto diretamente afetado pelo rompimento da barragem onde houvesse a série histórica disponível, um ponto onde não houve influência dos rejeitos, e um ponto de junção destes afluentes já no Rio Doce.

Na região de estudo, o IGAM adicionou em 2015, uma estação (RD011) na foz do Rio Gualaxo do Norte, como esta não possuiu dados anteriores a 2015, esta estação não foi considerada para o cálculo do ICE.

Sendo assim, foi escolhida a estação RD071 no Rio Piranga (ponto mais próximo à barragem que dispunha da série histórica), a estação RD013 (local sem influência dos rejeitos), e a primeira estação disponível após a junção destes corpos hídricos, no Rio Doce, estação RD072. Foi considerado ainda que outras estações disponíveis nos mesmos cursos d'água poderiam apresentar discrepância entre os parâmetros, devido a distância entre as estações, componentes como a topografia, vegetação, uso e ocupação do solo, como também a assinatura geológica local e composição dos sedimentos.

A Tabela 6 apresenta uma descrição e localização das estações de monitoramentos do IGAM utilizadas neste trabalho, representadas na Figura 3 e Figura 4.

Tabela 6: Descrição das estações de monitoramento utilizadas

Estação	Município	Descrição	Latitude (S)	Longitude (W)
RD013	Ponte Nova	Rio Piranga em Ponte Nova	20° 22' 59,8"	42° 54' 8,5"
RD071	Barra Longa	Rio do Carmo em Barra Longa	20° 16' 58,2"	43° 01' 56,4"
RD072	Rio Doce	Rio Doce próximo ao município de Rio Doce	20° 16' 30,0"	42° 54' 54,0"

Fonte: IGAM

Figura 3: UPGRH do Rio Piranga inserida dentro da bacia do Rio Doce e estações utilizadas

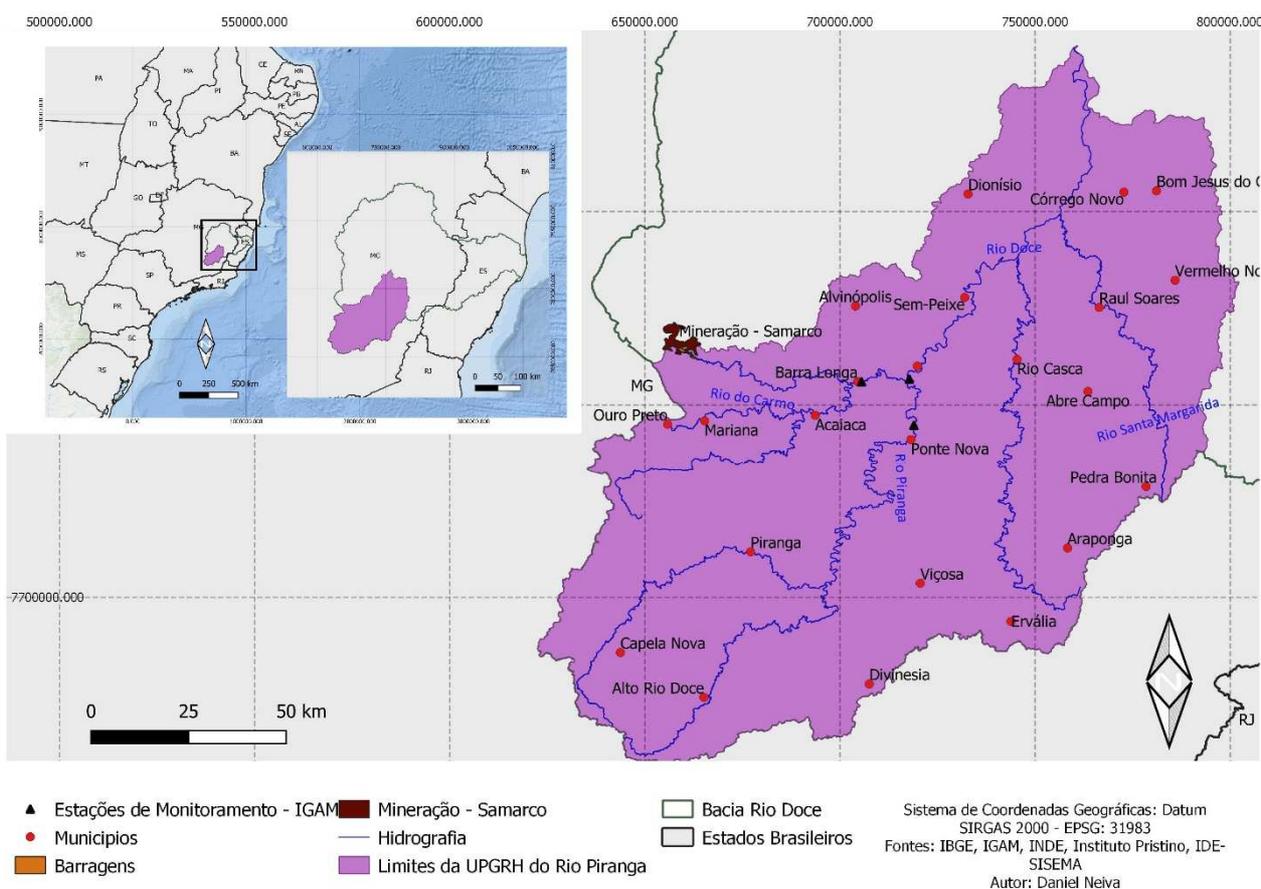
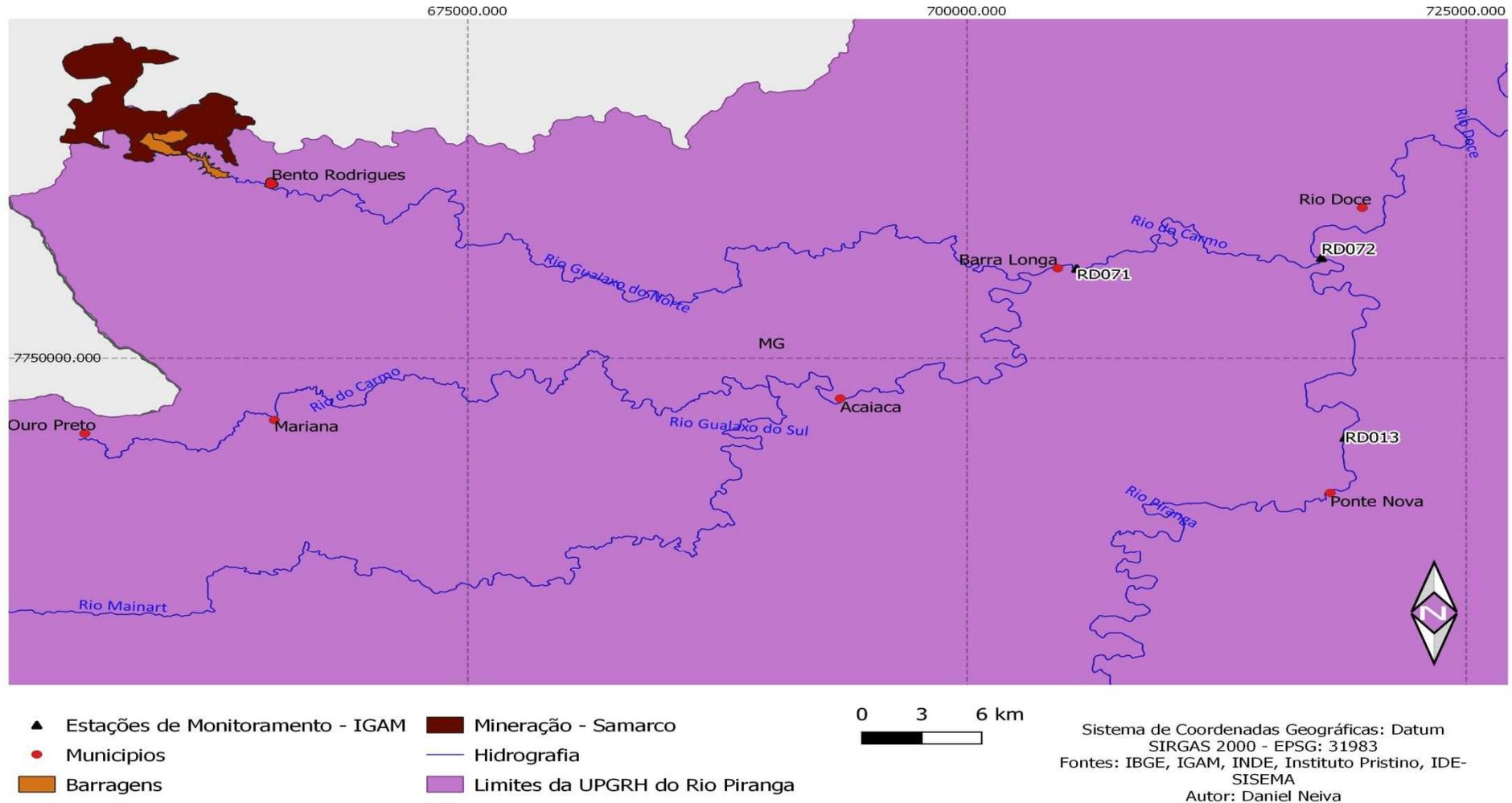


Figura 4: Estações de monitoramento utilizadas neste trabalho



4.3 Dados Utilizados

Para os corpos hídricos do estudo, não há proposta de enquadramento aprovada, e casos como este são especificados pelo art. 42 da Resolução Conama nº 357 e o artigo 37 da Deliberação Normativa Conjunta Copam/CERH nº 01/2008 que estabelecem: “Enquanto não aprovados os respectivos enquadramentos, as águas doces serão consideradas Classe 2 [...]”, sendo assim, as águas do Rio do Carmo, Rio Piranga e Rio Doce são consideradas Classe 2.

Na Tabela 7 são apresentados os parâmetros utilizados neste estudo e seus respectivos limites

Tabela 7: Parâmetros utilizados no cálculo do ICE e limites de qualidade para corpos d’água classe 2 segundo os usos preponderantes

Parâmetro	Alumínio Dissolvido Total	Cloreto Total	Ferro Dissolvido	Fósforo Total	Manganês Total	Nitrogênio Amoniacal Total	Oxigênio Dissolvido	PH	Sólidos Suspensos Totais	Turbidez	
Limite	0,1 mg/L	250 mg/L	0,3 mg/L	0,1 mg/L	0,1 mg/L	3,7mg/L 2,0 mg/L 1,0 mg/L 0,5 mg/L	pH<= 7,5 7,5< pH < 8,0 8,0< pH < 8,5 8,5= > pH	Em qualquer amostra, não inferior a 5 mg/L	6.0 - 9.0	100 mg/L	100 UNT

Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2005)

Para a escolha dos parâmetros de entrada no Índice de Conformidade ao Enquadramento, foram considerados os parâmetros que tiveram maior relevância ou sofreram maiores alterações conforme a revisão da literatura. Foi considerando ainda a necessidade de estes parâmetros possuírem limites específicos em legislação para serem utilizados no ICE e observando também as condições de aplicação deste índice em ambientes fluviais.

Para os cálculos do Índice de Conformidade ao Enquadramento, foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013. Optou-se pelo cálculo anual não fazendo a separação entre o período seco e chuvoso de forma a homogeneizar os dados e o resultado final, pois não há um padrão correspondente na amostragem e quantidade de coletas anuais

entre os diferentes parâmetros e estações escolhidas, e considerando também as recomendações do manual do usuário em (CCME, 2001a) e (CCME, 2017).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Rio do Carmo (RD071)

Para uma melhor compreensão dos resultados do Índice de Conformidade ao Enquadramento no rio do Carmo (estação RD071), mostrado na Figura 7, são apresentados no **Anexo A** os dados brutos dos parâmetros de qualidade utilizados, onde aqueles parâmetros que excederam o limite de qualidade para corpos de água classe 2, estão destacados em vermelho.

Conforme apresentado também na seção 3.3.1, cada fator exerce influência no resultado do ICE de maneira diferente e ainda considerando a Equação 5, observa-se que, quanto maior o número representativo de cada fator individual, maior será o impacto negativo no resultado do ICE. Na Tabela 8 são apresentados os resultados numéricos de cada fator individualmente para cada ano.

Para a visualização da dinâmica dos parâmetros que tiveram maior impacto e relevância no ICE na estação RD071, na Figura 5 são mostradas as concentrações dos metais Al, Fe e Mn na estação RD071 no rio do Carmo entre 2011 e 2020 e na Figura 6 as concentrações de sólidos em suspensão total e turbidez.

Tabela 8: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD071 – Rio do Carmo

Ano	F1	F2	F3	ICE
2011	40	20	38,21	66,04
2012	20	15	38,21	73,64
2013	50	20	49,28	57,85
2014	10	2,50	4,69	93,46
2015	10	2,50	0,12	94,05
2016	40	26,23	69,50	51,29
2017	50	12,99	37,41	63,18
2018	50	14,17	26,13	66,41
2019	20	8,18	3,83	87,33
2020	70	16,36	27,96	55,47

Figura 5: Concentrações de Al, Fe e Mn na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2011 a 2020

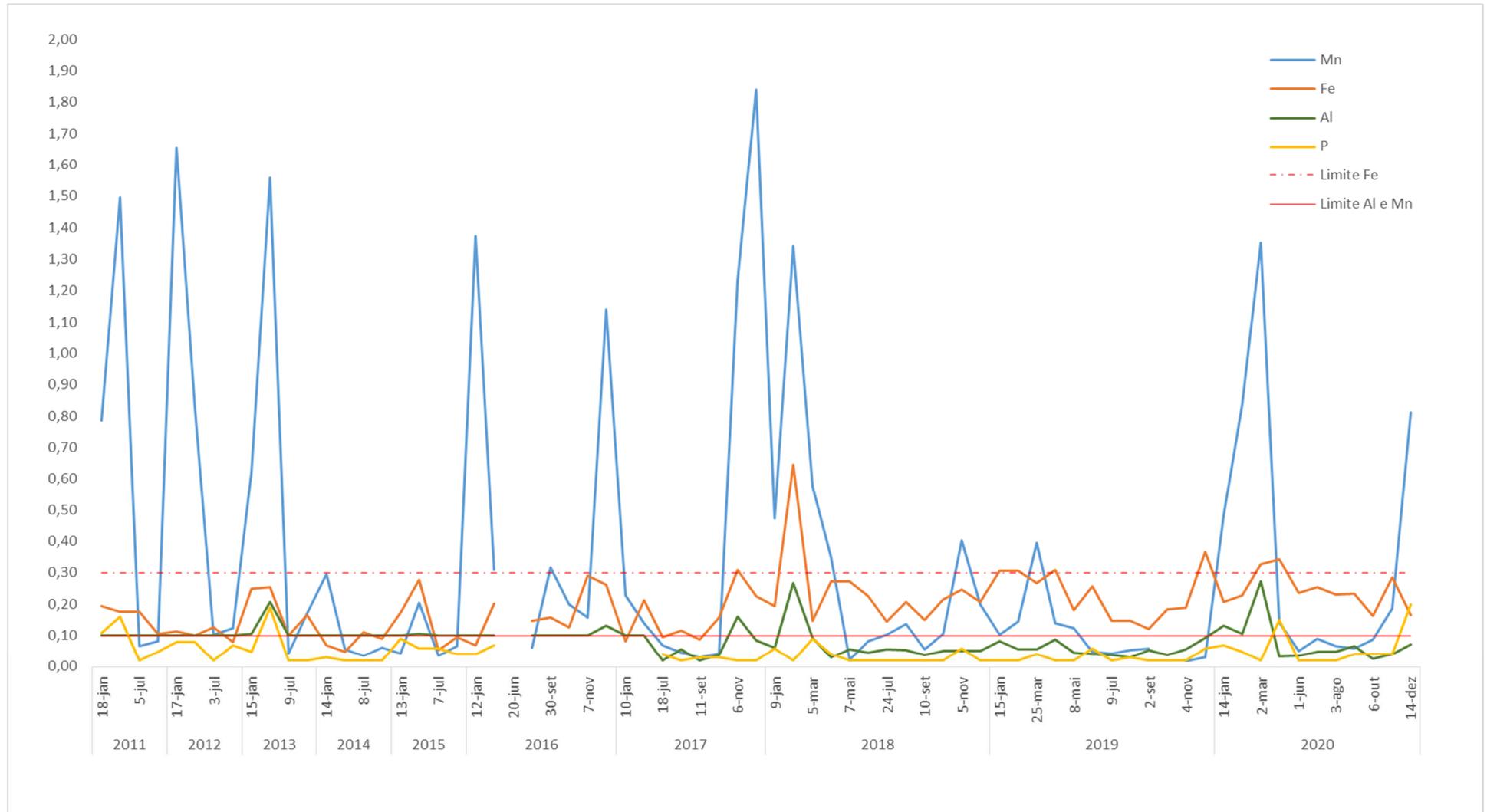
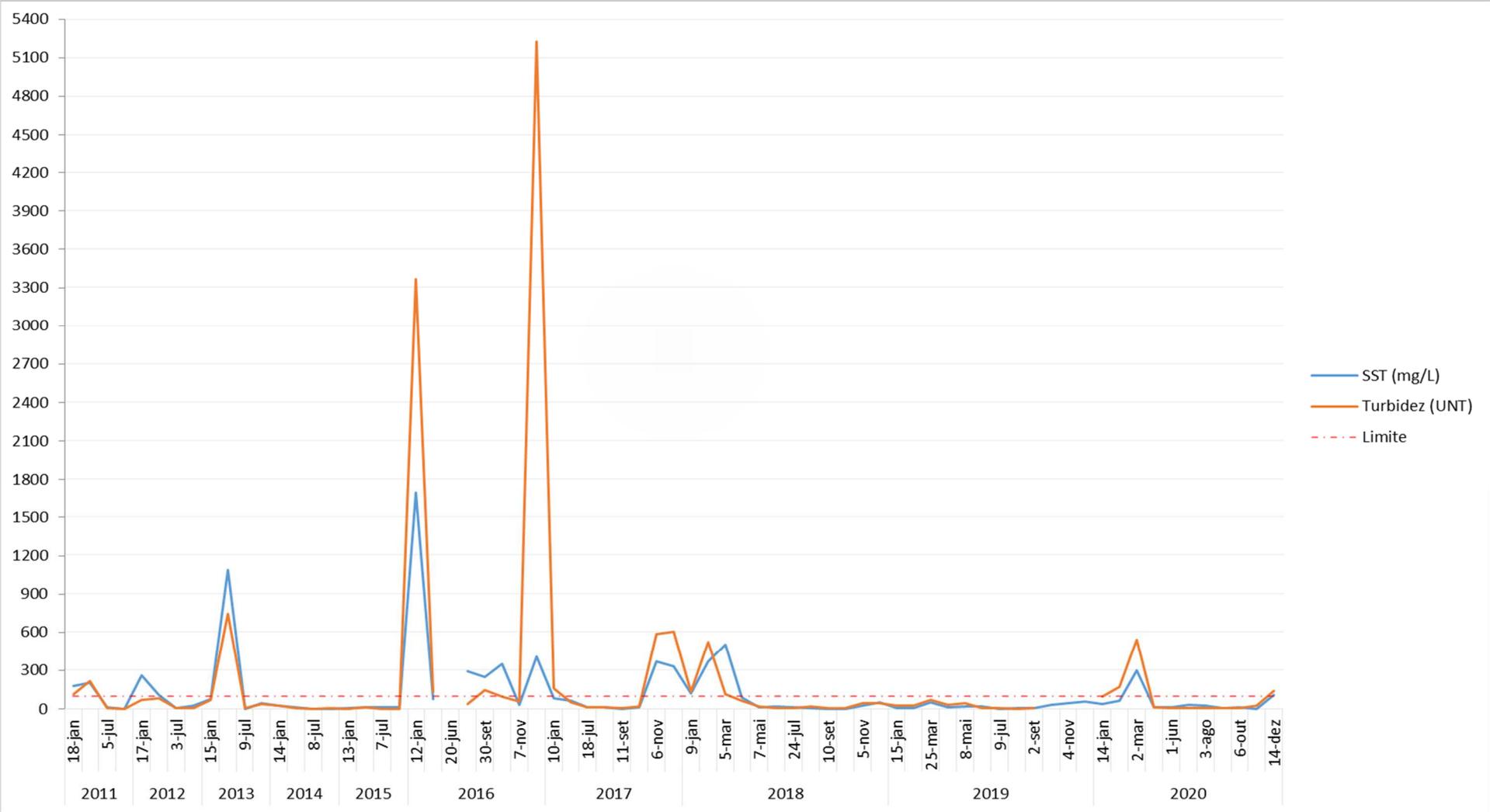


Figura 6: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2011 a 2020



Ao observar no **Anexo A** e a Figura 5, para os parâmetros que extrapolaram o limite da Resolução Conama nº 357, percebe-se que para o manganês, este parâmetro já apresentava desconformidades com a legislação em anos anteriores ao rompimento da barragem, mostrando-se acima do limite prevalentemente nos meses de janeiro e abril entre 2011 e 2013, e em todas as coletas realizadas no ano de 2012. Em relação aos valores medidos para o Mn, ressalta-se o fator amplitude (F_3) que chegou a superar o limite em 14 a 16 vezes acima do valor máximo permitido pela legislação, nesse período, impactando o ICE de forma moderada. Este que apresentou qualidade razoável em 2011 e 2012, e qualidade ruim em 2013, pois as variáveis turbidez e sólidos em suspensão apresentaram valores exacerbados, sendo que variáveis alumínio e fósforo também apresentaram desconformidades neste ano.

As altas concentrações de Mn nesta estação reforçam a hipótese proposta por Rodrigues *et. al* (2015), que ao analisarem a distribuição geoquímica de sedimentos ativos na bacia do rio Gualaxo do Norte, relacionam a elevada concentração deste elemento à antiga mina de exploração de minério de manganês ferruginoso, Miguel Congo, evidenciando que as atividades minerárias contribuíram para valores anômalos de Mn acima dos valores de *background* na região. Provavelmente, essa atividade de mineração expôs o substrato litológico a condições de intemperismo favorecendo a disponibilidade desse elemento nos sedimentos do rio Gualaxo do Norte e bacias subsequentes, o que pode explicar a mobilização deste elemento para a coluna d'água, principalmente em períodos com maior índice de pluviosidade.

Entre os anos de 2014 e 2015, o ICE apresentou os melhores resultados nesta estação, sendo classificado com qualidade “Boa” e conforme descrito na Tabela 4, “a qualidade das águas neste período raramente se desviou dos níveis naturais ou desejados, apresentando apenas um pequeno grau de impacto”. Vale ressaltar que a última amostragem feita nesta estação no ano de 2015 ocorreu no mês de Outubro, ou seja, o ICE deste ano não foi afetado pelos impactos oriundos dos rejeitos da barragem, sendo que única variável que apresentou desconformidades foi o alumínio, com uma baixa amplitude em relação ao limite.

No ano de 2016, percebe-se graficamente o impacto causado pelo rompimento da barragem na qualidade das águas, que afetou o ICE principalmente pela amplitude das desconformidades observadas para as variáveis turbidez e sólidos suspensos, que no mês de Janeiro apresentaram valores da ordem de 3365 UNT e 1692 mg.L⁻¹,

respectivamente. Ao longo do ano os valores de turbidez e sólidos em suspensão apresentaram certo grau de estabilidade com os limites da legislação, voltando a apresentar valores da ordem de 5228 UNT e 406 mg.L⁻¹ no mês de Dezembro.

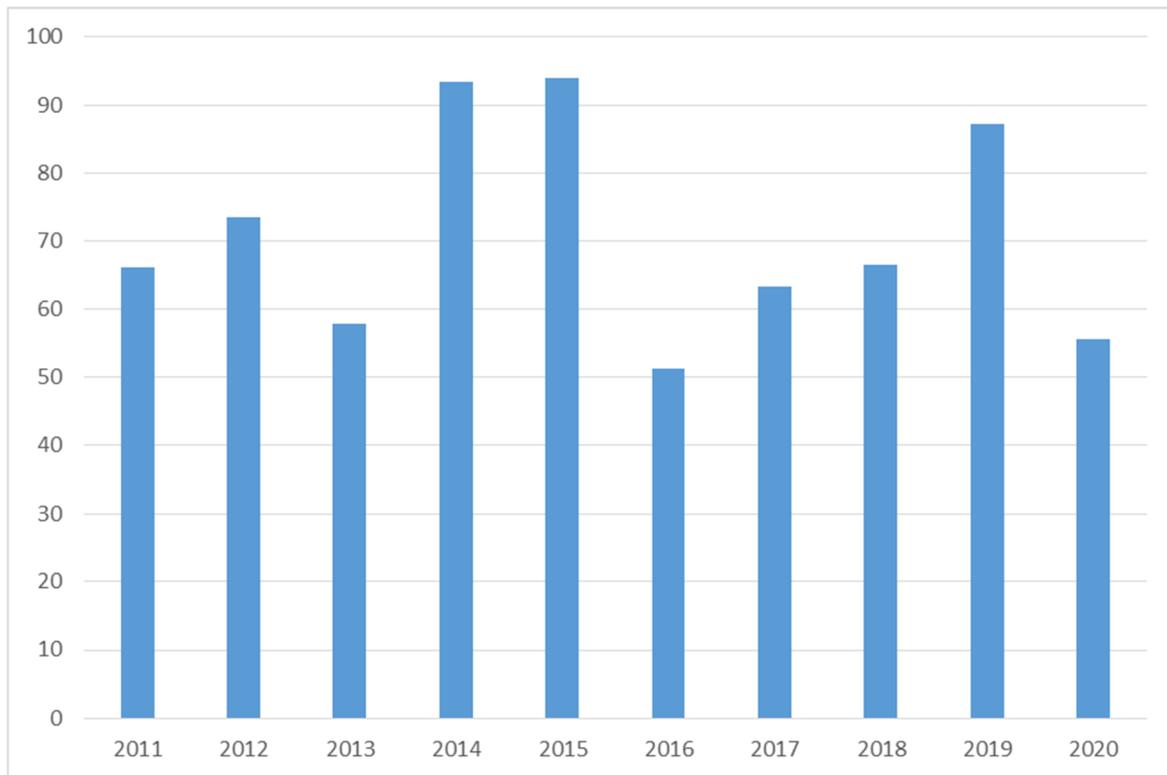
Tais resultados corroboram com os estudos apresentados por (ROSMAN, 2015), que estimou uma alta concentração de sedimentos para os períodos chuvosos enquanto persistirem as concentrações de finos depositados nos trechos do rio Gualaxo do Norte, rio do Carmo e os estoques de lamas acumulados no fundo dos reservatórios das usinas hidroelétricas. O manganês que até então apresentava valores dentro dos limites entre 2014 e 2015, voltou a exibir altas concentrações em quase todas as medições realizadas neste ano, o que provavelmente foi causado pelo arraste, revolvimento e ressuspensão artificial dos sedimentos de fundo que já apresentavam anomalias por enriquecimento deste elemento como foi apresentado por (RODRIGUES *et al.*, 2015).

A partir de 2017 nota-se uma melhora gradual nos parâmetros de qualidade estudados, principalmente para a turbidez e SST, que apresentaram extrapolações pontuais nos períodos de maior pluviosidade, entretanto neste ano o ICE apresentou classificação “Ruim”. Em 2018 a qualidade das águas apresentou qualidade “Razoável” com a diminuição da amplitude das extrapolações para o Mn. Para o ano de 2019 o ICE atingiu os melhores patamares de qualidade com qualidade “Boa”, sendo que neste ano apenas as variáveis Mn e Fe apresentaram extrapolações acima do limite nas coletas do primeiro semestre.

No ano de 2020, o ICE apresentou um resultado muito próximo aos níveis pós-rompimento sendo afetado principalmente pelo fator abrangência (F_1), onde sete dos dez parâmetros utilizados apresentaram desconformidades (o parâmetro pH apresentou valor abaixo do limite pela primeira vez em toda a série histórica do período estudado, no mês de dezembro). Outro fator que impactou o ICE deste ano, foram as variáveis SST e turbidez que também voltaram a apresentar valores elevados, coincidindo com os valores elevados da concentração de manganês, como também houve extrapolações para as variáveis ferro e alumínio.

Na Figura 7 é apresentado o resultado do índice de conformidade ao enquadramento na estação RD071 no rio do Carmo entre 2011 e 2020.

Figura 7: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD071 no Rio do Carmo entre 2011 a 2020



5.2 Rio Piranga (RD013)

Para a visualização da dinâmica dos parâmetros que tiveram maior impacto e relevância no ICE no rio Piranga (estação RD013), são mostrados na Figura 8 as concentrações dos metais Al, Fe, P e Mn entre 2011 e 2020, e na Figura 9 as concentrações de sólidos em suspensão total e turbidez. Na Tabela 9 também são apresentados os resultados numéricos de cada fator individual do ICE para cada ano.

O parâmetro fósforo foi incluído no gráfico da Figura 8, pois foi considerado relevante nesta estação, por apresentar valores acima do limite logo nos primeiros anos analisados.

Tabela 9: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD013 – Rio do Piranga

Ano	F1	F2	F3	ICE
2011	60	27,78	26,80	58,81
2012	30	8,33	7,53	81,51
2013	50	14,58	10,02	69,38
2014	10	1,09	0,22	94,19
2015	50	5,88	7,01	70,65
2016	50	9,52	16,07	69,18
2017	40	6,45	6,35	76,32
2018	60	13,33	9,09	64,13
2019	20	2,47	2,10	88,30
2020	60	23,64	22,64	60,54

Figura 8: Concentrações de Al, Fe, P e Mn na estação RD013 – Rio Piranga entre 2011 a 2020

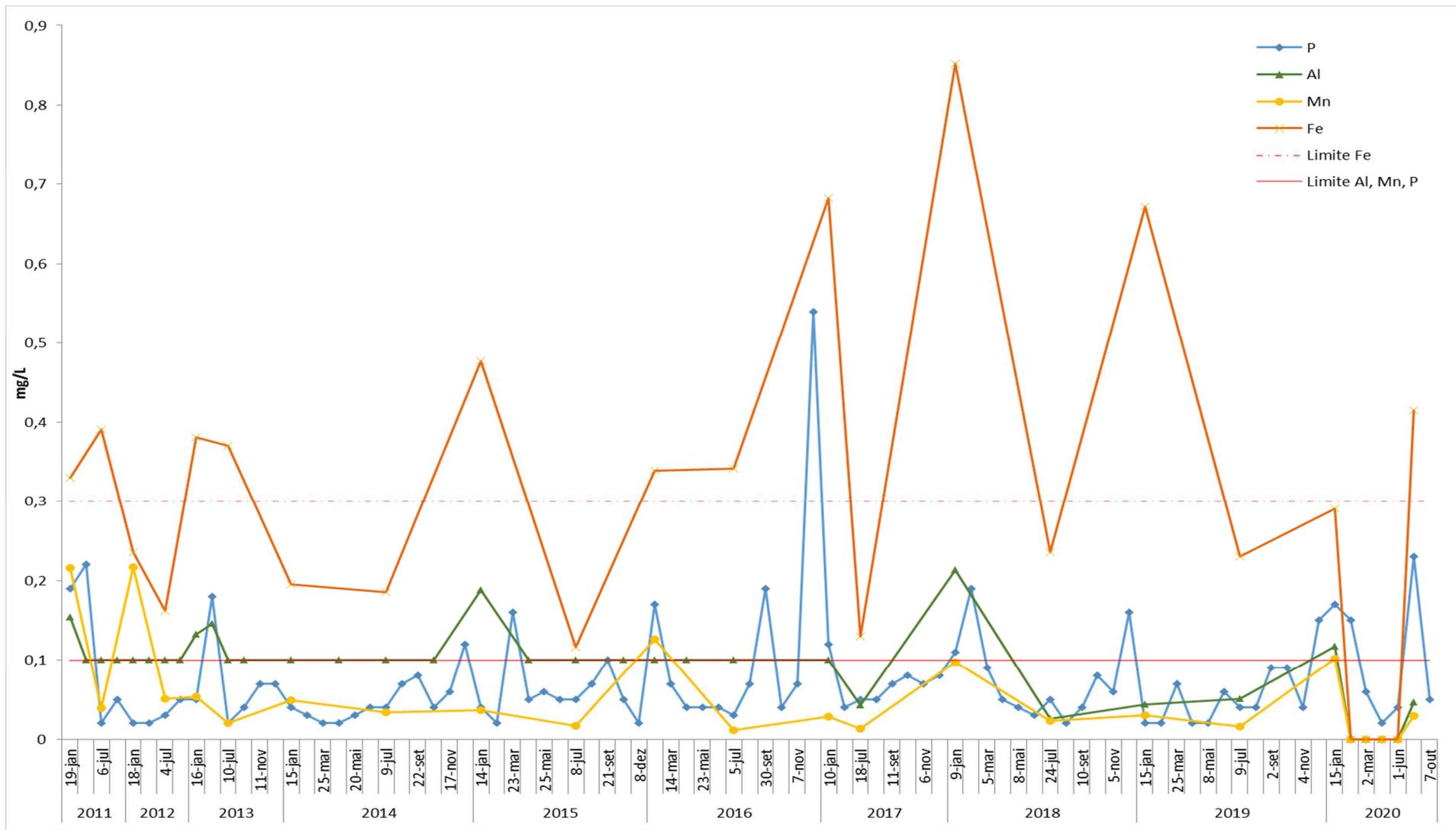
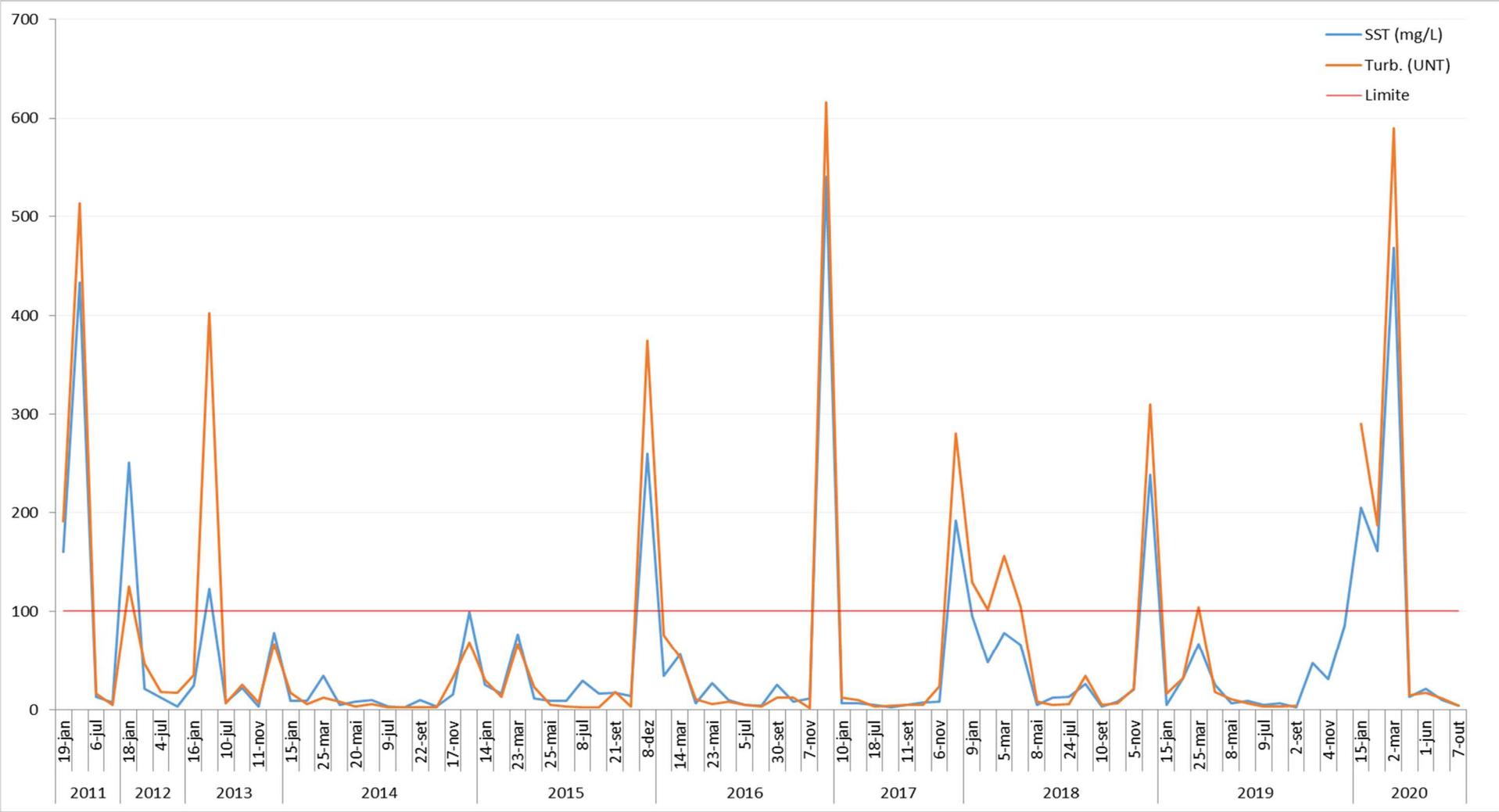


Figura 9: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD013 – Rio Piranga entre 2011 a 2020



No primeiro ano estudado o ICE no rio Piranga apresentou qualidade “ruim”, ao contrário do rio do Carmo, que apresentou qualidade razoável no mesmo período. Neste ano, conforme observado no **Anexo B**, os parâmetros que mais impactaram no resultado do índice foram as altas concentrações dos sólidos em suspensão, turbidez e principalmente pelo fator abrangência, onde seis dos dez parâmetros analisados ultrapassaram os limites da resolução Conama ao menos uma vez em 2011, sendo este ano o que apresentou pior resultado do ICE em todo o período no rio Piranga. Em 2012 o índice calculado apresentou qualidade boa, onde neste ano as variáveis que apresentaram violações foram o manganês, SST e Turbidez, apenas na primeira coleta realizada no mês de Janeiro. Em 2013 observa-se um pequeno decaimento no ICE.

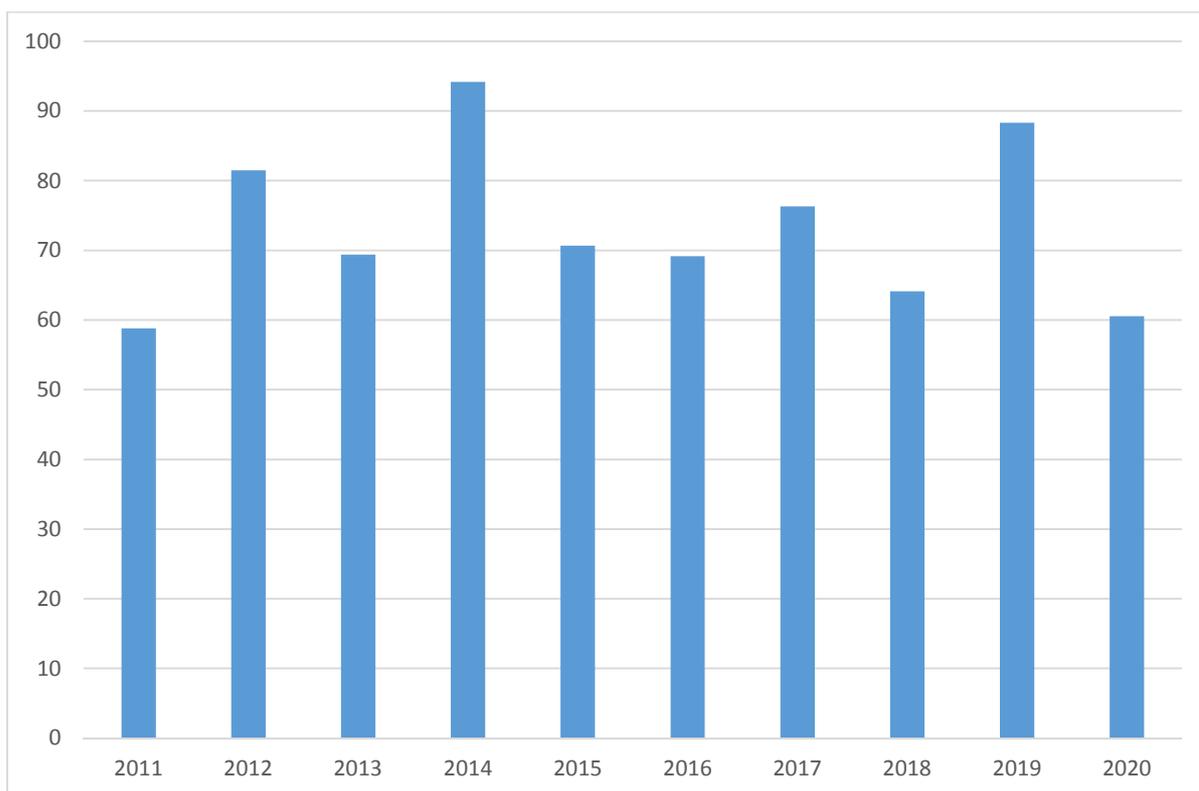
Como foi observado no rio do Carmo uma melhor qualidade da água em 2014, o rio Piranga neste mesmo ano, também apresentou o melhor resultado do índice de toda a série, onde apenas a variável fósforo superou o limite da legislação uma vez. Vale ressaltar a sensibilidade do índice a pequenas variações, pois mesmo que apenas uma variável apresente desconformidade com os limites, como ocorreu em 2014, com baixa amplitude, esta única violação foi responsável por rebaixar a qualidade das águas do nível “Excelente” para o nível de qualidade “Boa”.

A partir de 2015 a 2017 o ICE apresentou qualidade razoável, com um padrão de falha dos parâmetros de forma semelhante, ocorrendo um aumento da concentração nos períodos de pico dos elementos Fe, P e Al nas águas, como pode ser observado na Figura 8. A concentração de Al e Fe atingiram valores máximos em todo o período estudado no ano de 2018, com valores na faixa de $0,213 \text{ mg.L}^{-1}$ e $0,852 \text{ mg.L}^{-1}$ respectivamente, o que contribuiu para uma qualidade das águas “Ruim” neste ano, sendo impactadas também pelo maior número de extrapolações dos limites das variáveis SST e turbidez (Figura 9) apresentando valor inferior ao ICE para o rio do Carmo no mesmo período.

Apresentando um comportamento parecido com o rio do Carmo, em 2019 o rio Piranga apresentou qualidade das águas “Boa”, sendo que neste ano houve apenas uma falha para a variável Fe e uma para o fósforo. Em 2020 a qualidade da água voltou a apresentar qualidade “Ruim”, estando relacionada provavelmente com um maior índice de pluviosidade na região pelo maior nível de SST e turbidez nas águas entre Janeiro a Março, o que graficamente coincide com o aumento da concentração de metais na água.

Na Figura 10 é apresentado o resultado final do índice de conformidade ao enquadramento no Rio Piranga na estação RD013 entre 2011 e 2020.

Figura 10: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD13 no Rio Piranga entre 2011 a 2020



5.3 Rio Doce (RD072)

Para a visualização da dinâmica dos parâmetros que tiveram maior impacto e relevância no ICE no rio Doce (estação RD072), são mostrados na Figura 11 as concentrações dos metais Al, Fe, P e Mn entre 2011 e 2020, e na Figura 12 as concentrações de sólidos em suspensão total e turbidez. Na Tabela 10 também são apresentados os resultados numéricos de cada fator individual do ICE para cada ano.

Tabela 10: Dados numéricos dos fatores Abrangência, Frequência, Amplitude e ICE para a estação RD072 – Rio Doce

Ano	F1	F2	F3	ICE
2011	40	17,5	38,33	66,46
2012	30	7,5	14,69	80,23
2013	60	18,57143	22,75	61,43
2014	10	1,04	1,23	94,15
2015	40	4,49	75,54	50,58
2016	50	21,43	64,00	51,50
2017	60	15,00	19,55	62,55
2018	60	20,00	7,96	63,20
2019	40	14,41	10,20	74,75
2020	60	25,45	28,54	58,92

Figura 11: Concentrações de Al, Fe, P e Mn na estação RD072 – Rio Doce entre 2011 a 2020

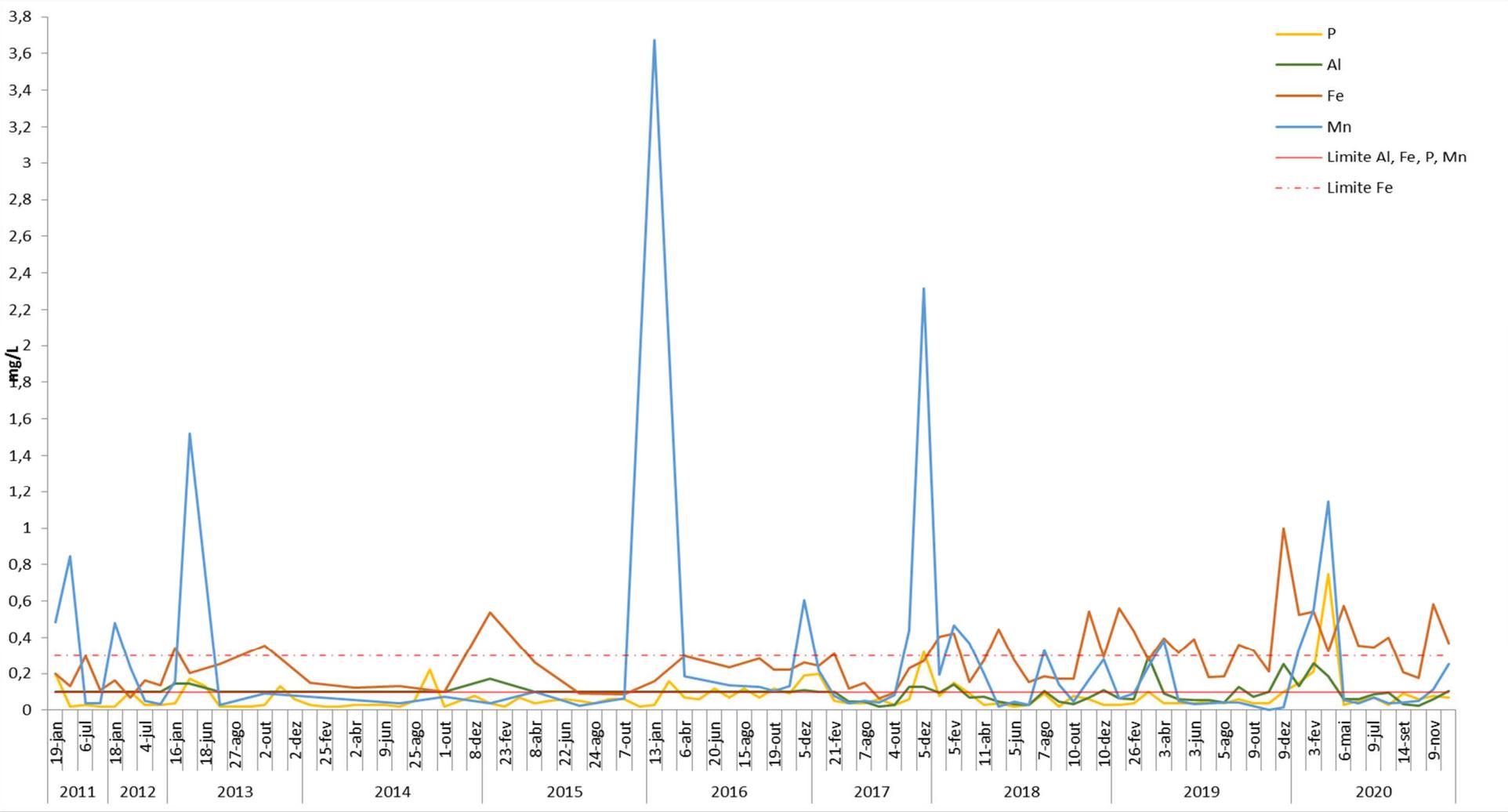
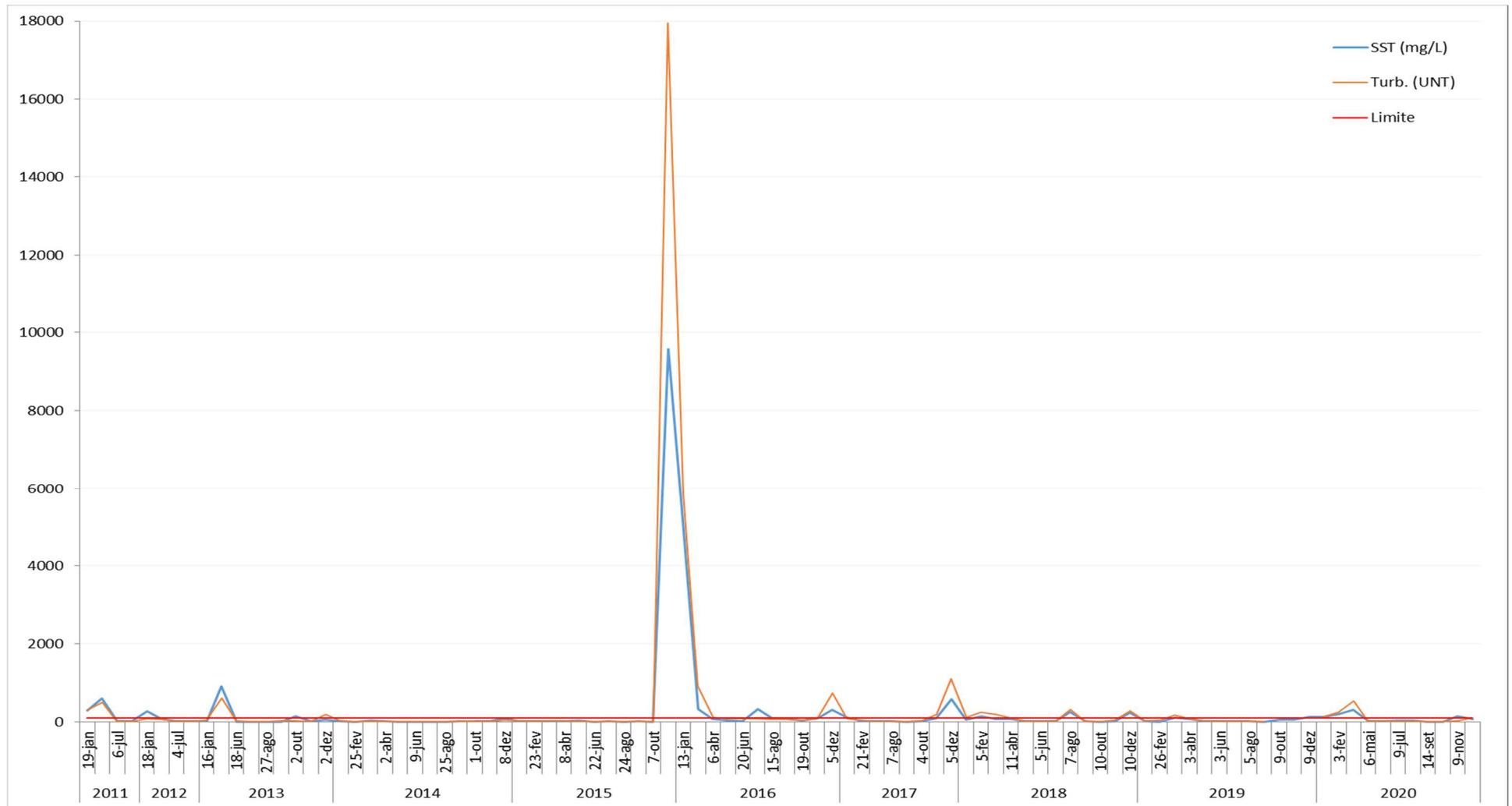


Figura 12: Concentrações de sólidos em suspensão totais e turbidez na estação RD072 – Rio Doce entre 2011 a 2020

Ao se verificar os resultados do ICE no rio Doce, nota-se que o comportamento gráfico do índice é semelhante com o gráfico obtido para o rio do Carmo, apresentando um resultado numérico levemente melhor no ano de 2012, onde a qualidade das águas mostrou-se classificada como “Boa” favorecida por uma menor concentração do manganês. Em 2013, o ICE também apresentou resultado levemente melhor em relação ao ano anterior influenciado pela maior quantidade de coletas feitas nesta estação (**Anexo C**), o que favorece diretamente o fator F_2 , com concentração de Mn e Al semelhante às mensuradas no rio do Carmo no mesmo período. O ano de 2014 apresentou o melhor resultado, semelhante a todas as estações estudadas, onde apenas o parâmetro fósforo apresentou valor acima do limite uma única vez.

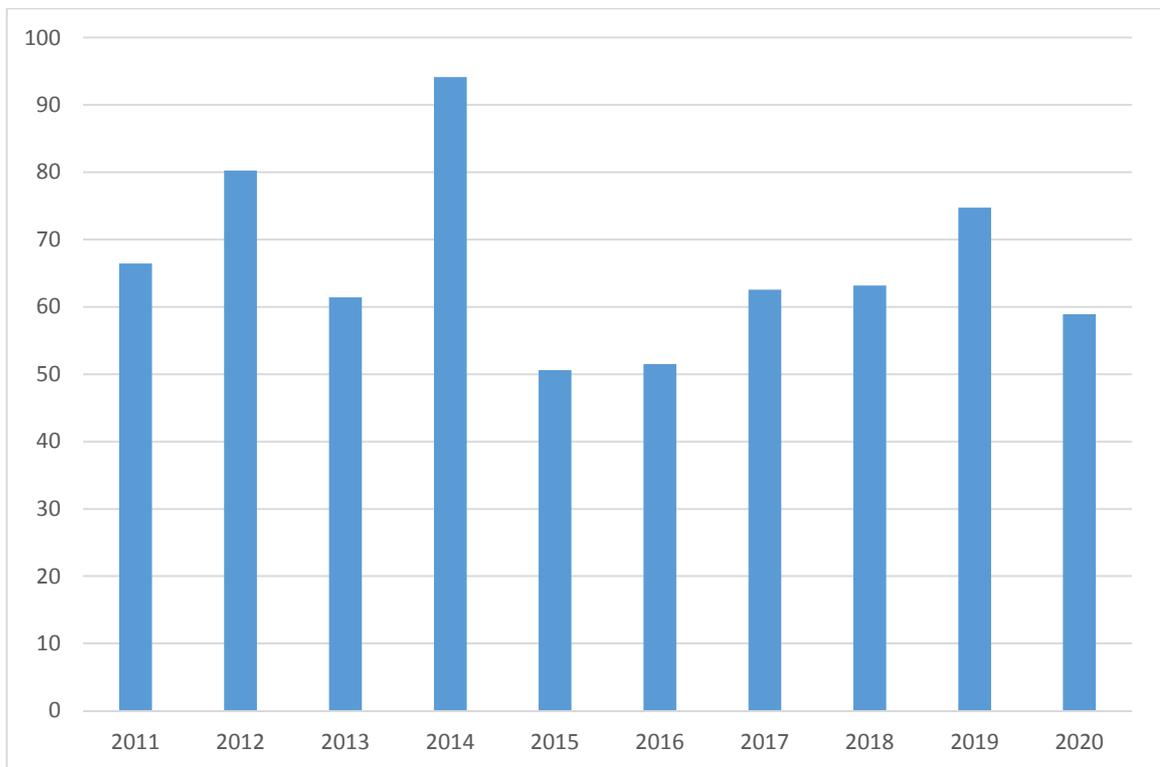
Ao contrário do rio do Carmo que apresentou qualidade de água “Boa” em 2015, na estação RD071 no rio Doce, foram feitas onze coletas de dados neste ano, onde os dados mensurados no dia 8 de Dezembro, um mês após o rompimento da barragem, mostrou valores exorbitantes para as variáveis SST e turbidez, apresentando valores da ordem de 9.580 mg.L^{-1} e 17.949 UNT , como pode ser observado no **Anexo C** e na Figura 12, rebaixando a qualidade das águas neste ano para “Ruim”. Vale ressaltar que neste ano, as únicas variáveis que haviam apresentado desconformidades anteriormente foram o Al e o Fe no mês de Janeiro, que resultou em um fator F_2 baixo, contudo, este único evento foi capaz de influenciar fortemente o fator F_3 , que apresentou o maior valor em todo o período, como pode ser observado na Tabela 10.

Entre 2016 a 2018, houve uma melhora gradual no ICE, como também ocorreu no rio do Carmo em função da diminuição dos sólidos em suspensão e turbidez, entretanto a concentração de Mn medida no rio Doce no mês de Janeiro no ano de 2016 foi o dobro em comparação a registrada na estação do rio do Carmo.

Ao observar a Figura 11 em comparação com a Figura 5, percebe-se que a partir do ano de 2019 a 2020, houve aumento na concentração de Fe nesta estação, superior ao observado no rio do Carmo, que mostrou maiores valores de manganês e menor quantidade de ferro no mesmo período.

Na Figura 13 é apresentado o resultado final do índice de conformidade ao enquadramento no rio Doce na estação RD072 entre 2011 e 2020.

Figura 13: Índice de Conformidade ao Enquadramento na estação RD072 no Rio Doce entre 2011 a 2020



5.4 Considerações

Para todas as estações estudadas, os parâmetros cloretos totais, nitrogênio amoniacal total e oxigênio dissolvido não apresentaram nenhuma violação dos limites em toda a série histórica de 2011 a 2020. Para o oxigênio dissolvido, mesmo no período mais crítico registrado na estação RD072 no rio Doce em de Dezembro de 2015, para as variáveis turbidez e SST, que evidenciam a passagem de uma grande carga sedimentar, o oxigênio dissolvido permaneceu em limites aceitáveis, o que pode ser explicado pela variação total da altitude do perfil topográfico do rio Gualaxo do Norte e Rio do Carmo, típicos de rios encachoeirados, o que favorece a reoxigenação destes corpos hídricos, como observado por Reis (2019).

As variáveis que contribuíram de forma mais significativa para a redução do ICE em todas as estações desde estudo foram; sólidos em suspensão, turbidez, manganês, ferro e fósforo, pois apresentaram maior quantidade percentual de violações dos limites de qualidade para os corpos d'água classe 2, embora a variável fósforo total tenha exercido pouca influência na estação do rio do Carmo (RD071) apresentando apenas quatro violações em todo o período considerado neste trabalho. Tal fato corrobora com os resultados apontados por Fraga *et. al* (2021), que aponta estas variáveis como sendo as principais responsáveis pela variabilidade da qualidade da água na bacia do rio Piranga.

Em termos das variáveis turbidez e sólidos em suspensão, que foram as variáveis que exerceram impacto no ICE de forma expressiva em todas as estações (mesmo a estação não afetada, RD013), Santos *et. al* (2017) e Fraga *et. al* (2021) destacam o fato da bacia apresentar alta susceptibilidade a erosão, devido ao uso e ocupação do território, onde aproximadamente 69% das terras da bacia são utilizadas para fins agrícolas, os tipos de solos predominantes e regiões de declividade acentuada. ANA (2016) aponta ainda o controle da erosão e o transporte de sedimentos como uma questão crucial em relação à qualidade das águas, contida no Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce (PIRH-Doce), aprovado em 2010.

Este fato pode explicar os níveis de turbidez e SST próximos ou até menores nas estações afetadas em relação à estação não afetada após o ano de 2019, onde graficamente observa-se uma normalização destes parâmetros na série histórica para as estações que foram afetadas pelos rejeitos. Esta observação corrobora com Fraga *et. al* (2021), que afirma que as altas concentrações destas variáveis no período pós rompimento não foram suficientes para provocar uma tendência significativa de elevação na série histórica nas estações afetadas, onde os picos de elevação durante os períodos chuvosos (após 2019) são correspondentes ou menores em relação aos picos em períodos anteriores ao rompimento. Estes valores são menores que as máximas históricas anteriores a 2015 relatados por ANA (2016) e IGAM (2020), que observam máximas de, 744 UNT e 1088 mg.L⁻¹ (RD071), 604 UNT e 894 mg.L⁻¹ (RD072), para a turbidez e SST, respectivamente, o que indica que está ocorrendo a estabilização destes parâmetros nos anos mais recentes a níveis pré-rompimento.

Há uma forte relação entre a quantidade de sólidos em suspensão e o aumento da concentração de manganês nas águas das estações RD071 e RD072, mesmo em períodos anteriores ao rompimento, entretanto houve uma superação das máximas históricas para este elemento nos períodos pós-rompimento. Esta mesma condição também é observada por Fraga *et. al* (2021) e ANA (2016) nas estações afetadas pelos rejeitos da barragem, indicando a há forte presença deste elemento nos sedimentos. Embora a presença do ferro e manganês nos sedimentos e nas águas esteja relacionada com assinatura geológica local (rochas supracrustais ricas em ferro e óxidos de manganês, típicas do Quadrilátero Ferrífero), as atividades minerárias na região do alto curso do rio Gualaxo do Norte também contribuíram ao longo dos anos para o enriquecimento de Fe, Mn e outros elementos nos sedimentos da bacia, conforme relatado por Rodrigues *et. al* (2015).

Ao considerar o ferro, que é um dos elementos presentes no rejeito, é observado um comportamento diferente para este elemento nas estações afetadas, onde logo após o rompimento houve pouca variação da concentração deste elemento nas águas, e elevação na concentração após o ano de 2018, apresentando valores acima dos limites mesmo nas estações secas, e graficamente há uma tendência de elevação da concentração deste parâmetro na estação RD072. Nesta estação observa-se também que no primeiro semestre de 2020, todas as amostras mostraram-se acima dos limites, e apenas duas amostras mostraram valores dentro dos limites no segundo semestre. Vale ressaltar que o íon ferroso Fe^{+2} (solúvel) em ambientes com alta disponibilidade de oxigênio pode ser facilmente oxidado para Fe^{+3} dando origem as formas insolúveis (óxidos, hidróxidos, associações com outros metais e/ou matéria orgânica), e como observado por IGAM (2020) esperava-se que maior parte deste elemento estivesse associado ao material particulado em suspensão na forma insolúvel, o que indica que parte do rejeito depositado nas margens e calhas dos rios impactados está se comportando como uma fonte contínua de ferro, sendo mobilizados para a água através de processos de decomposição, ação de bactérias ferruginosas e lixiviação.

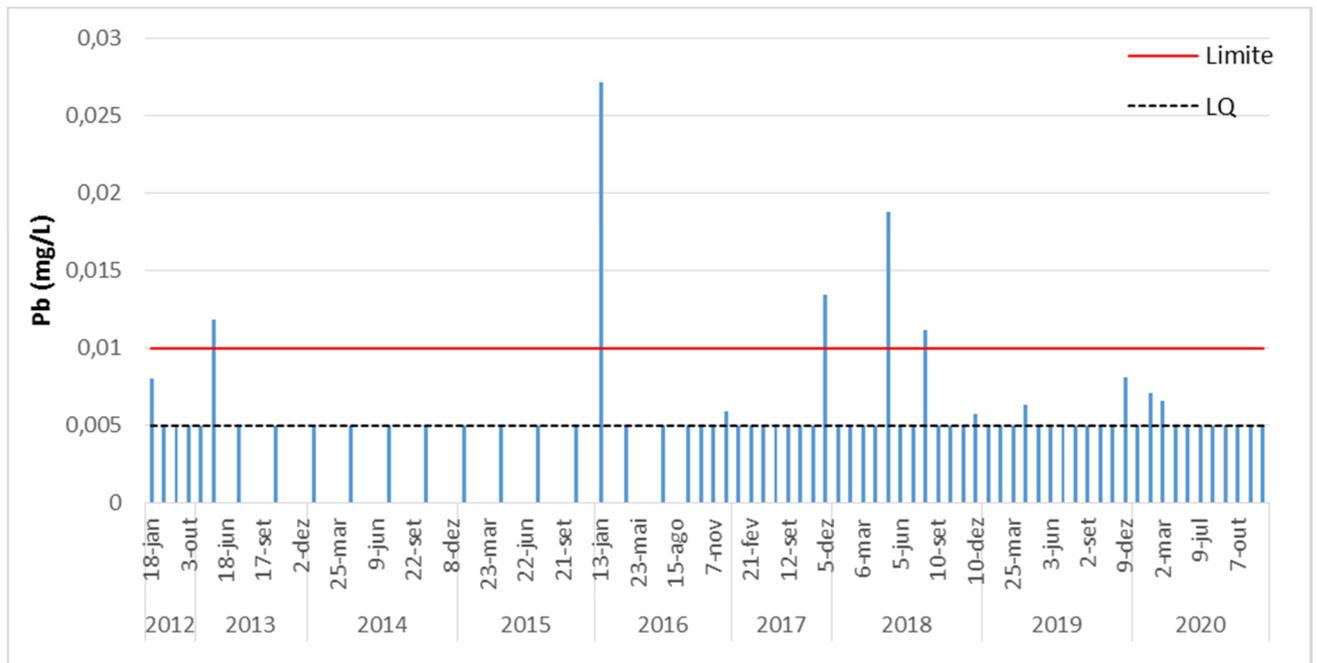
Embora a estação RD013 (rio Piranga) não tenha sido afetada pelos rejeitos, há um comportamento gráfico similar entre o aumento da quantidade de sólidos em suspensão e a concentração de ferro, manganês e alumínio nas águas nesta estação (Figura 8, Figura 9). A presença destes elementos nesta estação também pode ser explicada pela litologia ao longo do curso do rio Piranga e seus afluentes, conforme relatado por Costa

et. al (2009), que ao estudar a estratigrafia química de terraços aluviais da bacia do rio Piranga, destaca a presença dos elementos Fe, Mn, Al, P, Pb, Cu e, Zn constituintes das rochas e minerais desta região, como também foi observada uma alta concentração de Al e P associados a argilo-minerais e matéria orgânica nos depósitos aluviais.

Vale considerar também que para este trabalho os metais considerados tóxicos, como As, Cu, Hg, Pb, Zn, não foram utilizados no ICE, pois conforme observado na série histórica disponibilizada no Portal INFOHIDRO e como relatado por IGAM (2020), a maioria dos valores obtidos para estes parâmetros são menores ou iguais (\leq) ao limite de quantificação (LQ) do método analítico. Para o alumínio dissolvido como apontado por IGAM (2020) houve superação das máximas históricas na estação RD071 em 2018 e renovação da máxima em 2020, na estação RD072 as novas máximas ocorreram em 2019 e 2020, observações que corroboram com os dados obtidos neste trabalho (Figura 5 e Figura 11).

Em relação aos metais com efeitos de toxicidade mencionados anteriormente, nos **(ANEXO D, ANEXO E, ANEXO F)** pode-se verificar o comportamento destes parâmetros para todas as estações no período de 2012 a 2020. A maioria dos elementos não tiveram suas concentrações alteradas como foi relatado por (CPRM e ANA, 2015b) com extrapolações pontuais dos limites para o Zn e Hg, entretanto, para o metal Pb, como pode ser observado na Figura 14, este parâmetro apresentou grande elevação da sua concentração nas águas após o rompimento, estação RD072, extrapolando os valores máximos da série estudada, mostrando também um tendência de diminuição ao longo dos anos, o que indica que provavelmente a concentração deste elemento nas águas sofreu influência pela passagem dos rejeitos nesta estação.

Figura 14: Concentrações de Pb na estação RD072 - Rio Doce, entre 2012 a 2020



6 CONCLUSÃO

O ICE mostrou-se como um índice com boa adaptação, refletindo de maneira satisfatória a dinâmica de alteração na qualidade das águas em virtude do rompimento da barragem de Fundão, principalmente no tocante as variáveis relacionadas com a presença de sólidos na água, pois foram as variáveis que exerceram maior influência e impacto negativo no índice nos períodos críticos. O ICE também mostrou grande sensibilidade a pequenas variações, apontando alterações em seu resultado final frente a uma única violação dos limites em todo o período, o que pode ser uma grande vantagem se aplicado a sistemas de monitoramento com maior periodicidade de coletas. A desvantagem em utilizar este índice utilizando-se dados públicos, é que não há padronização no número de coletas, como foi observado para o rio Piranga, que teve maior rebaixamento da qualidade da água em virtude do menor número de dados anuais, o que exerce maior influência sobre o fator F_2 .

Pode-se concluir também que o rompimento da barragem contribuiu para o aumento da concentração de manganês nas águas na estação do rio do Carmo e rio Doce nos primeiros anos após o rompimento, onde a partir do ano de 2018, esta variável voltou a apresentar valores máximos mais próximos àqueles observados nos períodos pré-rompimento. A concentração de manganês nas águas em todas as estações apresenta um comportamento cíclico, com forte relação à quantidade de sólidos em suspensão, apresentando tendência de elevação em períodos de maior pluviosidade com aumento concomitante, evidenciando a presença deste elemento nos sedimentos de calha e leito dos cursos d'água, contudo, este parâmetro mostra concentrações mais elevadas no rio do Carmo e rio Doce, devido a contribuições das atividades minerárias da mina de Miguel Congo.

Além do manganês, para o ferro e alumínio também foi observado um comportamento cíclico-sazonal similar para todas as estações, no que se refere ao aumento das concentrações destes metais e o incremento de sólidos em suspensão nas águas, atribuídos também ao substrato litológico regional. Há uma tendência na diminuição da quantidade de sólidos suspensos nas águas das estações afetadas, entretanto, a sub-bacia do rio Piranga apresenta uma alta susceptibilidade à erosão, pois os valores de turbidez e sólidos suspensos foram maiores (ou próximos) na estação não afetada no ano de 2020.

A estação localizada no rio Doce apresentou nos últimos anos uma tendência significativa de elevação da quantidade de ferro, sugerindo que o incremento de ferro é oriundo dos depósitos de rejeitos ainda presentes nas margens e calhas do rio Gualaxo do Norte e Carmo que atuam como uma fonte contínua de Fe, e possivelmente estes depósitos podem estar contribuindo também para o aumento da concentração de alumínio nesta estação, pois há uma tendência de elevação das concentrações deste elemento, valores estes que superaram as máximas históricas já registradas.

Ressalta-se também que este trabalho não levou em consideração em termos dos impactos decorridos em virtude do rompimento, o parâmetro condutividade elétrica, por este não apresentar limites específicos na legislação federal ou estadual, e não pode ser utilizado no ICE, mas conforme destacado por CPRM e ANA (2015^a), Santos (2018), (REIS, 2019), IGAM (2020), foi uma das variáveis que apresentou maior alteração significativa em relação às médias de anos anteriores, e portando requer estudos mais detalhados a respeito.

Acrescenta-se ainda que os impactos detectados via ICE e outras observações feitas no presente estudo, não refletem outros possíveis danos imprevistos incidentes sobre a ictiofauna, herpetofauna, avifauna, mastofauna e microfauna, portando estes aspectos merecem estudos mais específicos e detalhados de forma subsidiar propostas que assegurem a preservação da diversidade e integridade do patrimônio genético do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 Bibliografia

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Panorama da Qualidade das Águas Superficiais do Brasil**, Brasília - DF, 2012.

ANA. Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico. **Encarte Especial sobre a Bacia do Rio Doce - Rompimento da Barragem em Mariana/MG. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil**, Brasília -DF, 2016.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**, Brasília - DF, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Enquadramento dos corpos d'água em classes. Conjunturas dos recursos hídricos no Brasil 2019**, Brasília - DF, 2020. Disponível em: <http://www.snirh.gov.br/portal/snirh/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/encarte_enquadramento_conjuntura2019.pdf>.

ANA. Dados Abertos para a Gestão de Recursos Hídricos. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**, 2021. Disponível em: <<https://dadosabertos.ana.gov.br/>>. Acesso em: Junho 2021.

ANA. INDICADORES DE QUALIDADE - ÍNDICE DE QUALIDADE DAS ÁGUAS (IQA). **Portal da Qualidade das Águas - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)**, 2021. Disponível em: <<http://pnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx>>. Acesso em: Julho 2021.

BARBOSA, A. R. Elementos de Hidrologia Aplicada. **HIDROLOGIA, ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E APLICAÇÕES**, 2015.

BATISTA, D. F.; CABRAL, J. B. P. MODELOS MATEMÁTICOS PARA AVALIAÇÃO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA: UMA REVISÃO. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, v. 11, n. 25, p. 111-136, Jan/Abr 2017.

BRASIL. Lei Nº 6.938, de 31 de Agosto de 1981. **Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras**

providências, Brasília - DF, AGO. 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: 10 Abril 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 20, de 18 de Junho de 1986. **Estabelece a classificação das águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**, Brasília - DF, Diário Oficial da União, JUN. 1986.

BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília - DF, JAN. 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: 5 Abril 2021.

BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de Março de 2005. **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**, Brasília - DF, Diário Oficial da União, MAR. 2005. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>>.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**, Brasília - DF, 2006. 1 - 213.

CABRAL, L. S. L.; MELLO, C. E. F. XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Avaliação do Índice de Conformidade ao Enquadramento em um trecho do Rio das Velhas**, Brasília - DF, Nov. 2015.

CBH-PIRANGA. CBH-PIRANGA. **Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Piranga**, 2021. Disponível em: <<https://www.cbhpiranga.org.br/>>. Acesso em: Julho 2021.

CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment. **Water Quality Index 1.0 User's Manual**, Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 2001a.

CCME. Canadian Council of Ministers of the Environment. **Water Quality Index User's Manual 2017 Update**, Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, 2017.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade das Águas Interiores no Estado de São Paulo | Apêndice D - Índices de Qualidade das Águas**, 2017. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/>>. Acesso em: Julho 2021.

COSTA, A. T.; BARRETO, D.; CASTRO, P. D. T. A. **Estratigrafia Química de Terraços Aluviais da Bacia do Rio Piranga - MG**. Universidade Federal de Ouro Preto. Campus do Morro do Cruzeiro – DEGEO - UFOP. Ouro Preto. 2009.

COSTA, H. F. **Monitoramento da qualidade da água e do uso e cobertura da terra na bacia de contribuição da represa de São Pedro, Juiz de Fora (MG) no período de 2005 a 2015**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora. 2016.

CPRM; ANA. CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Agência Nacional de Águas. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce - Relatório 1: Acompanhamento da onda de cheia**, Belo Horizonte, Dez. 2015a. 33p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21587>>. Acesso em: Março 2021.

CPRM; ANA. CPRM - Serviço Geológico do Brasil; Agência Nacional de Águas. **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Doce - Relatório 2: Geoquímica**, Belo Horizonte, Dez. 2015b. 37p. Disponível em: <<https://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/21588>>. Acesso em: Março 2021.

DOCE, C. A Bacia. **Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Doce**, 2021. Disponível em: <<http://www.cbhdoce.org.br/institucional/a-bacia>>. Acesso em: Julho 2021.

FRAGA, M. D. S. et al. Avaliação da qualidade das águas superficiais na circunscrição hidrográfica do rio Piranga utilizando análise estatística multivariada e não-paramétrica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 02, p. 694-710, Fev. 2021. ISSN 1984-2295.

GLORIA, L. P.; HORN, B. C.; HILGEMANN, M. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS ATRAVÉS DA FERRAMENTA DO ÍNDICE DE QUALIDADE DA ÁGUA - IQA. **Revista Caderno Pedagógico**, Lajedo, v. 14, n. 1, p. 103-119, 2017. ISSN 1983-0882. Disponível em: <<http://www.univates.br/revistas>>. Acesso em: Julho 2021.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2020. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: Junho 2021.

IDE-SISEMA. **Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - Minas Gerais**, 2021. Disponível em: <<http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/>>. Acesso em: Junho 2021.

IEDE. **Infraestrutura Estadual de Dados Espaciais de Minas Gerais**, 2021. Disponível em: <<http://iede.fjp.mg.gov.br/catalogo.html>>. Acesso em: Junho 2021.

IGAM. **Instituto Mineiro de Gestão de Águas - IGAM**, 2010. Disponível em: <<http://www.igam.mg.gov.br/>>. Acesso em: Junho 2021.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **MONITORAMENTO DA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUPERFICIAIS DO RIO DOCE NO ESTADO DE MINAS GERAIS. Acompanhamento da Qualidade das Águas do Rio Doce Após o Rompimento da Barragem da Samarco no distrito de Bento Rodrigues – Mariana/MG**, Mar. 2017.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas - IGAM. Porta InfoHidro, Informações sobre Recursos Hídricos. **Contaminação por Tóxicos - CT**, 2018. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/sem-categoria/320-contaminacao-por-toxicos-ct>>. Acesso em: Julho 2021.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. **ENCARTE ESPECIAL SOBRE A QUALIDADE DAS ÁGUAS DO RIO DOCE APÓS 5 ANOS DO ROMPIMENTO DA BARRAGEM DE FUNDÃO 2015-2020**, Belo Horizonte - MG, 2020.

MACHADO, M. D. M. **Desempenho ambiental**. Ouro Preto: ABC, 2020.

MPF. Caso Samarco: O desastre. **Ministério Público Federal**, 2020. Disponível em: <<http://www.mpf.mp.br/grandes-casos/caso-samarco/o-desastre>>. Acesso em: 2021 Março 18.

OLIVEIRA, I. S. et al. Índice de Conformidade ao Enquadramento nos Reservatórios Jucazinho, Bituri, Botafogo e Pirapama, em Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 04, p. 1575-1584, 2018. ISSN 1984-2295.

PRISTINO. Municípios de Minas Gerais. **Instituto Pristino**, 2010. Disponível em: <<https://institutopristino.org.br/atlas/municipios-de-minas-gerais/>>. Acesso em: Junho 2021.

REIS, D. A. D. **Contaminação química e microbiológica em águas e sedimentos da bacia do rio Gualaxo do Norte, sub-bacia do rio Doce, submetida a fatores de pressão antrópicos e ao rompimento da barragem de Fundão**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental - PROAMB, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto. 2019.

RODRIGUES, A. S. D. L. et al. Construção de mapas geoquímicos a partir de sedimentos ativos de margens oriundos do Rio Gualaxo do Norte, MG, Brasil. Urutaí - GO: [s.n.], 2015. p. 70-78.

ROSMAN, P. C. C. Aspectos de hidrodinâmica Ambiental e Transporte de Sedimentos na Bacia do Rio Doce e Zona Costeira após Acidente da Samarco. **Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica, Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Escola Politécnica e COPPE/PEO - UFRJ**, Nov 2015. 1-20.

SABESP. Qualidade da água tratada. **Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo**, 2021. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=40#:~:text=O%20pH%20%C3%A9%20uma%20medida,%20C0%20a%209%2C5>>. Acesso em: 10 Abril 2021.

SANTOS, G. R. D. **Técnicas de reconhecimento de padrões para a avaliação de corpos hídricos afetados por rejeitos do rompimento da barragem de fundão**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental -PROAMB, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto. 2018.

SANTOS, J. P. D. et al. Susceptibilidade à erosão no Rio Gualaxo do Norte - MG. **Caminhos de Geografia**, Uberlandia - MG, v. 18, n. 63, p. 286-307, Set. 2017. ISSN 1678-6343.

SILVA, D. C. V. R. D. et al. Avaliação da eficiência de um índice de estado trófico na determinação da qualidade da água de reservatórios para abastecimento público. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 625-635, jul/ago 2018. ISSN 10.1590/S1413-41522018168445.

SILVA, M. T. L. **Aplicação do Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) de Cursos D'água**. Dissertação (Pós-Graduação em Saneamento Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Belo Horizonte. 2017.

ZAGATTO, P. A. et al. Aperfeiçoamento de um índice de qualidade de águas. **Acta Limnologica Brasiliensia**, São Paulo, v. 11(2), p. 111-126, Janeiro 1999.

ANEXO A – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd071 – rio do carmo

Data		Al diss. total (mg/L)	Cloretos totais (mg/L)	Fe diss. total (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Mn total (mg/L)	NH ₄ ⁺ total (mg/L)	OD (mg/L)	PH	SST (mg/L)	Turb. (UNT)
2011	18-jan	0,1	1,63	0,1938	0,11	0,788	0,11	8,5	6,5	181	116
	5-abr	0,1	1,25	0,1757	0,16	1,496	0,1	8,8	6,4	204	219
	5-jul	0,1	1,56	0,1772	0,02	0,0678	0,1	9,5	6,3	15	5,7
	4-out	0,1	1,66	0,1075	0,05	0,0826	0,11	8,2	7,5	4	3,28
2012	17-jan	0,1	1,15	0,1144	0,08	1,6546	0,1	7,8	6,9	262	68,2
	3-abr	0,1	1,24	0,102	0,08	0,824	0,21	7,8	6,3	107	82,9
	3-jul	0,1	1,48	0,1278	0,02	0,1027	0,11	8,5	6,7	8	9,1
	2-out	0,1	3,73	0,0796	0,07	0,1233	0,1	8,5	6,8	28	9,5
2013	15-jan	0,105	2,24	0,251	0,05	0,622	0,1	7,6	6,8	77	72,9
	9-abr	0,209	2,15	0,254	0,19	1,558	0,11	7,9	6,7	1088	744
	9-jul	0,1	1,49	0,1	0,02	0,0432	0,11	9,1	6,8	2	5,23
	1-out	0,1	2,77	0,1671	0,02	0,171	0,17	8,2	6,9	46	41,7
2014	14-jan	0,1	1,48	0,0699	0,03	0,297	0,16	7,6	6,9	27	29,5
	1-abr	0,1	1,66	0,0491	0,02	0,0571	0,1	8,3	7,3	13	6,87
	8-jul	0,1	1,77	0,111	0,02	0,0352	0,1	8,2	6,7	4	2,73
	1-out	0,1	2,92	0,0902	0,02	0,0631	0,1	7,6	7,3	2	4,21
2015	13-jan	0,1	1,86	0,1736	0,09	0,0442	0,1	7,7	7,6	8	3,56
	7-abr	0,105	1,94	0,279	0,06	0,206	0,1	7,8	6,4	16	15,8
	7-jul	0,1	1,75	0,0541	0,06	0,0351	0,1	9,2	7,8	14	1,85
	6-out	0,1	1,88	0,0969	0,04	0,0666	0,1	8,3	6,5	12	1,8
2016	12-jan	0,1	1,9	0,0691	0,04	1,375	0,1	7,5	6,9	1692	3365
	5-abr	0,1	1,73	0,204	0,07	0,309	0,14	7,9	7,1	80	135
	20-jun										
	5-jul	0,1	1,6	0,1483	0,02	0,0607	0,1	9	7,1	294	41,7
	30-set	0,1		0,1597		0,318		8	7,2	246	145
	18-out	0,1	1,97	0,12826	0,04	0,1992	0,1	7,8	7,4	352	93,7
	7-nov	0,1		0,291		0,159		8	7,2	34	58,7
5-dez	0,133		0,264		1,143		7,9	6,2	406	5228	
2017	10-jan	0,1	2,07	0,0837	0,04	0,23	0,1	7,4	6,4	83	161
	20-fev	0,1		0,212		0,14		7,7	7,9	65	53,2
	18-jul	0,02	0,81	0,0956	0,04	0,0692	0,1	8,8	6,9	13	16,5
	7-ago	0,058	1,77	0,1158	0,02	0,0459	0,1	8,7	8	11	15,2
	11-set	0,02	2,59	0,088	0,03	0,0312	0,1	8	8	3	6,04
	3-out	0,039	3,91	0,1573	0,03	0,0437	0,15	7,4	7,3	15	18,6
	6-nov	0,161	2,73	0,311	0,02	1,234	0,15	7,4	7,2	370	586
4-dez	0,085	3,56	0,226	0,02	1,84	0,1	8,1	7,1	329	608	
2018	9-jan	0,062	2,33	0,1948	0,06	0,473	0,1	7,7	7,2	120	136
	5-fev	0,267	2,48	0,645	0,02	1,343	0,1	8,1	6,9	373	521
	5-mar	0,093	0,75	0,1475	0,09	0,576	0,1	7,9	6,8	506	118

	10-abr	0,03	1,65	0,272	0,04	0,349	0,1	7,8	6,7	88	66,8
	7-mai	0,058	2,71	0,272	0,02	0,022	0,1	8,5	6,7	12	18,3
	4-jun	0,045	1,78	0,225	0,02	0,0826	0,1	8,4	6,7	20	9,12
	24-jul	0,057009	1,97	0,1447	0,02	0,103	0,1	8,6	7,2	12	7,86
	6-ago	0,053786	3,34	0,20815	0,02	0,137	0,13	8,1	7,2	10	18,4
	10-set	0,039392	2,1	0,15173	0,02	0,0566	0,1	9,3	6,2	3	7,54
	9-out	0,052	1,28	0,217	0,02	0,1061	0,1	7,7	7,3	2	10
	5-nov	0,052174	1,76	0,24776	0,06	0,4029	0,1	8,4	6,6	24	47,3
	10-dez	0,052777	1,64	0,20806	0,02	0,1997	0,11	8,2	6,1	49	45,4
2019	15-jan	0,082119	1,76	0,30583	0,02	0,1028	0,1	7,6	6,1	7	24,4
	25-fev	0,056651	1,56	0,30776	0,02	0,1442	0,14	6,9	7,4	6	24,7
	25-mar	0,056328	1,45	0,26722	0,04	0,3966	0,14	7,4	7	53	73,4
	2-abr	0,088777	2	0,30942	0,02	0,1395	0,21	8	6,2	12	30,4
	8-mai	0,046775	1,51	0,18161	0,02	0,1242	0,3	7,7	7,7	20	48,5
	3-jun	0,039766	1,82	0,25689	0,06	0,0491	0,16	7,2	7,2	19	6,84
	9-jul	0,037331	1,55	0,14821	0,02	0,0441	0,21	9,2	6,1	2	4,78
	5-ago	0,029402	2,35	0,14856	0,03	0,0551	0,12	8,6	7,3	10	3,84
	2-set	0,053478	2,06	0,12196	0,02	0,059	0,25	7,9	7,2	6	5,02
	8-out	0,037524	1,7	0,1856	0,02		0,004			30	
4-nov	0,055639	1,73	0,19061	0,02	0,0164	0,014			46		
9-dez	0,092069	2,59	0,3682	0,06	0,0294	0,007			56		
2020	14-jan	0,131587	1,19	0,20824	0,07	0,485	0,1	7,9	6,7	38	98,1
	3-fev	0,106412	1,83	0,22856	0,05	0,8386	0,1	7,5	7,1	62	172
	2-mar	0,273832	1,78	0,32746	0,02	1,3525	0,4	8,5	6,4	299	540
	6-mai	0,033154	0,93	0,34471	0,15	0,1424	0,1	8,8	6	13	10,6
	1-jun	0,037092	1,51	0,23701	0,02	0,0519	0,1	9,9	7	16	7,95
	7-jul	0,04914	1,61	0,2545	0,02	0,0917	0,1	9,2	6,6	34	9,58
	3-ago	0,049915	1,73	0,23211	0,02	0,0669	0,37	9,1	6,6	28	7,02
	14-set	0,066354	1,42	0,23333	0,04	0,06	0,1	5,4	8,3	6	6,54
	6-out	0,024443	1,92	0,16348	0,04	0,0874	0,17	8	7,4	12	4,82
	9-nov	0,041362	1,85	0,2864	0,04	0,1877	0,39	7,8	6,8	2	23,3
14-dez	0,07292	0,63	0,16608	0,2	0,8137	0,11	7,9	5,8	108	140	

ANEXO B – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd013 – rio piranga

Data		Al diss. total (mg/L)	Cloretos totais (mg/L)	Fe diss. total (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Mn total (mg/L)	NH ₄ ⁺ total (mg/L)	OD (mg/L)	PH	SST (mg/L)	Turb. (UNT)
2011	19-jan	0,154	2,02	0,33	0,19	0,2156	0,12	8,7	6,7	160	191
	6-abr	0,1	1,62		0,22		0,1	9	6,3	434	513
	6-jul	0,1	1,49	0,391	0,02	0,0391	0,15	9,8	6,8	13	16
	5-out	0,1	1,81		0,05		0,14	8	7,3	7	5
2012	18-jan	0,1	1,52	0,236	0,02	0,2171	0,15	7,6	7,1	251	125
	4-abr	0,1	1,67		0,02		0,1	7,6	6,8	21	46,6
	4-jul	0,1	1,36	0,162	0,03	0,0504	0,13	8,7	6,7	12	17,5
	3-out	0,1	3,48		0,05		0,1	8,4	6,1	3	17,2
2013	16-jan	0,132	2,46	0,381	0,05	0,0533	0,14	7,9	6,3	24	34,6
	10-abr	0,146	2,18		0,18		0,1	8,2	6,2	123	403
	10-jul	0,1	1,67	0,37	0,02	0,0207	0,12	8,8	6,9	7	6,6
	2-out	0,1	3,97		0,04		0,26	8,1	7	22	25,3
	11-nov		2,07		0,07		0,21	7,6	7,6	3	7,2
	2-dez		3,51		0,07		0,26	7,3	7,3	78	66,5
2014	15-jan	0,1	2	0,1948	0,04	0,0492	0,15	7,5	6,9	9	17,3
	25-fev		2,38		0,03		0,1	7,1	7,2	9	5,32
	25-mar		2,41		0,02		0,14	7,2	6,9	34	11,9
	2-abr	0,1	1,76		0,02		0,1	8,3	7	5	7,89
	20-mai		1,66		0,03		0,1	8,4	7,4	8	2,76
	9-jun		2,52		0,04		0,1	8,2	6,6	10	5,2
	9-jul	0,1	2,16	0,1852	0,04	0,0336	0,1	7,9	6,5	3	2,67
	25-ago		2,73		0,07		0,19	8,3	7,3	2	2,45
	22-set		2,96		0,08		0,1	7,5	7,4	10	2,67
	1-out	0,1	2,84		0,04		0,2	6,6	7	3	2,55
	17-nov		3,98		0,06		0,13	7,4	7,4	15	32,5
8-dez		3,62		0,12		0,3	7,5	7,1	99	67,9	
2015	14-jan	0,188	2,53	0,477	0,04	0,0363	0,1	6,8	6,9	25	29,6
	23-fev		2,26		0,02		0,1	7,4	7,1	16	12,5
	23-mar		2,83		0,16		0,1	7,6	6	76	66,9
	8-abr	0,1	1,98		0,05		0,1	8	7,3	11	22,8
	25-mai		2,5		0,06		0,1	8,1	7,4	9	4,86
	22-jun		0,59		0,05		0,1	8,7	7,4	9	3,17
	8-jul	0,1	1,86	0,1162	0,05	0,0167	0,1	8,6	7,5	29	2,73
	24-ago		2,31		0,07		0,24	8	7,7	16	2,26
	21-set		3,82		0,1		0,1	7,7	7,4	17	17,5
	7-out	0,1	2,4		0,05		0,1	7,5	6,3	14	2,85
8-dez		2,86		0,02		0,17	8	7,2	260	374	

2016	13-jan	0,1	2,69	0,339	0,17	0,126	0,14	7,6	6,8	34	75,2
	14-mar		2,01		0,07		0,1	7,6	7,4	56	52,7
	5-abr	0,1	2,36		0,04		0,1	7,7	7	6	10,2
	23-mai		2,33		0,04		0,1	8,1	6,8	27	5,44
	20-jun		2,75		0,04		0,1	8,8	7,7	10	8,24
	5-jul	0,1	2,5	0,341	0,03	0,011	0,1	8,9	6,9	5	4,56
	15-ago		1,91		0,07		0,1	8,4	7,2	4	2,9
	30-set		3,9		0,19		0,2	7,5	7,2	25	11,8
	18-out		2,95		0,04		0,1	7,8	7,4	8	11,8
	7-nov		2,93		0,07		0,11	7,6	7,5	11	1,63
	5-dez		2,81		0,54		0,15	7,8	6,1	540	616
2017	10-jan	0,1	2,48	0,682	0,12	0,0282	0,1	7,5	6,7	6	12
	21-fev		2,28		0,04		0,27	7,5	7,7	6	9,93
	18-jul	0,043	1,28	0,1298	0,05	0,0127	0,12	8,6	7,2	5	2,81
	7-ago		2,06		0,05		0,38	7,9	7,8	2	4,05
	11-set		2,74		0,07		0,4	7,5	7,3	5	4,99
	3-out		3,04		0,08		0,4	5,9	6,7	7	5,15
	6-nov		3,77		0,07		0,28	6,7	7,1	8	23,4
	5-dez		3,38		0,08		0,19	8,2	7,2	192	281
2018	9-jan	0,213	4,87	0,852	0,11	0,0973	0,1	7,3	7,2	95	129
	5-fev		4,09		0,19		0,22	7,7	7,2	48	102
	5-mar		1,74		0,09		0,1	7,6	7	78	156
	10-abr		2,67		0,05		0,16	7,7	7,5	66	105
	8-mai		2,95		0,04		0,12	7,5	6,4	5	8,13
	5-jun		2,46		0,03		0,15	8,2	6,2	12	4,85
	24-jul	0,02567	2,77	0,23535	0,05	0,0226	0,24	8,1	7,3	13	5,47
	7-ago		3,68		0,02		0,22	8,3	6,9	26	33,7
	10-set		2,97		0,04		0,31	8,3	6,5	3	4,94
	9-out		1,29		0,08		0,27	7	7,3	8	6,37
	5-nov		2,04		0,06		0,1	8	6,7	20	21,3
10-dez		2,75		0,16		0,21	8,2	5,89	239	310	
2019	15-jan	0,04389	2,09	0,67153	0,02	0,0298	0,1	7,2	6,2	5	16,4
	26-fev		2,21		0,02		0,2	7	7,6	32	31,7
	25-mar		2,2		0,07		0,23	7,4	6,9	67	104
	2-abr		3,83		0,02		0,29	7,7	6,5	25	17,4
	8-mai		2,55		0,02		0,19	7,5	7,7	6	10,2
	3-jun		2,21		0,06		0,23	7,7	7,4	9	6,74
	9-jul	0,05061	2,81	0,23028	0,04	0,0161	0,45	8,6	6,9	5	3,49
	5-ago		3,85		0,04		0,1	7,9	7	6	3,2
	2-set		3,9		0,09		0,33	7	7	2	4,13
	8-out		6,67		0,09		0,011			47	
	4-nov		3,43		0,04		0,011			31	

	9-dez		4,48		0,15		0,02			85	
2020	15-jan	0,11746	1,9	0,29045	0,17	0,102	0,1	7,8	7,4	205	290
	3-fev		2,29		0,15		0,21	7,5	6,9	161	187
	2-mar		2,42		0,06		0,46	8,6	6,4	469	590
	6-mai		1,55		0,02		0,42	8,6	6,3	13	14,8
	1-jun		2,22		0,04		0,1	9,5	6,9	21	17,2
	9-jul	0,04646	1,69	0,41514	0,23	0,0291	0,1	9,3	6,3	10	11,2
	7-out		3,14		0,05		0,23	7,3	7	4	4,03

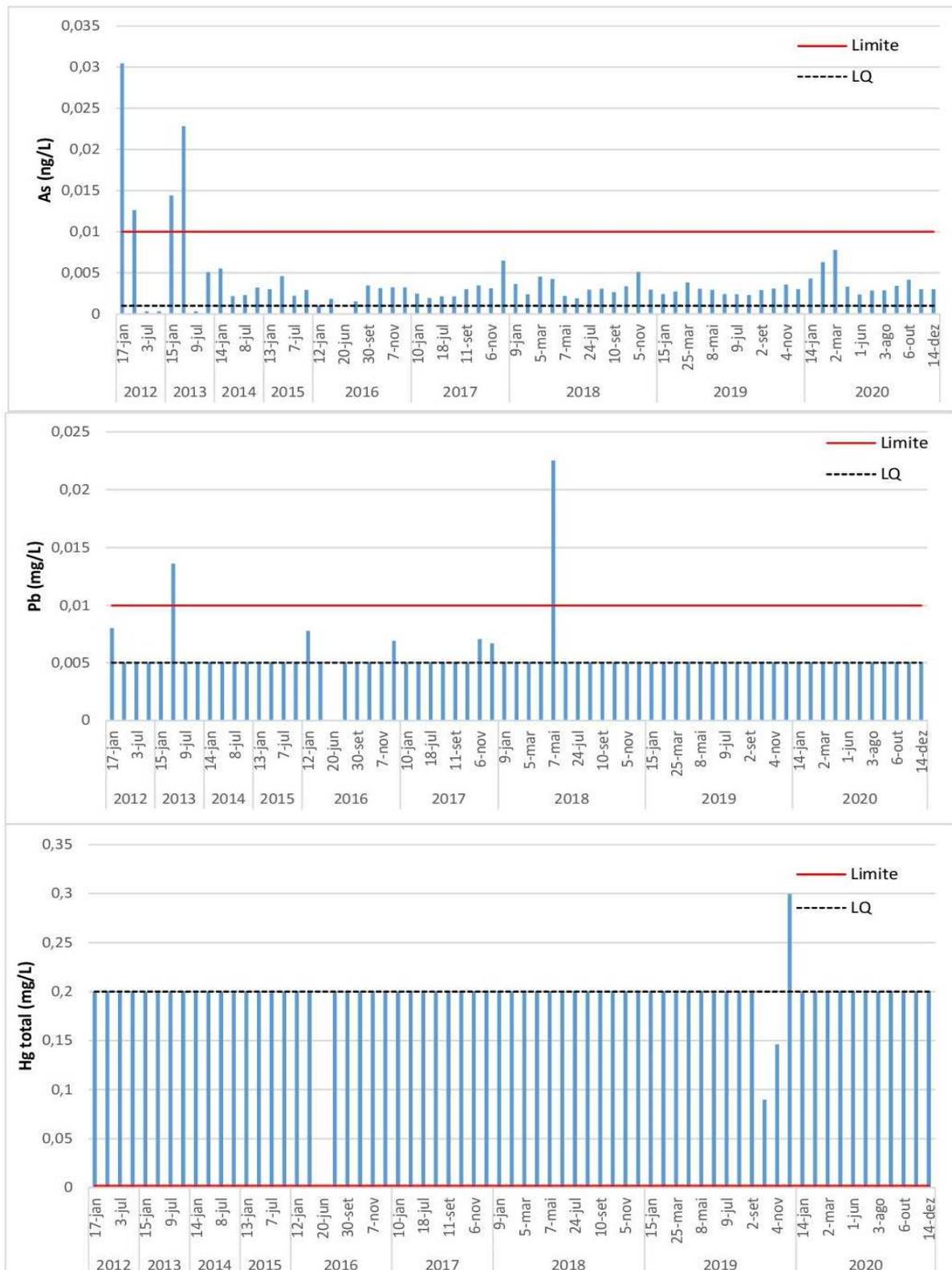
ANEXO C – Dados brutos dos parâmetros de qualidade na estação rd072 – rio doce

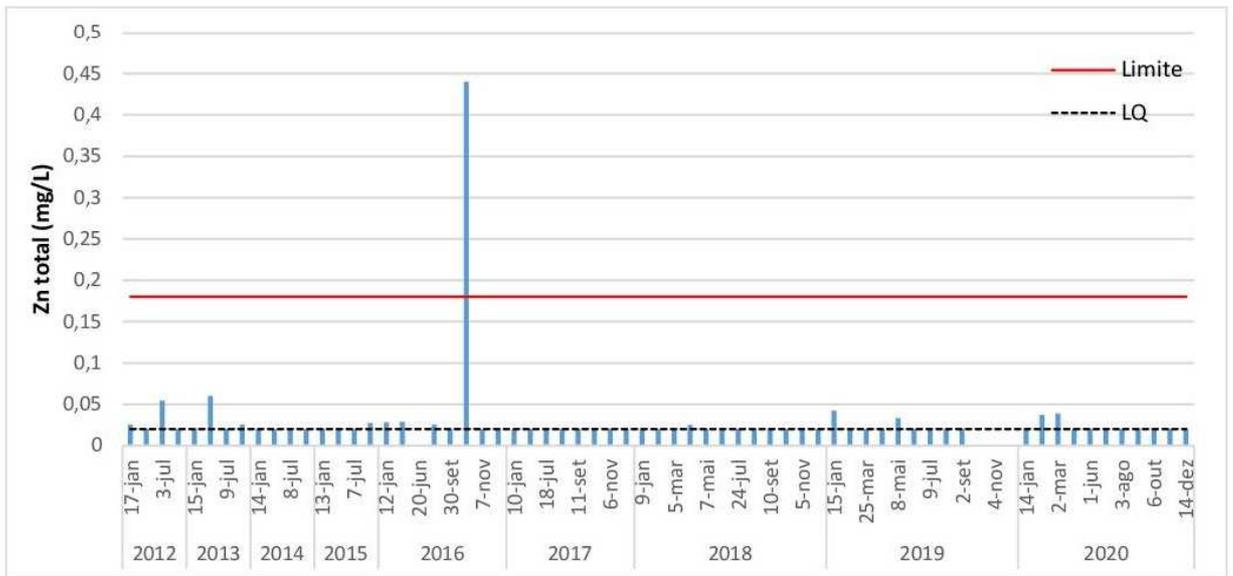
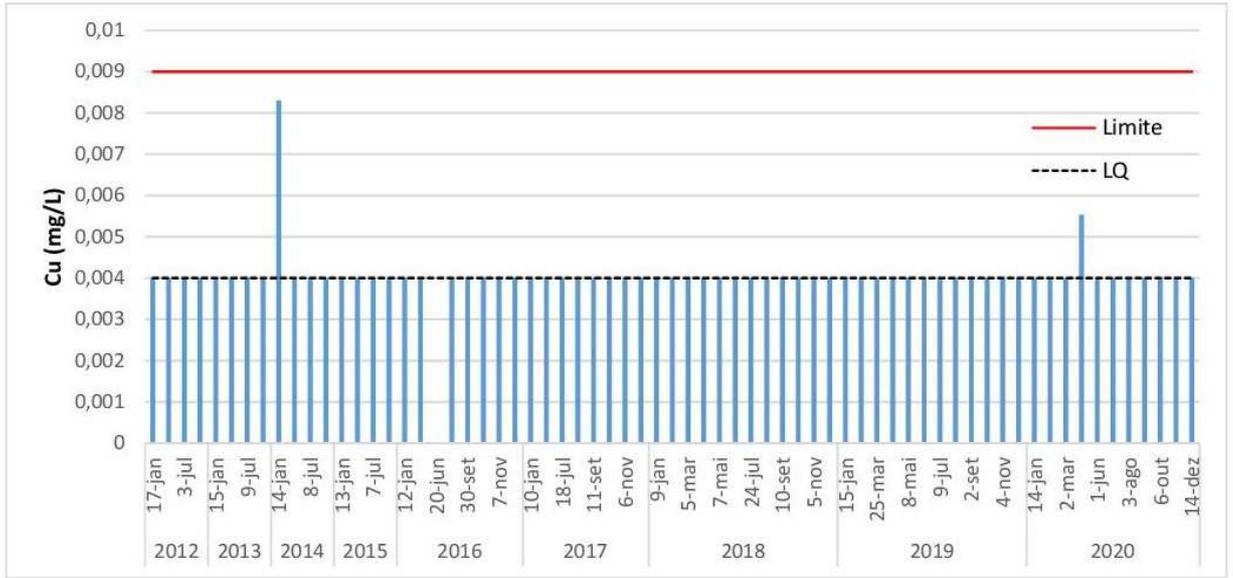
Data		Al diss. total (mg/L)	Cloretos totais (mg/L)	Fe diss. total (mg/L)	Fósforo total (mg/L)	Mn total (mg/L)	NH ₄ ⁺ total (mg/L)	OD (mg/L)	PH	SST (mg/L)	Turb. (UNT)
2011	19-jan	0,1	1,3	0,1987	0,2	0,483	0,13	8,6	6,2	291	289
	6-abr	0,1	1,79	0,1318	0,02	0,846	0,1	8,8	6,1	593	484
	6-jul	0,1	2,02	0,298	0,03	0,036	0,13	9,5	6,7	8	9,1
	5-out	0,1	1,8	0,1084	0,02	0,0381	0,1	8	7,2	7	4,12
2012	18-jan	0,1	1,41	0,1621	0,02	0,478	0,24	7,6	7,1	274	74,5
	4-abr	0,1	1,78	0,0693	0,1	0,2351	0,19	7,6	6,3	61	60,6
	4-jul	0,1	1,4	0,1616	0,03	0,0515	0,13	8,5	7	12	8,74
	3-out	0,1	3,36	0,1373	0,03	0,0343	0,22	8,3	5,9	14	10,6
2013	16-jan	0,147	2,94	0,341	0,04	0,158	0,2	7,9	6,7	21	41,7
	10-abr	0,147	2,18	0,205	0,17	1,52	0,1	8,2	6,3	894	604
	18-jun		2,15		0,13		0,32	8,5	7,4	5	17,7
	10-jul	0,1	1,57	0,25	0,02	0,0278	0,16	8,8	7	2	7,56
	27-ago		2,63		0,02		0,12	8,9	6,6	2	4,64
	17-set		1,9		0,02		0,1	8,6	6,6	2	16
	2-out	0,101	3,68	0,356	0,03	0,0898	0,32	8	6,8	147	24,8
	11-nov		2,45		0,13		0,2	7,3	7,4	12	5,68
2-dez		3,19		0,06		0,33	7,5	7,3	50	182	
2014	15-jan	0,1	1,73	0,1508	0,03	0,0752	0,18	7,5	7	22	18,7
	25-fev		2,43		0,02		0,11	7,1	7,3	2	3,07
	25-mar		2,21		0,02		0,1	7,9	6,9	31	10,2
	2-abr	0,1	1,73	0,122	0,03	0,0575	0,1	8,3	7,1	21	6,57
	20-mai		1,95		0,03		0,1	8,5	7,3	2	2,47
	9-jun		2,63		0,03		0,14	8,3	6,8	2	3,69
	9-jul	0,1	2,64	0,1315	0,02	0,0384	0,1	8,1	6,7	3	2,1
	25-ago		3,03		0,05		0,1	8,7	6,2	4	1,87
	22-set		3,09		0,22		0,1	8,2	7,6	9	2,58
	1-out	0,1	2,86	0,1013	0,02	0,0751	0,26	7,2	7,1	12	1,99
17-nov		3,27		0,05		0,12	7,6	7,6	15	12,5	
8-dez		3,06		0,08		0,14	7,6	7,2	80	43,9	
2015	14-jan	0,171	3,37	0,538	0,04	0,0391	0,12	6,8	7,2	14	22
	23-fev		2,32		0,02		0,1	7,4	7	8	8,72
	23-mar		2,99		0,07		0,1	7,6	6,3	22	20,5
	8-abr	0,1	2,12	0,26	0,04	0,0992	0,1	7,9	6,3	14	24,4
	25-mai		2,86		0,05		0,1	7,9	7,5	26	3,63
	22-jun		2,31		0,06		0,13	8,6	7,4	2	3,5
	8-jul	0,1	2,23	0,0912	0,05	0,0263	0,1	8,9	7,5	14	0,5

	24-ago		2,97		0,04		0,1	8,6	7,7	5	1,64
	21-set		3,34		0,06		0,1	8	7,6	10	9,79
	7-out	0,1	2,93	0,0875	0,06	0,0656	0,1	7,5	6,4	4	2,49
	8-dez		2,64		0,02		0,39	7,9	7,1	9580	17949
2016	13-jan	0,1	3,76	0,157	0,03	3,675	0,27	7,8	6,9	5160	5880
	15-mar		2,84		0,16		0,1	8	7,4	316	915
	6-abr	0,1	2,53	0,299	0,07	0,184	0,41	7,8	7	76	108
	23-mai		2,46		0,06		0,1	8,1	6,9	27	77
	20-jun		2,91		0,12		0,1	8,8	7,7	19	74,2
	6-jul	0,1	2,64	0,234	0,07	0,135	0,1	9,3	6,7	317	69
	15-ago		2,08		0,12		0,1	8,3	7,3	80	65,1
	30-set	0,1	3,59	0,282	0,07	0,129	0,1	8	7,5	63	64,7
	19-out	0,1	2,91	0,218984	0,12	0,1041	0,1	8	7,5	34	50,3
	7-nov	0,1	2,86	0,219	0,09	0,13	0,1	7,7	7,2	92	83,6
5-dez	0,11	4,36	0,26	0,19	0,607	0,1	8	6,2	310	732	
2017	11-jan	0,1	2,9	0,245	0,2	0,215	0,13	7,5	6,3	108	84,8
	21-fev	0,1	2,23	0,311	0,05	0,0794	0,1	7,6	7,6	13	35,1
	19-jul	0,045	2,13	0,1171	0,04	0,0361	0,1	9	6,4	7	10,2
	7-ago	0,047	2,62	0,1479	0,04	0,0505	0,2	8,4	7,9	6	11,9
	12-set	0,02	3,1	0,0646	0,06	0,0437	0,1	8,1	7,5	4	6,63
	4-out	0,03	3,37	0,0952	0,03	0,0843	0,1	7,5	7,1	16	14,7
	7-nov	0,125	2,77	0,229	0,06	0,439	0,23	7,7	7,3	94	186
5-dez	0,128	3,79	0,271	0,32	2,316	0,32	8,2	7,1	579	1094	
2018	10-jan	0,095	3,35	0,403	0,08	0,196	0,1	7,7	6,9	55	109
	5-fev	0,139	3,74	0,424	0,15	0,468	0,27	8,1	7,5	141	235
	6-mar	0,069	1,15	0,1536	0,09	0,368	0,16	7,7	6,9	69	178
	11-abr	0,073	2,82	0,275	0,03	0,1975	0,1	7,9	7,5	73	98,4
	8-mai	0,049	3,24	0,443	0,04	0,0216	0,1	8	6,8	20	14,1
	5-jun	0,033	2,29	0,274	0,02	0,0454	0,1	8,4	6,4	15	8,87
	25-jul	0,03022	2,33	0,155633	0,03	0,0293	0,1	8,4	7,3	8	6,24
	7-ago	0,10634	4,09	0,185085	0,09	0,3273	0,25	8,3	7	249	317
	10-set	0,04637	1,48	0,17376	0,02	0,1404	0,1	9	6,3	9	11,7
	10-out	0,035	2,02	0,171	0,08	0,048	0,15	7,7	7,3	5	7,94
	5-nov	0,07031	2,09	0,544649	0,06	0,1654	0,1	8,4	6,8	15	35,7
10-dez	0,10766	2,24	0,293066	0,03	0,2782	0,14	8,1	5,7	228	285	
2019	16-jan	0,06243	2,26	0,561016	0,03	0,0655	0,28	7,3	6,2	7	21,7
	26-fev	0,06047	2,49	0,435576	0,04	0,0933	0,16	7,2	7,3	5	34,8
	25-mar	0,29053	2,91	0,275691	0,1	0,2384	0,22	7,4	6,9	104	170
	3-abr	0,09016	2,91	0,395013	0,04	0,3834	0,2	8	6,3	67	72,4
	8-mai	0,05906	2,08	0,316811	0,04	0,052	0,1	7,7	7,6	8	21,4
	3-jun	0,05657	2,68	0,391595	0,04	0,0329	0,5	7,2	7,3	15	7,14
	10-jul	0,05625	2,11	0,181457	0,05	0,0399	0,22	8,6	6,8	6	3,94
	5-ago	0,04051	3,73	0,183031	0,04	0,0416	0,1	8,2	7,1	10	4,31

	2-set	0,12674	3,76	0,359478	0,06	0,0432	0,1	7,3	7,1	5	4,43
	9-out	0,07146	3,89	0,326675	0,04		0,015			49	
	4-nov	0,1006	3,57	0,213381	0,04	0,0033	0,021			43	
	9-dez	0,2509	6,39	0,999103	0,1	0,0142	0,037			115	
2020	15-jan	0,13226	1,46	0,525199	0,15	0,339	0,17	7,8	6,9	130	131
	3-fev	0,2576	2,24	0,541711	0,21	0,5553	0,1	7,7	7,2	188	236
	2-mar	0,18465	2,36	0,323273	0,75	1,1445	0,64	8,5	6,6	300	536
	6-mai	0,06014	1,9	0,575368	0,03	0,0548	0,72	8,5	6,1	19	12,1
	1-jun	0,05988	2,18	0,356201	0,05	0,0365	0,1	9,5	6,9	20	16,2
	9-jul	0,08502	2,4	0,344006	0,07	0,0706	0,26	9,2	6,6	26	11,5
	3-ago	0,0944	2,41	0,400393	0,03	0,0368	0,37	9,1	6,6	36	8,05
	14-set	0,0355	2,08	0,20674	0,09	0,0426	0,12	5,8	8	2	5,61
	7-out	0,02554	3,19	0,176631	0,06	0,0529	0,52	7,8	7,4	2	4
	9-nov	0,06169	3,86	0,581902	0,08	0,1145	0,24	7,9	6,5	139	29,4
	15-dez	0,10352	1,63	0,368571	0,07	0,2541	0,52	8,1	6,3	76	91,4

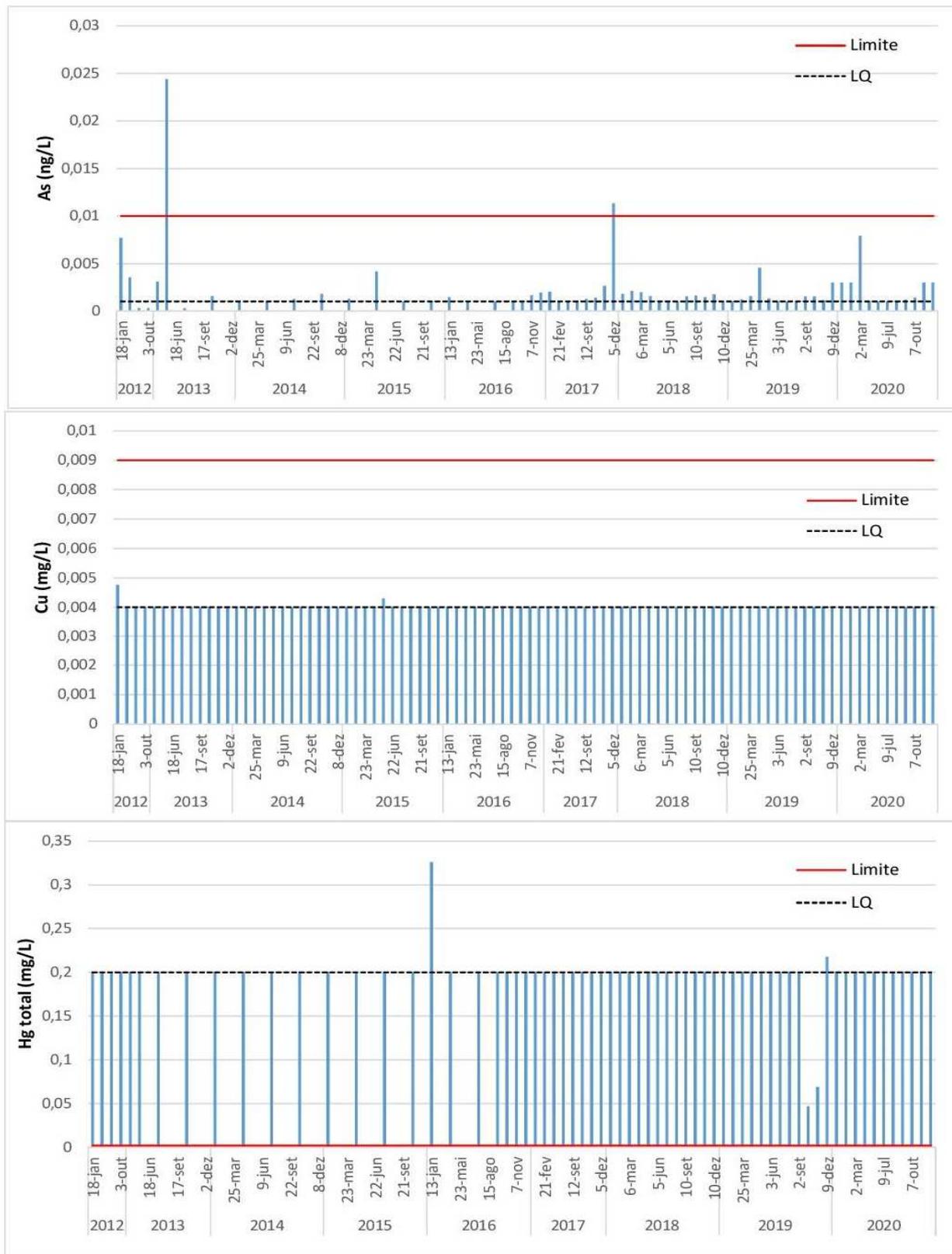
ANEXO D – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD071 – Rio do Carmo entre 2012 a 2020.

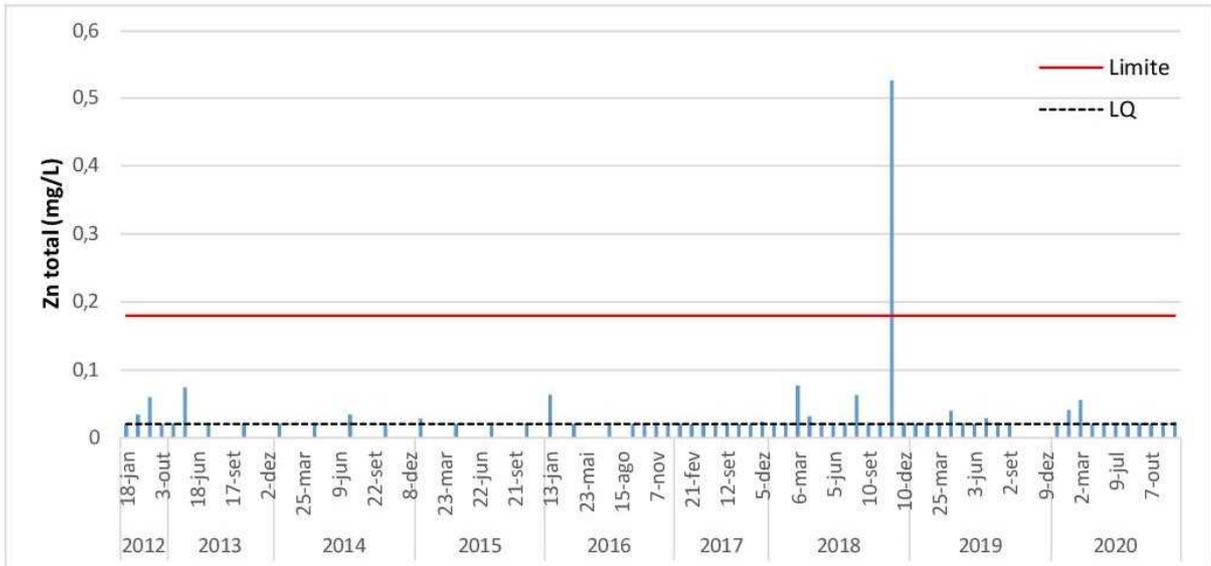
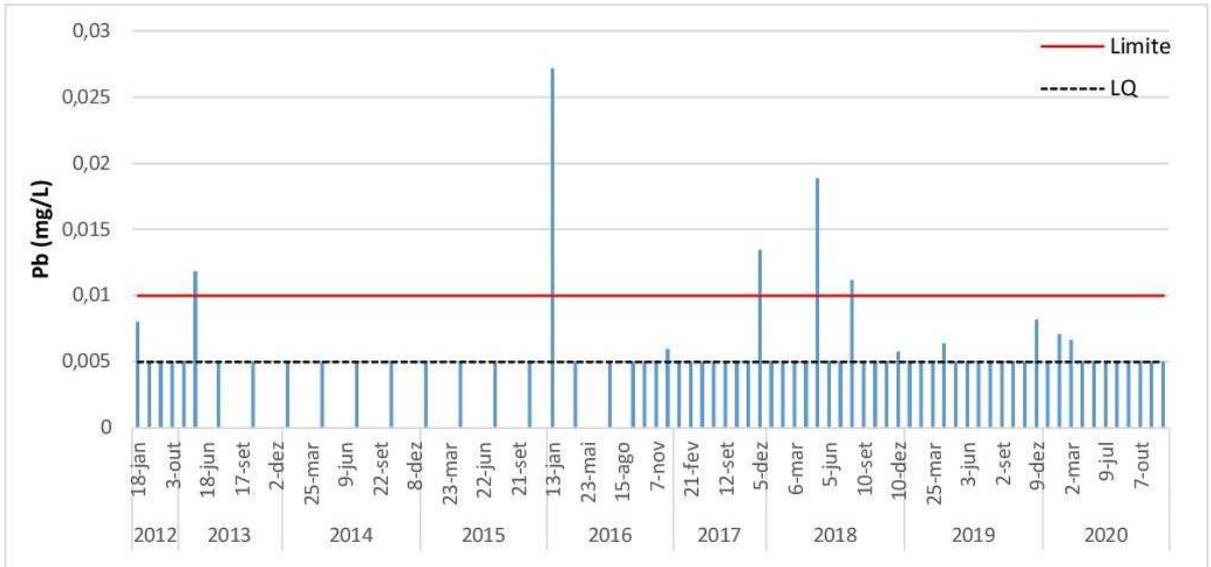




— Limite CONAMA 357 p/ corpos d'água Classe 2
 - - - LQ = Limite de quantificação do método analítico

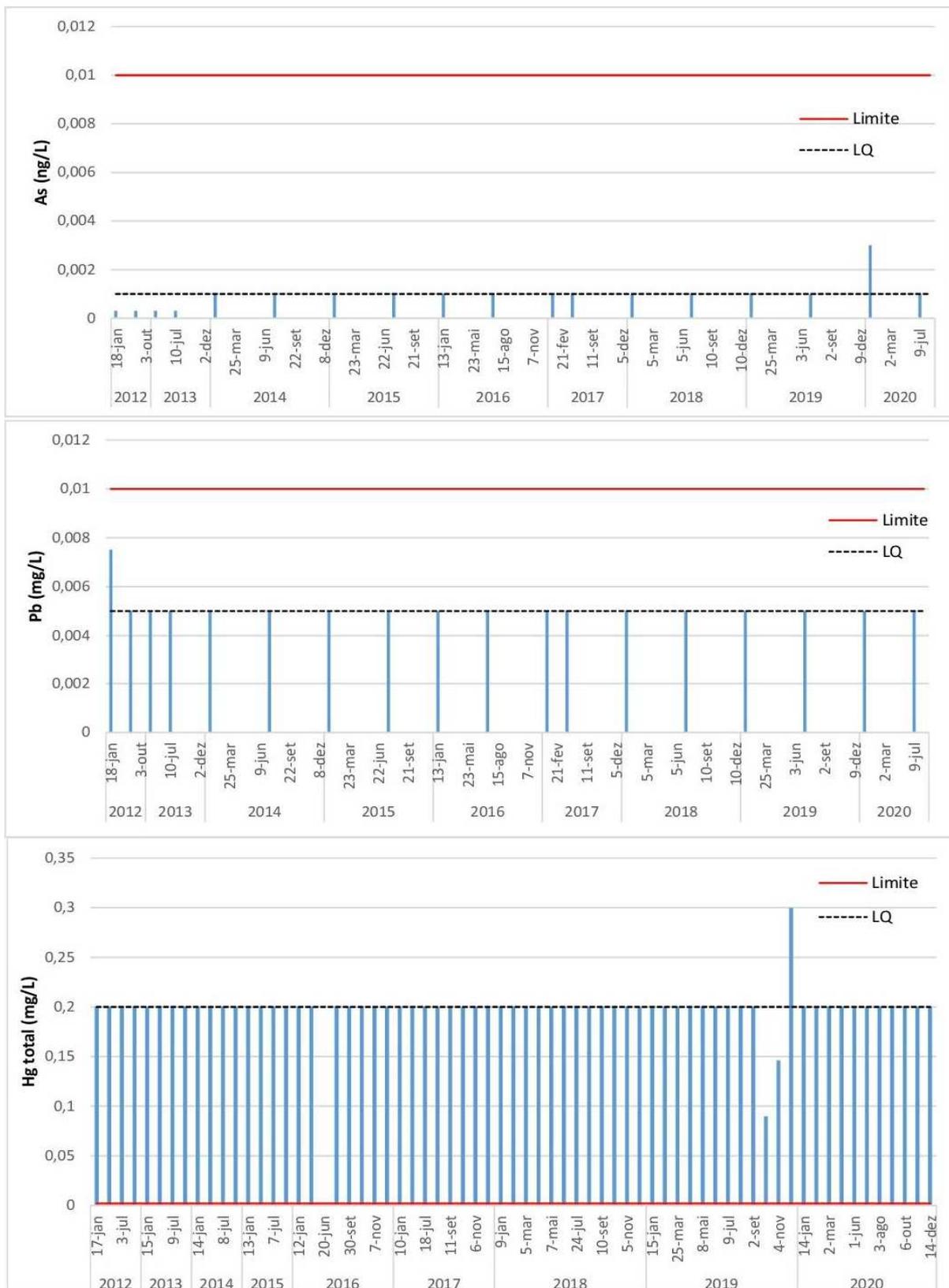
ANEXO E – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD072 – Rio Doce entre 2012 a 2020.

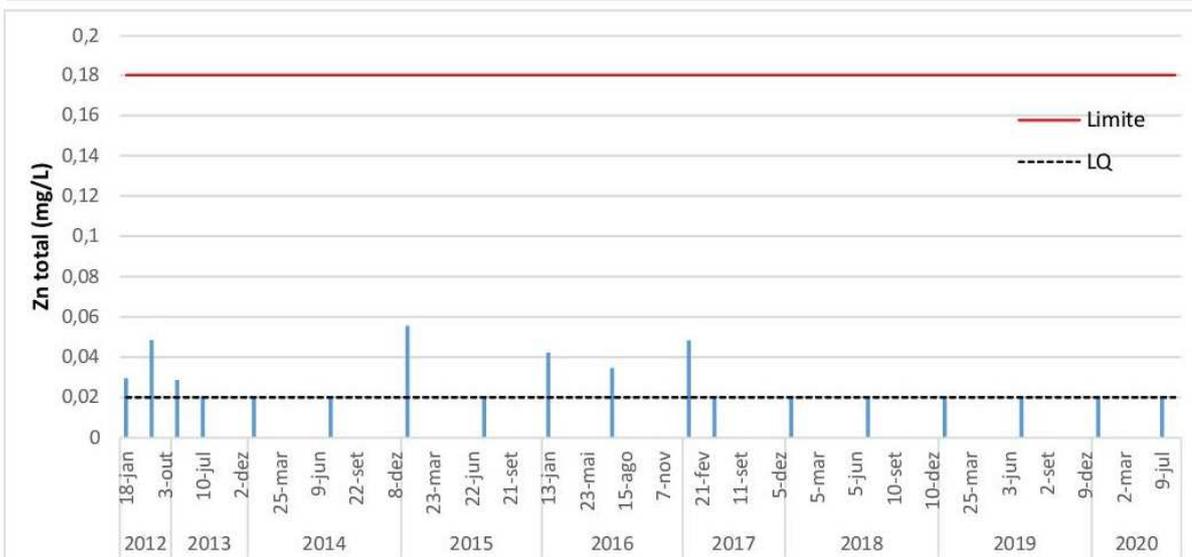




— Limite CONAMA 357 p/ corpos d'água Classe 2
- - - LQ = Limite de quantificação do método analítico

ANEXO F – Concentrações de As, Cu, Hg, Pb, Zn na estação RD013 – Rio Piranga entre 2012 a 2020.





— Limite CONAMA 357 p/ corpos d'água Classe 2
 - - - - LQ = Limite de quantificação do método analítico