

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO RIO PARAOPEBA APÓS LANÇAMENTO DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO

Izabelly Capillé Beloto

DOURADOS

2019

Izabelly Capillé Beloto

DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO RIO PARAPEBA APÓS LANÇAMENTO DE
REJEITOS DE MINERAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia, da Universidade
Federal da Grande Dourados como requisito
para obtenção do título de bacharel em
Engenharia Civil.

Orientação: Profª Drª Lôide Angelini Sobrinha

DOURADOS

2019

DIAGNÓSTICO DA SITUAÇÃO DO RIO PARAOPEBA APÓS LANÇAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO

Izabelly Capillé Beloto¹, Lôide Angelini Sobrinha²
izabellybeloto19@gmail.com¹; loidesobrinha@ufgd.edu.br²;

RESUMO – Este trabalho apresenta um breve diagnóstico da situação do Rio Paraopeba após o rompimento da barragem de rejeitos de minério do Córrego do Feijão em 25/01/2019. Os dados de monitoramento utilizados para compor este diagnóstico foram obtidos do conjunto dos documentos do Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais e SOS Mata Atlântica. Analisou-se 5 parâmetros de qualidade da água: temperatura, pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e turbidez, além da concentração de metais na água. A análise final dos dados obtidos demonstrou que as águas da Bacia do Rio Paraopeba encontram-se inapropriadas para o uso, principalmente pelos altos níveis de turbidez no período de cheia. Apesar dos níveis de OD não apresentarem desconformidade com os limites previstos pela legislação, este parâmetro responde lentamente às cargas poluidoras. Contudo, a presença de sedimentos e metais no leito do rio, altera as condições básicas de fluxo do rio responsáveis pelos processos ecossistêmicos.

Palavras-chave: Qualidade da água, rejeitos de mineração, Bacia do rio Paraopeba.

ABSTRACT – This paper presents a brief diagnosis of the Paraopeba River situation after the rupture of the Feijão Stream ore tailings dam on 01/25/2019. The monitoring data used to compose this diagnosis were obtained from the set of documents from Mining Institute of water management, Mineral Resources Research Company and SOS Mata Atlantica. Five water quality parameters were analyzed: temperature, pH, electrical conductivity, dissolved oxygen and turbidity, as well as the concentration of metals in the water. The final analysis of obtained data showed that the waters of the Paraopeba river basin are inappropriate for use, especially due, to the high levels of turbidity in the flood period. Although the DO levels do not conform to the legal limits, this parameter responds slowly to the polluting load. However, the presence of sediments and metals in the riverbed alters the basic conditions of river flow responsible for ecosystem processes.

Keywords: Water quality, mining tailings, Paraopeba River Basin.

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos 5 mil anos, as barragens têm sido estruturas utilizadas para suprir a necessidade de água para consumo humano (CBDB, 2013). As barragens permitiam a coleta e o armazenamento de água em períodos de estiagem. Além de promover o armazenamento de água para a população (CBDB, 2013), pode ser destinada para outras finalidades, tais como contenção de rejeitos de mineração, energia hidrelétrica, navegação e irrigação.

Etimologicamente, o termo barragem provém da palavra francesa *barrage*, do século XII, que significa “travessa, tranca de fechar a porta” (CBDB, 2013). As barragens podem ser definidas como construções que possuem o objetivo de conter e regular o curso d’água, líquidos, detritos e rejeitos, afim de formar um reservatório para armazenamento ou controle. Pelo fato de formarem reservatórios, essas construções podem gerar danos extremos, caso sejam mal executadas e não apresentem fiscalização adequada (LACAZ, PORTO e PINHEIRO, 2017).

Segundo o Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2018), contenção de rejeitos de mineração é o principal uso das barragens no Brasil. A mineração oferece importantes contribuições políticas, econômicas e sociais para o país (MACHADO, 2007). Porém oferecem risco iminente para o meio ambiente, principalmente na contaminação da água. Por essa razão, é de suma relevância o estudo do impacto causado sobre os recursos hídricos devido ao rompimento de barragens de contenção de rejeitos no Brasil.

O rompimento de barragens é considerado recorrente na história da humanidade (ESDHC, 2015). Desde os anos 2000, pesquisadores e movimentos sociais alertam para os possíveis impactos ambientais que o aumento do extrativismo mineral pode causar (MILANEZ et al, 2015). Com o crescimento exponencial da produção de minério entre os anos de 2003 e 2013, o Brasil tornou-se o segundo país que mais exportou minério (MILANEZ et al, 2015). Em 2011, o preço do minério entrou em declínio, o que resultou no aumento da produção e queda nos custos. Condição esta, que apesar de outras circunstâncias econômicas, resultou no aumento do rompimento de barragens (MILANEZ et al, 2015).

De acordo com a organização *World Information Service on Energy (Wise)*, aconteceram no mundo, ao longo dos últimos 50 anos, pelo menos 37 desastres de barragens de mineração considerados graves (*apud* FREITAS; SILVA e MENEZES, 2016). Nos últimos 15 anos, o estado de Minas Gerais presenciou 6 rompimentos de barragens de minério de ferro, sendo o rompimento da barragem do Córrego do Feijão (Brumadinho, MG) o último desastre ocorrido.

O rompimento da barragem de rejeitos da mineradora Vale, no complexo minerário do Córrego do Feijão (Brumadinho, MG) despejou 12 toneladas de rejeitos de minério no Rio Paraopeba, no dia 25 de janeiro de 2019 (G1 MINAS, 2019). O Rio Paraopeba era responsável por 43% do abastecimento público da região de Belo Horizonte (COPASA, 2019). Após o acontecimento, o Rio perdeu a condição de importante manancial de abastecimento público e a área atingida foi drasticamente devastada (SOS, 2019).

O Rio Paraopeba é um dos afluentes do Rio São Francisco. Pressupõem-se que toda a lama “dilua” antes de chegar ao rio São Francisco (MINAS, 2019). Logo, faz-se necessário estudos que confirmem tal suposição.

Alguns trabalhos sobre a análise do rompimento de barragens de rejeito de mineração já foram feitos pelo mundo (BROWN, 2012; ESDHC, 2015). Contudo, no geral, eles retratam apenas os motivos da ocorrência de um rompimento e não o impacto causado pelo rompimento (AZAM, 2010; RICO et al., 2008).

Em virtude disso, o objetivo do presente trabalho foi a análise da qualidade da água do rio Paraopeba após o lançamento de rejeitos de mineração decorrente do rompimento da Barragem Córrego do Feijão em Brumadinho, em Minas Gerais.

2 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

2.1 QUALIDADE DA ÁGUA E IMPACTOS DO LANÇAMENTO DE EFLUENTES

O equilíbrio do ecossistema aquático possui forte contribuição para a qualidade da água, pois determina às condições ideais para a reprodução dos organismos aquáticos e de toda a teia trófica da bacia (BRAGA et al, 2005). A qualidade da água é resultante de fenômenos naturais e da ação do homem no ambiente (VON SPERLING, 2000). Nesse contexto a correta identificação dos efeitos das ações antropogênicas sobre os sistemas biológicos é fundamental, principalmente para distinguir as variações naturais que ocorrem durante as estações do ano, das alterações provocadas pelo homem (CAIRNS et al, 1993).

Logo, a qualidade da água é determinada através do Índice de Qualidade das Águas (IQA) que permite levar em consideração o uso deste recurso a partir de um cálculo feito da medição de parâmetros biológicos e físico-químicos, tais como: Oxigênio Dissolvido (OD), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), potencial hidrogeniônico (pH), concentração de nutrientes e coliformes totais (CT) (EMBRAPA, 2014).

O IQA é calculado conforme a seguinte expressão:

$$IQA = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2.1)$$

Onde, o IQA é o Índice de Qualidade de Águas, q_i é o valor do parâmetro, w_i é o peso atribuído a cada parâmetro e n é o número de parâmetros a serem avaliados.

Ao analisar parâmetros físico-químicos observa-se as seguintes características básicas: temperatura, turbidez, sólidos totais, pH e OD. A temperatura superficial pode ser influenciada por fatores locais, tais como a altitude, latitude e profundidade (CETESB, 2018). Pelo fato de desempenhar um papel crucial no meio aquático, a temperatura é responsável pela influência das variáveis físico-químicos (CETESB, 2018). Além disso, em conjunto com a pressão, são os dois principais fatores que controlam diretamente a concentração de OD (EMBRAPA, 2014).

Outro fator importante é a turbidez que é o grau de atenuação de intensidade da luz, devido a presença dos sólidos em suspensão, tais como partículas inorgânicas (CETESB, 2018). Ao analisar as consequências da atividade minerária, em que o aumento da turbidez é excessivo, tem-se a redução da fotossíntese da vegetação, suprimindo a produtividade dos peixes. Segundo Abdel-Baki et al (2011), os peixes podem ser utilizados como organismos indicadores de qualidade ambiental, principalmente quando a turbidez é causada por metais pesados.

Quanto aos sólidos, estes são classificados em sólidos voláteis (matéria orgânica) e sólidos fixos (matéria inorgânica). Ambos podem causar danos aos peixes e a vida aquática em geral. Ao se sedimentar no leito dos rios, danificam a desova dos peixes e os organismos que oferecem alimento. Além disso, os sólidos podem reter bactérias e resíduos orgânicos promovendo a decomposição anaeróbia (CETESB, 2018).

Ao analisar parâmetros químicos tem-se principalmente as seguintes características de estudo: pH, OD, nitrogênio e fósforo. O pH por estar presente no equilíbrio químico ocorre naturalmente ou em processos de tratamento de água. Por sua vez, é um parâmetro importante no saneamento ambiental, pois em determinadas condições atua na precipitação química (VON SPERLING, 2014). Contudo, o OD é um dos constituintes mais importantes dos recursos hídricos, por estar diretamente relacionado com os tipos de organismos que sobrevivem em um corpo d'água (BRAGA et al, 2005). Presentes na água sob várias formas, o nitrogênio e o fósforo causam o processo de eutrofização quando encontram-se dissolvidos em excesso no meio (VON SPERLING, 2014).

Por fim, os parâmetros biológicos dizem respeito a quantidade e a diversidade de espécies presentes no meio aquático, que variam conforme a transparência da água, nutrientes disponíveis e fatores físicos (BRAGA et al, 2005). Os microrganismos constituintes dos coliformes totais (CT) desempenham diversas funções importantes ao analisar este parâmetro, sendo responsáveis pela transformação da matéria dentro dos

ciclos biogeoquímicos e um importante indicador da presença de microrganismos patogênicos na água (VON SPERLING, 2000).

2.2 INTERAÇÕES BIOLÓGICAS NO MEIO AQUÁTICO

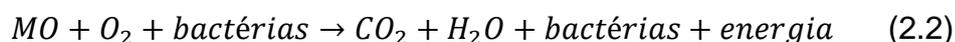
Segundo Braga et al (2002), a poluição da água é a alteração das características devido as ações e interferências de origem natural ou humana. Essas alterações são responsáveis por criar impactos ecológicos, estéticos e fisiológicos. Porém, somente alterações estéticas não podem ser levadas em consideração, pois é a partir do estudo do corpo receptor, com o uso de ferramentas técnicas específicas, que é possível quantificar e qualificar tal alteração.

Para compreender as interações biológicas no meio aquático, tem-se que a concentração de oxigênio dissolvido (OD) na água ocorre em função das características do despejo, do corpo d'água e da produção de oxigênio. Dentre tantas variáveis, as características do despejo estão fortemente associadas com o consumo de OD do meio, sendo considerado a facilidade de biodegradação, a quantidade de poluente despejado e a vazão despejada (BRAGA et al, 2002).

As características do corpo d'água determinam também com que facilidade as cargas poluidoras serão misturadas ao meio, entrando em questão a velocidade do fluido, a geometria do escoamento e a intensidade de difusão. Por fim, a produção de oxigênio é uma das variáveis mais relevantes, pois a atividade fotossintética (produção endógena) e a reaeração (produção exógena) consiste no ciclo de passagem do oxigênio atmosférico para o meio aquático (VON SPERLING, 2014).

Sendo um parâmetro importante para a avaliação da qualidade de um corpo d'água, a concentração de OD permite indicar a condição do corpo receptor ao lançamento de cargas pontuais ou difusas (CETESB, 2018). Baixos níveis de OD, geram altos níveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO_5) e vice-versa. Em outras palavras, a DBO_5 é correspondente ao oxigênio consumido pelos organismos decompositores aeróbios para que seja feita a completa decomposição da matéria orgânica lançada na água, considerado um indicador de qualidade da água (BRAGA et al, 2002).

O consumo de OD deve-se a respiração, principalmente, das bactérias heterotróficas aeróbias, resultando na equação simplificada de estabilização da matéria orgânica:



Na presença de oxigênio, as bactérias convertem a matéria orgânica (MO) em compostos simples e estáveis. Enquanto houver alimento e oxigênio disponível, as bactérias tendem a crescer e se reproduzir no meio, sendo que o consumo da MO e do OD pelas bactérias resulta em compostos como o gás carbônico, água e energia, conforme Equação 1.1. Pelo fato, da matéria orgânica ter sido convertida em gás carbônico, a reação acima pode ser chamada de *reação de oxidação* (VON SPERLING, 2014).

Após concluírem a etapa de oxidação, os organismos decompositores estabilizam ou mineralizam a MO. Porém, a matéria orgânica que se sedimentou, forma o chamado lodo de fundo, que também necessita ser convertido. Em virtude da dificuldade de penetração do oxigênio na camada de lodo, grande parte da conversão da matéria orgânica ocorre sob condições anaeróbicas. No entanto, a camada superior de lodo, ainda possui acesso ao oxigênio da massa líquida sobrenadante, o que resulta na remoção de DBO e no consumo de oxigênio (VON SPERLING, 2014). Logo, esse processo recebe o nome de *d demanda bentônica* ou *d demanda de oxigênio pelo sedimento*, onde alguns subprodutos parciais da decomposição anaeróbia dissolvem-se e difundem-se, exercendo demanda de oxigênio (VON SPERLING, 2014).

A sedimentação da matéria orgânica pode implicar na diminuição da DBO da massa líquida, mas com a ressuspensão da massa decantada, devido turbulências ou altas velocidades de escoamento, ocorre o inverso (ANDRADE, 2010). Com isso, tem-se o chamado revolvimento da camada de lodo.

2.2 REJEITOS DE MINERAÇÃO

Segundo Araújo (2006) e Machado (2007), os rejeitos são partículas resultantes de processos de beneficiamento dos minérios visando extrair os elementos de interesse econômico, de forma que seu descarte não comprometa o meio ambiente. Sua constituição é definida pela presença de sólidos e uma fração líquida, com concentração de 30% a 50% em peso (ARAÚJO, 2006). Assim, os rejeitos podem variar de materiais arenosos não plásticos, sendo os rejeitos granulares, até solos com alta plasticidade e granulometria mais fina, como as lamas (VALE, 2019).

Nesse contexto, os rejeitos de minério de ferro são formados por partículas ultrafinas contendo Ferro, Alumina, Fósforo e Sílica, sendo classificados de acordo com a granulometria (VALE, 2019). Porém, a mineração é uma das atividades que também libera metais potencialmente tóxicos, pois consiste em uma atividade que rompe com o equilíbrio geoquímico natural (SALOMONS, 1995).

Os metais pesados conferem elevada resistência à degradação química, física e biológica, possibilitando a persistência por longos períodos de tempo no meio aquático (MORAES; JORDÃO, 2002). Logo, ao persistir no ambiente aquático, os metais pesados causam forte impacto na estabilidade dos ecossistemas, provocando efeitos adversos nos seres humanos, além de causar a mortalidade de peixes e das comunidades bentônicas, perifíticas, planctônica, nectônica e de seres fotossintetizantes (MORAES; JORDÃO, 2002; SAMPAIO, 2003).

Por ser altamente reativos e apresentar facilidade ao se ligar a outros elementos químicos, os metais pesados não encontram-se independentes no meio aquático. Nesse contexto, a poluição gerada pelos metais pesados possui forte contribuição dos sedimentos de fundo. Ao refletir na quantidade disponível no ambiente, também são usados para detectar a presença de contaminantes que não permanecem solúveis. Assim, as propriedades de acúmulo de sedimentos aliadas aos metais pesados disponíveis são de extrema importância para qualificar os efeitos da contaminação em estudos de impacto ambiental (SAMPALIO, 2003).

2.4 LEGISLAÇÃO CONAMA 357 E 430

Os padrões de qualidade da água demonstram de forma generalizada e conceitual a propriedade desejada a este recurso. Logo, objetivando a proteção ambiental e a saúde pública, as resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) 357 e 430 estabelecem padrões de lançamento e qualidade do corpo receptor.

A resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011, dispõem sobre parâmetros, padrões, condições e diretrizes para a gestão de efluentes lançados nos corpos d'água (BRASIL, 2011). Esta resolução complementa e altera a resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005, que dispõem as diretrizes e classificações ambientais para o enquadramento das águas superficiais (CERON, 2012).

Atualmente a Resolução nº357/05 do CONAMA, extinta Resolução CONAMA nº 020/86, define o nível de qualidade a ser alcançado e mantido por uma bacia. Nos limites para os parâmetros físicos, químicos e biológicos, o Rio Paraopeba que foi estudado no presente trabalho, possui enquadramento classe 2 segundo a norma. Assim, segundo a norma, as águas do rio Paraopeba são destinadas para abastecimento humano (após tratamento convencional), proteção de comunidades aquáticas, recreação de contato primário (segundo Resolução CONAMA nº274 de 2000), irrigação, aquicultura e pesca.

Porém, a classificação dos parâmetros de qualidade para os rios de Classe 2 é o mesmo adotado para rios de Classe 1. Os respectivos valores de parâmetros de qualidade constam na Tabela 1, onde para o pH os valores apresentados correspondem aos limites inferiores e superiores da faixa de referência. Para OD e DBO o valor apresentado corresponde ao valor mínimo de referência estabelecido para o parâmetro.

Tabela 1- Parâmetros de qualidade da água conforme Resolução CONAMA nº357/05 para rios de Classe 2.

PARÂMETRO	UNIDADE	VALOR
pH	-	6,0 - 9,0
Turbidez	NTU	100
Oxigênio dissolvido (OD)	mg L ⁻¹	5
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	mg L ⁻¹	5

Fonte: adaptado CONAMA, 2005.

Para o lançamento de efluentes a temperatura máxima para corpos d'água é de 40°C. A legislação apresenta normatização restrita às águas de efluentes, devido à alta sazonalidade anual e diária no ambiente natural (MAIA, 2017). Os efluentes atendem condições específicas. Além dos parâmetros apresentados anteriormente, a Resolução nº430/11 apresenta limites máximos para elementos químicos dissolvidos na água, conforme a Tabela 2.

Tabela 2- Concentrações máximas de alguns elementos químicos conforme Resolução CONAMA nº430/11 para rios de Classe 2.

ELEMENTO QUÍMICO	VALOR MÁXIMO (µg/l)
Ferro (Fe)	300
Manganês (Mn)	100
Cromo (Cr)	50
Cobre (Cu)	9

Fonte: adaptado CONAMA, 2011.

3 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida por esta pesquisa baseia-se na utilização de dados de pesquisas exploratórias e bibliográficas sobre a qualidade da água do rio Paraopeba a montante e a jusante do lançamento do rejeito de mineração ocorrido em função do rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão em Minas Gerais.

A partir da área de estudo delimitada próxima as estações fluviométricas do Rio Paraopeba e dos parâmetros físicos, químicos e biológicos, obtidos pelas análises

apresentadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN) operada pela Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM), foram feitas avaliações e o diagnóstico da situação das águas do Rio Paraopeba de acordo com legislação ambiental vigente (CONAMA).

A escolha das estações fluviométricas de Alberto Flores- 40740000, Ponte Nova do Paraopeba- 40800001 e Ponte da Taquara- 40850000 da RHN foram fundamentais para a pesquisa deste trabalho. A RHN disponibilizou dados de nível e de vazão diários. As vazões diárias eram obtidas através de medições feitas com o uso de molinetes, equipamentos acústicos (SONTEK M9 e RDI RiverRay) e curvas chaves. Estabelecidas a partir de medições de vazão realizadas 3 a 4 vezes por ano durante as visitas de inspeção realizadas pelo CPRM. Além disso, a partir destas medições, eram feitas análises de 5 parâmetros de qualidade da água: temperatura da água do rio, pH do meio, oxigênio dissolvido, turbidez e condutividade elétrica. Estas análises eram feitas *in loco* pela equipe do CPRM, com o uso de sonda multiparamétrica YSI EXO1 e Hydrolab MS5.

Apesar do ponto de monitoramento de Mário Campos ser o único dentre os escolhidos que não era uma estação fluviométrica antes da ruptura da barragem, este ponto atua na realização de medições de descarga líquida e sólida pelo CPRM. As medições de descarga sólida em suspensão eram obtidas a partir da coleta de amostras 2D (2 dimensões) pela equipe do CPRM. Utilizou-se amostradores tipo USBM-54 e Van Veen, para a determinação da concentração de sedimentos, permitindo o acompanhamento do avanço do rejeito ao longo da bacia.

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo corresponde a bacia do Rio Paraopeba, localizada na região central de Minas Gerais e que possui uma área de 12.054 km² (2,5% da área total de MG) e 510 km de extensão do curso principal (IGAM, 2013). O rio abrange cerca de 48 municípios, sendo 35 municípios sedes na bacia (CBHSF, 2019). Possui sua nascente localizada ao sul no município de Cristiano Ottoni e sua foz na represa de Três Marias, no município de Felixlândia, em Minas Gerais (CBHSF, 2019). Além disso, o rio é responsável por 43% do abastecimento público da região metropolitana de Belo Horizonte (COPASA, 2019).

A bacia do Rio Paraopeba possui área de drenagem de 13.640 km², sendo que a montante do ribeirão Ferro Carvão, local onde houve a ruptura da barragem, possui área de drenagem em torno de 4.000 km² (CPRM, 2019). Afluente pela margem direita do rio Paraopeba, o ribeirão Ferro Carvão possui bacia de área 32,8 km² e vazão em torno de 600 L/s, obtida por regionalização de vazões (CPRM, 2019).

Segundo a Vale, os rejeitos dispostos na barragem, de alteamento à montante, ocupavam um volume de aproximadamente 11,7 milhões de m³. A barragem atingiu sua elevação máxima em meados de 2013 e deixou de receber rejeitos em 2016. A CPRM com a utilização de imagens de satélite delimitou que a área atingida foi de 3,1 km² pelo rejeito na bacia do ribeirão Ferro Carvão. A Figura 1 mostra a área atingida pela ruptura da barragem, deixando o ribeirão e todo o entorno da área devastados.

Figura 1: Área da barragem da Mina do Ribeirão do Feijão após a ruptura da barragem B1.



Fonte: Google Earth, 2019.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DAS REDES DE MONITORAMENTO DA CPRM

As estações fluviométricas escolhidas para o presente trabalho foram definidas com base no estudo e monitoramento do Rio Paraopeba, realizados no período de 26/01 até 31/03 do ano de 2019, pelo CPRM. Logo, escolheu-se os pontos de monitoramento representados na Quadro 1.

Quadro 1: Pontos de monitoramento da bacia do rio Paraopeba.

CÓDIGO	ESTAÇÃO FLUVIOMÉTRICA	ÁREA (km ²)	LAT.	LONG.	DIST. DA BARRAGEM
40740000	Alberto Flores	3945	- 20:09:45	-044:09:38	1km a montante
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	5680	-19:56:57	-044:18:19	57 km
40850000	Ponte Taquará	8720	-19:25:23	-044:32:58	176 km
-	Mário Campos	-	-20:03:11	-044:11:48	29 km

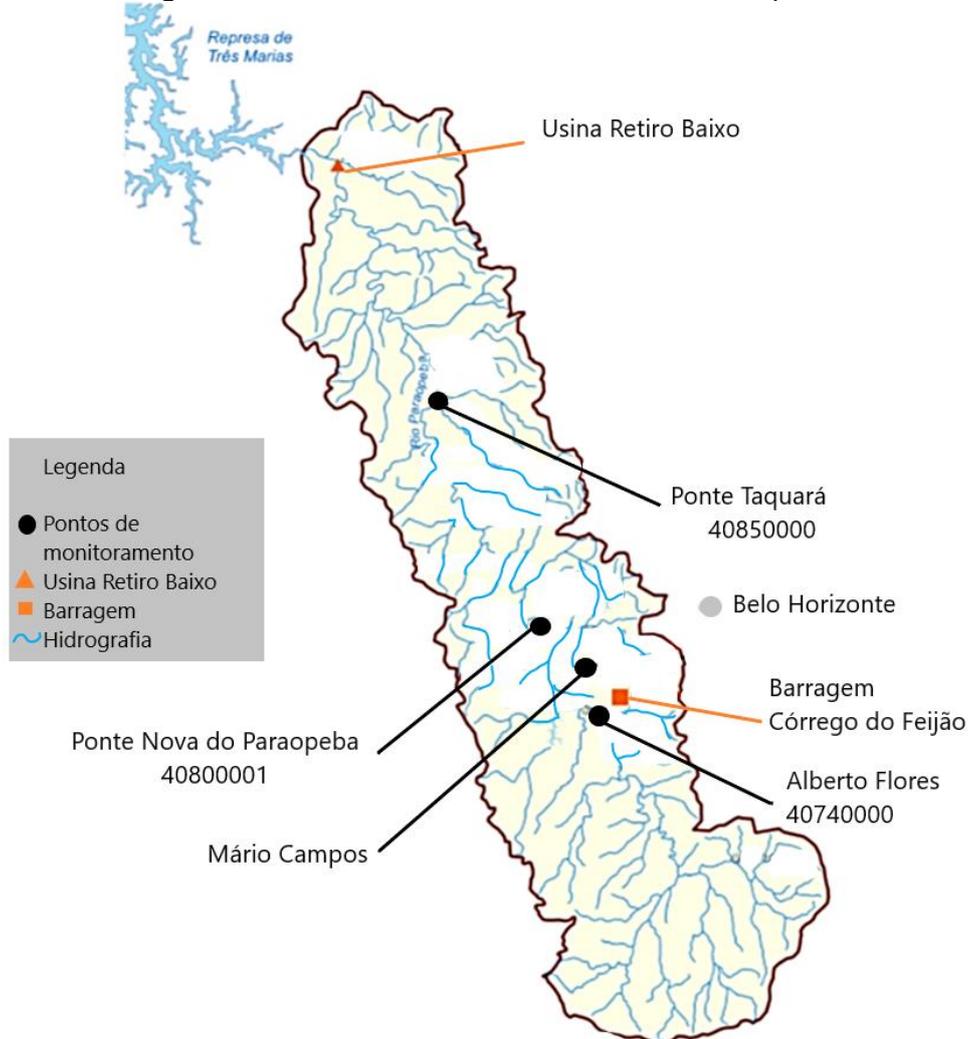
Fonte: adaptado CPRM,2019.

A CPRM com a participação de órgãos públicos, promoveram os monitoramentos diários de nível, vazão, descarga sólida e granulometria do material em suspensão. A estação fluviométrica de Alberto Flores situa-se a montante da confluência com o Ribeirão Ferro Carvão, enquanto os demais pontos de monitoramento situam-se a jusante da

confluência. Essa escolha permitiu acompanhar por meio dos monitoramentos o avanço da pluma de rejeitos na bacia do rio Paraopeba.

A Figura 2 mostra a localidade dos pontos de monitoramento ao longo do rio Paraopeba.

Figura 2: Pontos de monitoramento do rio Paraopeba.

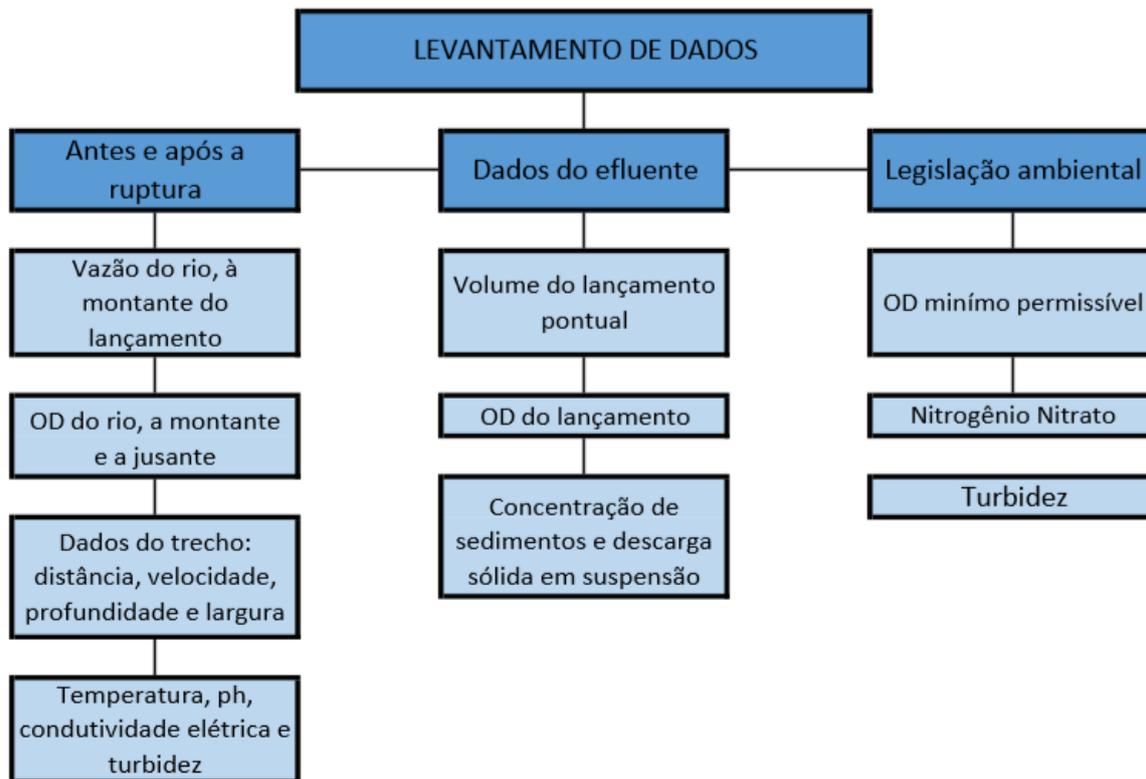


Fonte: Adaptado CPRM,2019.

3.3 DADOS DE ESTUDO

O levantamento das características do rio à montante e a jusante do lançamento em conjunto com os dados do efluente lançado são fundamentais para o início do estudo de diagnóstico da qualidade da água do Rio Paraopeba. A partir desses dados é possível com base nos limites estabelecidos pela legislação, estabelecer avaliações. Os dados necessários ao estudo são apresentados na Figura 3.

Figura 3- Metodologia de levantamento de dados para o estudo da bacia do rio Paraopeba.



Fonte: Autoria própria, 2019.

Logo, considerando que a montante da confluência com Ribeirão Ferro Carvão, está situada a estação fluviométrica de Alberto Flores pertencente a RHN, verifica-se que a vazão do rio obtida nesse ponto antes da ruptura é a $Q_{7,10}$ (vazão mínima com período de retorno de 10 anos e duração de 7 dias consecutivos) de $12,4 \text{ m}^3/\text{s}$. Considerando que a jusante da ruptura da barragem de rejeitos está a estação fluviométrica de Ponte Nova do Paraopeba pertencente também a RHN, a vazão obtida antes da ruptura é a $Q_{7,10}$ de $15,4 \text{ m}^3/\text{s}$ (CPRM, 2019).

A vazão contribui em larga escala para a morfologia e hidrografia do rio. Em períodos de grande descarga (período de cheia), não há distinção entre áreas de remanso e de correnteza, havendo pouca retenção de água (EMBRAPA, 2004).

Quanto ao levantamento de dados do rejeito, sabe-se que o volume ocupado era de $11,7 \text{ m}^3$ (VALE, 2019). O relatório final da composição do rejeito ainda não foi divulgado, mas sabe-se que existe uma toxicidade química, semelhante a composição da lama do rompimento da barragem de Mariana em 2015 (ESTADO DE MINAS, 2019).

Além do monitoramento realizado pelo CPRM, o IGAM (Instituto Mineiro de Gestão das Águas) composto de 8 pontos de monitoramento gerou dados de parâmetros de qualidade da água referentes a série histórica entre os anos de 2000 a 2018, com o objetivo de propiciar uma análise comparativa entre a qualidade da antes e após a ruptura da barragem.

Outra fonte de dados utilizada no presente trabalho, dizem respeito as medições realizadas pela equipe técnica da Fundação SOS Mata Atlântica que acompanhou o deslocamento da onda de rejeitos sobre 305 km do rio Paraopeba do dia 31 de janeiro de 2019 até o dia 9 de fevereiro do mesmo ano. O impacto dos rejeitos sobre a qualidade da água foi medido em 22 pontos de monitoramento, de 2 formas, sendo: a partir de amostras de superfície com medições realizadas a 30 cm da lâmina d'água e por coluna d'água, a partir de 2m de profundidade (SOS, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O dano ambiental na bacia do rio Paraopeba ocorreu no período da piracema, que teve início em novembro e teve fim em fevereiro (SOS, 2019). O volume de rejeitos lançados na região, principalmente a grande quantidade de sólidos em suspensão, deixou a água com cor intensa e turbidez elevada. A Tabela 3 apresenta os valores máximos e mínimos de 5 parâmetros da qualidade da água obtidos pelo monitoramento das estações fluviométricas e do ponto de monitoramento de Mário Campos, pertencentes a RHN, antes e depois da ruptura da barragem de Córrego do Feijão.

Tabela 3: Parâmetros de qualidade da água antes e depois da ruptura da barragem de Córrego do Feijão com base nos dados das medições da CPRM (2019).

QUALIDADE DA ÁGUA DO RIO PARAOPEBA NOS PONTOS DE MONITORAMENTO								
PARÂMETROS	CONAMA	VALORES	ANTES DA RUPTURA: série histórica (2000 a 2018)			DEPOIS DA RUPTURA: 26/01 a 31/03		
			Alberto Flores	Ponte Nova do Paraopeba	Ponte Taquará	Mário Campos	Ponte Nova do Paraopeba	Ponte Taquará
Temperatura da água (C°)	40	Máx.	26,50	27,50	26,90	31,20	29,70	30,70
		Mín.	15,10	17,00	17,00	23,00	23,70	24,60
OD (mg/L)	5	Máx.	9,70	9,71	9,14	8,20	7,68	7,80
		Mín.	7,14	3,60	4,75	6,25	5,33	5,29
pH	6,0 - 9,0	Máx.	8,23	8,23	8,14	7,82	7,37	7,66
		Mín.	6,07	6,07	6,75	6,08	6,61	6,52
Condutividade elétrica (µs/cm)	-	Máx.	128,10	161,00	156,90	127,00	130,70	130,60
		Mín.	43,80	24,20	36,50	29,40	73,70	47,70
Turbidez (NTU)	100	Máx.	764,00	750,00	381,00	21031,20	13264,50	1681,90
		Mín.	4,40	2,10	2,90	366,40	19,70	11,40

Fonte: Autoria própria, 2019.

Obs: Todos os dados encontrados antes da ruptura são compatíveis com os registrados na série histórica de 2002 a 2018 das estações fluviométricas, exceto os valores para turbidez de 2013 a 2018 (CPRM, 2019).

De modo geral, o rio Paraopeba encontra-se gravemente afetado entre 30 a 60 km de distância da barragem. O aumento da temperatura após a ruptura da barragem é justificado pelo lançamento de despejos de rejeitos de mineração na bacia do rio. O ponto de monitoramento de Mário Campos apresentou a maior temperatura da água, atingindo um valor superior a 30°C. Em geral, à medida que a temperatura aumenta, a taxa de reações químicas e biológicas sofrem aumento (VON SPERLING, 2000).

A variação de temperatura é responsável por aumentar a taxa das reações químicas e biológicas um dos principais fatores de controle direto da concentração de OD na água (EMBRAPA, 2004). Com a elevação da temperatura ocorre o aumento da taxa em que os nutrientes aderidos aos sólidos suspensos são convertidos em formas solúveis.

Porém após a ruptura da barragem, a faixa de concentração de OD apresentou queda, em termos médios, de 8,06% para os 3 pontos de monitoramento apresentados na Tabela 3. O valor mínimo obtido foi de 5,29 mg/L na estação fluviométrica da Ponte Taquara. Os valores estão em conformidade com os limites previstos para os rios de classe 2, que segundo a Resolução Conama 357/2005 deve ser maior que 5 mg/L.

O mesmo aplica-se para os índices de pH, que em termos médios apresentou queda de 1,37%. O pH possui efeito indireto sobre a precipitação de elementos químicos tóxicos, como os metais pesados (EMBRAPA, 2004). Apesar dos índices analisados estarem compatíveis com o limite de 6 a 9 para rios de Classe 2, os valores após a ruptura estão na faixa de 6 a 8. Para que ocorra a precipitação química de metais pesados, o ideal é que o pH do meio seja elevado, ou seja, superior a 7,0 (EMBRAPA, 2004). Conforme o pH aumenta, ocorre o aumento da concentração de complexos dos quais substituem as moléculas de água por ligantes inorgânicos. Por sua vez, estas estruturas ligantes por serem maiores ou menos solúveis, dificultam o processo de troca iônica, facilitando o processo de precipitação química do metal (OUKI e KAVANNAGH, 1999).

Apesar dos índices de OD e do pH não apresentarem desconformidade com os limites da legislação, os valores de turbidez em todos os pontos de monitoramento após a ruptura superaram o limite previsto de 100 NTU, para rios de Classe 2, conforme a Resolução Conama 357/2005. No ponto de monitoramento de Mário Campos obteve-se 210 vezes o Limite Máximo Permitido (LMP) de turbidez. Ao comparar os dados antes e após a ruptura, tem-se que os valores antes ao rompimento também superaram o limite previsto.

De acordo com o Informativo especial “Avaliação da série histórica entre 2000 e 2018”, publicado pelo IGAM, em 12 de fevereiro de 2019, avaliou-se o comportamento de alguns parâmetros de qualidade da água do rio Paraopeba. Segundo a série histórica da bacia, observa-se que em períodos chuvosos, a turbidez do rio ultrapassou 18 vezes o limite legal permitido. Isso indica que para o período analisado sugere-se o aporte de sólido de origem difusa na bacia, ausência de mata ciliar no entorno e a ocorrência de processos erosivos.

A turbidez provoca nebulosidade ao rio, reduzindo a passagem dos feixes de luz na água. Esta redução dá-se por absorção e espalhamento, uma vez que as partículas que provocam turbidez na água são maiores que o comprimento de luz branca (VON SPERLING, 2000). Devido à presença de sólidos de matéria inorgânica em suspensão, oriundos da lama de rejeitos que afetou o rio, a turbidez reduz a fotossíntese da vegetação aquática e influencia drasticamente nas comunidades aquáticas, conforme a Figura 4.

Figura 4: Condição do rio Paraopeba nos trechos iniciais ao rompimento da barragem.



Fonte: REUTERS, 2019.

Os sólidos da lama sedimentam-se no leito do rio podendo até reter bactérias e resíduos orgânicos, promovendo a decomposição anaeróbia (EMBRAPA, 2004). Assim, os sólidos influenciam também na demanda de OD. Apesar do que foi verificado quanto aos níveis de OD, pode-se inferir que a lama de rejeitos ainda não se sedimentou totalmente no leito do rio, ao ponto de formar bancos de lodo. Logo, o OD é um parâmetro que responde lentamente às variações de carga de poluição (CUNHA E FERREIRA, 2019).

Além disso, outro parâmetro analisado é a condutividade elétrica. Embora não possua limite de legislação, sua análise permite verificar de forma indireta o comportamento dos eletrólitos na água, inclusive dos íons de metal (IGAM, 2019). Os valores para este

parâmetro após a ruptura variam de 29,40 a 130,70 $\mu\text{s/cm}$. Sendo que os valores antes e após a ruptura apresentam pouca variação.

Ao analisar os parâmetros antes e após a ruptura é possível calcular o IQA para cada situação. Antes do rompimento da barragem, o IQA obtido para a estação fluviométrica de Alberto Flores foi de 66 e após a ruptura o IQA obtido para o ponto de monitoramento de Mário Campos foi de 14. Ao analisar a classificação de IQA do IGAM, antes da ruptura o IQA foi bom ($70 < \text{IQA} \leq 90$), ou seja, a água apresentava condições apropriadas para o tratamento convencional visando o abastecimento público. Após a ruptura o IQA é considerado muito ruim ($\text{IQA} \leq 25$), ou seja, a água é imprópria para o tratamento convencional, sendo necessário tratamentos mais avançados.

Segundo o informativo especial de série histórica de 2000 a 2018 do IGAM (2019) citado anteriormente, especialistas apontam a presença de metais acima do que estipula a legislação ambiental para rios de Classe 2. A partir desse informativo e dos monitoramentos obtidos pela SOS Mata Atlântica, os teores de metais e de metais pesados analisados são da mesma magnitude ou inferiores aos teores máximos encontrados. As águas que recebem efluentes contendo metais pesados apresentam ao fundo concentrações elevadas de sedimento (EMBRAPA, 2004). Ao lançar lamas insolúveis contendo metais, estas sofrem transformações químicas sob a ação biológica, lançando lentamente na corrente líquida (EMBRAPA, 2004).

A presença de metais após a ruptura da barragem do Córrego do Feijão é apresentada na Tabela 4.

Tabela 4: Valores médios de concentração de metais pesados após o rompimento da barragem a partir dos monitoramentos da SOS Mata Atlântica.

PRESENÇA DE METAIS NA ÁGUA APÓS A RUPTURA		
METAIS	VALORES MÉDIOS (mg/L)	LIMITE MÁXIMO PERMITIDO (mg/L)
Ferro	6,065	0,3
Cobre	3,57	0,009
Manganês	2,145	0,1
Cromo	1,145	0,05

Fonte: Autoria própria, 2019.

A concentração de metais verificada ao longo do curso do rio Paraopeba, de acordo com o LMP determinado pela resolução CONAMA 430/2011, demonstra que toda a extensão do rio foi afetada criticamente. Para todos os metais pesados analisados tem-se concentrações médias acima do LMP. Fatores como o pH, temperatura e OD também

influenciam na mobilidade e potencialidade tóxica de vários metais (CARVALHO et al, 2016). Em consequência disso, após o lançamento de rejeitos na água estes parâmetros controlam os processos físicos- químicos de solubilidade dos metais, sendo responsáveis por influenciar na concentração e absorção pelos organismos.

Contudo, ao analisar a presença de metais na água após a ruptura, encontra-se aproximadamente 20,2 vezes o LMP para o ferro e 21,45 vezes o LMP para o manganês. Em concentrações elevadas, ambos os metais atribuem coloração avermelhada, sensação de adstringência e sabor a água. O ferro, por exemplo, aparece em águas subterrâneas devido à dissolução do minério devido a presença do gás carbônico da água. Ao entrar em contato com o ar, oxida-se, conferindo cor e sabor a água (CETESB, 2018). Em alguns casos, altas concentrações de ferro são limitantes no crescimento de algas e outras plantas (VON SPERLING, 2000).

Outro índice alarmante é a presença de cobre aproximadamente 397 vezes o LMP e a presença de cromo 22,9 vezes o LMP. Metais pesados como o cobre e cromo podem causar diversos danos aos organismos, podendo ficar disponíveis na água, até serem assimilados quimicamente ou biologicamente através de associação de estruturas orgânicas (SOS, 2019). Logo, a presença de quantidades elevadas de cobre na água pode produzir vômitos, sabor desagradável na água e uma extensa variedade de efeitos tóxicos. Já o cromo em condições elevadas pode causar problemas respiratórios e modificações hematológicas (VON SPERLING, 2000).

5 CONCLUSÃO

O dano ambiental causado após o rompimento da Barragem do Complexo do Córrego do Feijão, tornou as águas do rio Paraopeba impróprias para o consumo, pois segundo os parâmetros analisados temperatura, turbidez e valores médios de metais estão em desconformidade com os padrões da legislação vigente, exceto os parâmetros OD, pH e condutividade elétrica. Além disso, o IQA calculado após a ruptura da barragem é classificado como muito ruim, o que faz-se necessário o uso tratamentos mais avançados para o abastecimento público.

Verificou-se que o lançamento de efluentes oriundos de rejeitos de minério no rio, deteriora a qualidade da água e possui consequências prolongadas ao ecossistema aquático. Logo, o impacto causado pelo volume de rejeitos é de difícil análise, pois ao formarem misturas complexas de vários elementos químicos com a água, tornam a qualidade da água desse corpo d'água variável e de difícil previsão da capacidade de autodepuração.

O principal problema ambiental do lançamento de rejeitos na bacia do rio Paraopeba foi o acúmulo dos rejeitos de minério na calha do rio, gerando a necessidade de monitoramento constante e de técnicas de remediação. Apesar da bacia do rio Paraopeba ter um histórico de aumento dos níveis de turbidez nos meses de cheia, o impacto sobre qualidade da água após o acontecimento é crítico comparado ao histórico.

Por enquanto o dimensionamento definitivo sobre o dano ambiental é imensurável, pois os resíduos permanecerão no ambiente por tempo indeterminado. Deve se ter em mente que o rio poderá se recuperar do impacto, mas o ecossistema dificilmente voltará às condições de pré-impacto. Para isso é de suma importância que medidas efetivas de recuperação ambiental sejam adotadas, como por exemplo, a remoção de parte dos sedimentos depositados no leito do rio. Portanto, é fundamental que todos os órgãos responsáveis pela gestão dos recursos hídricos e pelas atividades minerárias serem rígidos quanto a este tipo de impacto e que cobrem com rigor medidas de recuperação do recurso hídrico.

6 RECOMENDAÇÕES

Com base nas conclusões desta pesquisa e dos questionamentos que ainda podem ser respondidos, recomenda-se aplicar um modelo de qualidade da água que leve em consideração a presença dos rejeitos de minério de ferro no leito do rio, afim de entender afundo a diversidade regional de problemas e soluções concernentes para o rompimento de barragens.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-BAKI, A. S.; DKHIL, M. A.; AL-QURAIHY, S. Bioaccumulation of some heavy metals in tilapia fish relevant to their concentration in water and sediment of Wadi Hanifah, Saudi Arabia. **African Journal of Biotechnology**, v. 10, n° 13, p. 2541-2547, 2011.

ANA- Agência Nacional de águas. Ministério do Meio Ambiente. **Relatório de Segurança de Barragens 2017**. Brasília: Cedoc, 2018. 84 p.

ANDRADE, L. N. **Autodepuração dos corpos d'água**. 2010. Dissertação-Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

ARAÚJO, C. B. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://www.coc.ufrj.br>. Acesso em: 18 out. 2019.

AZAM, Shahid; LI, Qiren. **Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years**. Geotechnical News, Canadá, v. 7, n. 3, p.50-53, summer 2010.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução a Engenharia Ambiental**. 1. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2002. 332 p.

BRAGA, Benedito et al. **Introdução a Engenharia Ambiental**. 2. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. 332 p.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

BRASIL. Resolução nº357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação de corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e de outras providências. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso: 17 ago. 2019.

BRASIL. Resolução nº430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições de padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº357, de 17 de março de 2005. **Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, 16 mai. 2011. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso: 17 ago. 2019.

BROWN, David. et al. **501 Desastres mais devastadores de todos os tempos**. 1.Ed. São Paulo: Editora Lafonte, 2012. 544 p.

CAIRNS, JR., J.; Mc CORMICK, P. V.; NIEDERLEHNER, B. R. **A proposed framework for developing indicator of ecosystem health**. Hydrobiologia, v. 263, p. 1-44, 1993.

CARVALHO, W. A.; MINCATO, R. L.; SILVA, L. A S.; Tratamento e Disposição Final de Resíduos. **Revista Tecnológica**. São Paulo, vol. 25. nº3, p.4-6. dez. 2016. Disponível em: http://abes-dn.org.br/publicacoes/rbciamb/PDFs/05-07_artigo_4_artigos96.pdf. Acesso em: 1 de nov. de 2019.

CBDB- Comitê Brasileiro de Barragens. Comitê Brasileiro de Barragens. **Apresentação das Barragens**. Rio de Janeiro. 2013. Disponível em: <http://www.cbdb.org.br/5-38/Apresenta%c3%a7%c3%a3o%20das%20Barragens>. Acesso em: 11 ago. 2019.

CBHSF- Comitê Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco. **Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba**, 2019. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/comites-de-afluentes/cbh-do-rio-paraopeba-sf3-minas-gerais/>. Acesso em: 17 ago. 2019.

CERON, L. P. Efluentes: **Resolução CONAMA 430/2011, o que mudou?**. 2012. Disponível em: <http://meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=12652&link=noticias>. Acesso em: 2 nov. 2019.

CETESB- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Fundamentos do Controle de Poluição das Águas**. 1 Ed. São Paulo: Etgd, 2018.

COPASA- Companhia de Saneamento de Minas Gerais. **Abastecimento: região Rio Paraopeba**. Minas Gerais. 2019. Disponível em: <http://www.copasa.com.br/paraopeba/>. Acesso em: 25 mar. 2019.

CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba: **Relatório 04: monitoramento hidrológico e sedimentológico julho de 2019**. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/conteudo/paraopeba/RT_04_2019.

CUNHA, C. L. N.; FERREIRA, A. P. Análise crítica por comparação entre modelos de qualidade de água aplicados em rios poluídos: contribuições à saúde, água e saneamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n°3, p.5-6, mai/jun. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522019112332>. Disponível em: http://www.scielo.br /scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522019005007102. Acesso em: 25 set. 2019.

EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Aplicação do Biomonitoramento para Avaliação da Qualidade da Água em Rios**. 1 Ed. São Paulo: Conceição, 2004. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/14518/1/documentos36.pdf>. Acesso em: 31 out. 2019.

EDSDH, Escola Superior Dom Helder Câmara. **O Rompimento de Barragens no Brasil e no Mundo: Desastres mistos ou tecnológicos?**. 2015. Disponível em: <[www. domhelder. edu.br/artigo_HRA.pdf](http://www.domhelder.edu.br/artigo_HRA.pdf)>. Acesso em: 23 mar. 2019.

FREITAS, C. M.; SILVA, M. A.; MENEZES, F. C.. **O desastre na barragem de mineração da Samarco- fratura exposta dos limites do Brasil na redução de risco de desastres**. Ciência e Cultura, São Paulo, v. 68, n. 3, p.1-12, jul. 2016. Bimestral. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0009-67252016000300010>. Acesso em: 23 mar. 2019.

G1 GLOBO MINAS (Minas Gerais). **Bombeiros e defesa civil são mobilizados para a chamada de rompimento de barragem em brumadinho na grande bh**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2019/01/25/bombeiros-e-defesa-civil-sao-mobilizados-para-chamada-de-rompimento-de-barragem-em-brumadinho-na-grande-bh.ghtml>>. Acesso em: 23 mar. 2019.

GOOGLE EARTH. Software Version Versão 9.3.97.2. 2018-2019. 2019. Disponível em: <https://earth.google.com/web/>. Acesso em: 2 set. 2019.

IGAM- Instituto Mineiro de Gestão de Águas. **Informativo Especial Avaliação da série histórica entre 2000 e 2018**: Informativo dos parâmetros de qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do Rio Paraopeba antes do desastre na barragem B1 no complexo da Mina Córrego Feijão da Mineradora Vale/SA no município de Brumadinho – Minas Gerais. Belo Horizonte.p. 18, 2019.

LACAZ, F. A. C.; PORTO, M. F. S.; PINHEIRO, T. M. M. **Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/ Samarco**. 2017. 12 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Medicina, Centro de Estudo de Saúde do Trabalhador e Ecologia Humana, Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2017.

MACHADO, W. G. F. **Monitoramento de barragens de contenção de rejeitos da mineração**. 2007. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Minas e Petróleo, Departamento de Minas e de Petróleo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MILANEZ, Bruno et al. **Antes fosse mais leve a carga: avaliação dos aspectos econômicos, políticos e sociais do desastre da Samarco/Vale/BHP em Mariana (MG)**. Belo Horizonte: PoEMAS; 2015. Disponível em: <ufjf.br/poemas/files/2014/07/PoEMAS-2015-Antes-fosse-mais-leve-a-carga-versão-final.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2019.

MINAS, Estado de. Lama de barragem matou o Rio Paraopeba, conclui estudo da SOS Mata Atlântica: **Especialista em recursos hídricos da fundação afirma que a Bacia do Paraopeba está sem condições de vida aquática e do uso da água, mas que pode voltar a viver**. 2019. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2019/02/28/interna_gerais,1034405/lama-matou-o-rio-paraopeba-conclui-estudo-da-sos-mata-atlantica.shtml>. Acesso em: 25 mar. 2019.

MORAES, D. S. L.; JORDÃO, B. Q. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista Saúde Pública**. São Paulo, v. 36, n°3, p. 2-5. mar. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-89102002000300018>. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0034-89102002000300018&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 1 nov. 2019.

Ouki, S. K.; Kavannagh, M.; Treatment of metals-contaminated wastewaters by use of natural zeolites. **Water Sci Technol**, v.39, n° 10/11, p. 115-122, mai. 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(99\)00260-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(99)00260-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0273122399002607>. Acesso em: 03 nov 2019.

REUTERS. **Situação do Rio Paraopeba dias após ruptura da barragem**. s/d. Fotografia. Disponível em: <https://br.reuters.com/article/topNews/idBRKCN1PJ1V0-OB RTP>. Acesso em: 2 nov. 2019.

RICO M. et al. **Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context**. Journal of Hazardous Materials, Espanha, v.4, n. 2/3, p. 846-852, winter 2008.

SALOMONS, W; FORSTNER, U. **Heavy metals- problems and solutions**. Berlin, Springer Verlag. 1995.

SAMPAIO, A. C. S. **Metais pesados na água e sedimentos dos rios da Bacia do Alto Paraguai**. Dissertação (Mestrado) – Curso de Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos Universidade Federal de Mato Grosso do Sul , Campo Grande, 2003.

SOS MATA ATLÂNTICA. Observando os Rios: **O retrato da qualidade da água na bacia do rio Paraopeba após o rompimento da barragem Córrego do Feijão- Minas Gerais**. 2019. Disponível em: [https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2019/02/SOSMA_ExpedicaoParaopeba_Relatorio .pdf](https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2019/02/SOSMA_ExpedicaoParaopeba_Relatorio.pdf) >. Acesso em: 25 mar. 2019.

VALE- Instituto Tecnológico Vale. **Tecnologia de Barragens e Disposição de Rejeitos**, 2019. Disponível em: <http://www.itv.org/linha-de-pesquisa/tecnologia-de-barragens-e-disposicao-de-rejeitos/>. Acesso em: 17 ago. 2019.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2000. 26-246p.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4 Ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014, 248p.