



PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA TRATAMENTO DA
INFORMAÇÃO ESPACIAL

**DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL NO ALTO,
MÉDIO E BAIXO RIO DOCE (MG) ENTRE 2008 E 2018**

Suellen Aparecida dos Santos Sobrinho

Belo Horizonte

2020

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

S237d	Santos Sobrinho, Suellen Aparecida dos Diagnóstico da qualidade da água superficial no alto, médio e baixo Rio Doce (MG) entre 2008 e 2018 / Suellen Aparecida dos Santos Sobrinho. Belo Horizonte, 2020. 282 f. : il. Orientador: João Henrique Rettore Totaro Dissertação (Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial 1. Bacias hidrográficas. 2. Doce, Rio (MG e ES) - Aspectos ambientais. 3. Água - Qualidade. 4. Turbidez da Água. 5. Análise espacial (Estatística). 6. Crescimento urbano. 7. Impacto ambiental. I. Totaro, João Henrique Rettore. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Geografia - Tratamento da Informação Espacial. III. Título. CDU: 556.51
-------	--

SUELLEN APARECIDA DOS SANTOS SOBRINHO

**DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL NO ALTO,
MÉDIO E BAIXO RIO DOCE (MG) ENTRE 2008 E 2018**

Dissertação apresentada à Pontifícia
Universidade Católica de Minas Gerais,
como parte das exigências do Programa
de Pós-Graduação em Geografia –
Tratamento da Informação Espacial,
para obtenção do título de Mestre em
Geografia.

Dr. Jarbas Lima Dias Sampaio
IGC/UFMG

Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos
PUC-Minas

Dr. João Henrique Rettore Totaro
PUC-Minas (Orientador)

Belo Horizonte, 17 de março de 2020.

“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no oceano. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.

Madre Tereza de Calcutá

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida e por todas as coisas boas que fazem parte dela e que conquistei ao longo da mesma, inclusive este mestrado.

Aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio, compreensão e dedicação em todos os sentidos ao longo desses dois anos. Foram eles que tornaram esta conquista possível e por isso sou profundamente grata. Aos meus irmãos, Denilson e Davidson, exemplos de união, companheirismo e determinação, que me ajudaram com carinho em todas as etapas dessa trajetória.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Henrique Rettore Totaro pela disponibilidade e pelo incentivo que foram fundamentais para a realização deste estudo. Saliento o apoio incondicional prestado, a forma interessada, extraordinária e pertinente como acompanhou a realização deste trabalho. As suas críticas construtivas, as discussões e reflexões foram fundamentais ao longo de todo o percurso. Não posso esquecer a sua grande contribuição para o meu crescimento como pesquisadora durante todo o tempo de mestrado. Eternamente grata por todo o apoio.

Ao membros da banca, Prof. Dr. Luiz Eduardo Panisset Travassos e Prof. Dr. Jarbas Lima Dias Sampaio, que se dispuseram a compartilhar todo o conhecimento e a sabedoria de que dispõem para enriquecer o meu trabalho.

Aos meus colegas de curso, em especial, à Carolina Cramer e ao Ewerton Ferreira, pelos conselhos, pela competência e pelos momentos compartilhados nesta jornada.

À Rima Industrial, em especial à equipe do departamento de meio ambiente, por se mostrarem exemplos de profissionais, compartilhando conhecimentos e experiências, bem como pela oportunidade e disponibilização de horas de trabalho para o desenvolvimento deste mestrado.

Por fim, ao Programa de Pós Graduação em Geografia – Tratamento da Informação Espacial (PPGG – TIE), que me proporcionou essa experiência tão construtiva para minha carreira acadêmica juntamente com o apoio da CAPES, e a todos os que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação e para realização deste trabalho.

RESUMO

A água é um bem natural essencial para manutenção da vida e indispensável, direta ou indiretamente, para o desenvolvimento de todas as atividades humanas. Ao longo das últimas décadas, presenciamos o incremento da pressão sobre os recursos hídricos em razão da demanda crescente impulsionada pelo desenvolvimento econômico, pela expansão da urbanização e pelo aumento do potencial de degradação dos recursos hídricos. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo a análise espaço-temporal da variação da qualidade da água do Rio Doce tendo em vista as possíveis influências do uso e da ocupação do solo na Bacia homônima sobre o meio natural. Os dados trabalhados referem-se aos resultados do monitoramento em doze estações controladas pelo IGAM no período de outubro de 2008 a fevereiro de 2018. Na análise em foco neste trabalho, foram considerados dois cenários distintos – anterior e posterior à ruptura do barramento de Fundão. Os dados disponíveis foram tratados em etapas sucessivas e complementares: i. análise espaço-temporal dos parâmetros físico-químicos, metais e compostos tóxicos segundo seus aspectos legais (DN COPAM/CERH N° 01/2008); ii. avaliação e classificação da qualidade da água por meio do Índice de Qualidade da Água (IQA) e do Índice de Toxicidade (IT); iii. tratamento estatístico por meio do Coeficiente de Correlação de Pearson e análise integrada dos resultados diante dos possíveis fatores causais de sua ocorrência. Os resultados obtidos permitiram concluir que diversos parâmetros físico-químicos usados na aferição da qualidade da água apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos pela legislação em todos os pontos de amostragem, tanto para o IQA quanto para o IT. O comportamento individual e conjugado das variáveis apontou claramente não apenas a presença de intervenções antrópicas variadas e em diferentes níveis de intensidade -, mas também a predisposição garantida por características e processos naturais que determinam diretamente o fluxo de materiais em solução e em suspensão ao longo do rio.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica. Qualidade da Água. Rio Doce.

ABSTRACT

Water is an essential natural asset for the maintenance of life and indispensable, directly or indirectly, for the development of all human activities. Over the past few decades, we have seen an increase in pressure on water resources due to the growing demand driven by economic development, the expansion of urbanization and the increase in the potential for degradation of water resources. In this context, this work aims to analyze the spatio-temporal variation of the Rio Doce water quality in view of the possible influences of land use and occupation in the homonymous Basin on the natural environment. The data we used refer to the results of the monitoring conducted in twelve stations controlled by IGAM from October 2008 to February 2018. In the analysis focused in this work, two different scenarios were considered - before and after the Fundão dam rupture. The available data were treated in successive and complementary stages: i. spatio-temporal analysis of physical-chemical parameters, metals and toxic compounds according to their legal aspects (DN COPAM / CERH N ° 01/2008); ii. assessment and classification of water quality through the Water Quality Index (IQA) and the Toxicity Index (IT); iii. statistical treatment using Pearson's Correlation Coefficient and integrated analysis of the results in view of the possible causal factors of their occurrence. The results obtained allowed us to conclude that several physico-chemical parameters used in the measurement of the water quality showed numbers above the limits established by the legislation in all sampling points, both for the IQA and for the IT. The individual and combined behavior of the variables clearly pointed out not only the presence of varied anthropic interventions and at different levels of intensity, but also the predisposition guaranteed by natural characteristics and processes that directly determine the flow of materials in solution and in suspension along the River. In this way, the severe need of works that focus on water resources, their quality, availability and consequent changes caused by anthropic and / or natural processes is reinforced, in the search for the sustainable use of the resource that guarantees the protection and the health of the environment and natural resources, as well as meeting human needs.

Keywords: Drainage basin. Water quality. Rio Doce

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição da água no planeta Terra.	47
Figura 2 - Fatores e indicadores ambientais que interferem na qualidade da água de uma bacia hidrográfica.....	49
Figura 3 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos	67
Figura 4 - Localização geográfica das estações de monitoramento e das hidrelétricas na calha do Rio Doce.....	71
Figura 5 – Curvas Médias de Variação da Qualidade da Água.....	76
Figura 6 – Mapa de Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Doce	82
Figura 7 – Mapa das Sub - Bacias Hidrográficas – MG/ES.....	83
Figura 8 – Mapa das Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos (UPGRH's) – Rio Doce.....	84
Figura 9 – Mapa geológico da bacia hidrográfica do Rio Doce.....	90
Figura 10 – Mapa geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio Doce.....	92
Figura 11 – Mapa hipsométrico da bacia hidrográfica do Rio Doce.	95
Figura 12 – Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Rio Doce.....	96
Figura 13 – Mapa pedológico da bacia hidrográfica do Rio Doce.	98
Figura 14 – Mapa de biomas da bacia hidrográfica do Rio Doce.	102
Figura 15 – Mapa de cobertura e uso do solo da bacia hidrográfica do Rio Doce.....	104
Figura 16 - Mapa das unidades de conservação presentes na bacia do Rio Doce.	105
Figura 17 – Mapa das principais vias de acesso da bacia hidrográfica do Rio Doce.	110
Figura 18 – Localização das barragens da Samarco.	120
Figura 19 – Perfil longitudinal do curso d'água afetado pelo rompimento da Barragem de Fundão.....	122
Figura 20 – Séries temporais do parâmetro de oxigênio dissolvido nas estações de monitoramento.....	129
Figura 21 – Séries temporais do parâmetro de pH nas estações de monitoramento.....	132
Figura 22 – Séries temporais do parâmetro de DBO nas estações de monitoramento.	135
Figura 23 – Séries temporais do parâmetro de fósforo total nas estações de monitoramento.	138
Figura 24 – Séries temporais do parâmetro de temperatura nas estações de monitoramento.....	141
Figura 25 – Séries temporais do parâmetro de sólidos totais nas estações de monitoramento.	144
Figura 26 – Séries temporais do parâmetro de turbidez nas estações de monitoramento.....	148
Figura 27 – Séries temporais do parâmetro de coliformes totais nas estações de monitoramento.	151

Figura 28 – Séries temporais do arsênio total nas estações de monitoramento.....	155
Figura 29 – Séries temporais do bário total nas estações de monitoramento.....	158
Figura 30 – Séries temporais de cádmio total nas estações de monitoramento.....	161
Figura 31 – Séries temporais de cobre dissolvido nas estações de monitoramento.	164
Figura 32 – Séries temporais de cromo total nas estações de monitoramento.	167
Figura 33 – Séries temporais de chumbo total nas estações de monitoramento.....	170
Figura 34 – Séries temporais de cianeto livre nas estações de monitoramento.....	174
Figura 35 – Séries temporais de fenóis totais nas estações de monitoramento.	177
Figura 36 – Séries temporais do manganês total nas estações de monitoramento.	180
Figura 37 – Séries temporais de mercúrio total nas estações de monitoramento.....	183
Figura 38 – Séries temporais de nitrito nas estações de monitoramento.	187
Figura 39 – Séries temporais de nitrato nas estações de monitoramento.....	188
Figura 40 – Séries temporais de nitrogênio amoniacal nas estações de monitoramento.	192
Figura 41 – Séries temporais de zinco total nas estações de monitoramento.....	195
Figura 42 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD072.	197
Figura 43 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD019.	198
Figura 44 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD023.	199
Figura 45 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD035.	200
Figura 46 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD033.	201
Figura 47 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD083.	202
Figura 48 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD044.	203
Figura 49 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD045.	204
Figura 50 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD053.	205
Figura 51 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD058.	206
Figura 52 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD059.	207
Figura 53 – Valores de IQA anual na estação de monitoramento RD067.	208
Figura 54 – Análise da correlação de Pearson dos parâmetros 'Cr' e 'Hg' no período de 2008 a 2018, na estação RD072.....	226

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Dados estatísticos de oxigênio dissolvido (mg/l) nas estações de monitoramento.	127
Quadro 2 – Dados estatísticos de pH nas estações de monitoramento.	130
Quadro 3 – Dados estatísticos de DBO nas estações de monitoramento.	133
Quadro 4 – Dados estatísticos de Fósforo Total nas estações de monitoramento.	136
Quadro 5 – Dados estatísticos de Temperatura nas estações de monitoramento.	139
Quadro 6 – Dados estatísticos de Sólidos Totais nas estações de monitoramento.	142
Quadro 7 – Dados estatísticos de Turbidez nas estações de monitoramento.	145
Quadro 8 – Dados estatísticos de Coliformes Totais nas estações de monitoramento.	150
Quadro 9 – Dados estatísticos de Arsênio Total nas estações de monitoramento.	153
Quadro 10 – Dados estatísticos de Bário Total nas estações de monitoramento.	156
Quadro 11 – Dados estatísticos de Cádmio Total nas estações de monitoramento.	159
Quadro 12 – Dados estatísticos de Cobre Dissolvido nas estações de monitoramento.	162
Quadro 13 – Dados estatísticos de Cromo Total nas estações de monitoramento.	165
Quadro 14 – Dados estatísticos de Chumbo Total nas estações de monitoramento.	168
Quadro 15 – Dados estatísticos de Cianeto Total nas estações de monitoramento.	172
Quadro 16 – Dados estatísticos de Cianeto Livre nas estações de monitoramento.	172
Quadro 17 – Dados estatísticos de Fenóis Totais nas estações de monitoramento.	175
Quadro 18 – Dados estatísticos de Manganês Total nas estações de monitoramento.	178
Quadro 19 – Dados estatísticos de Mercúrio total nas estações de monitoramento.	181
Quadro 20 – Dados estatísticos de Nitrito nas estações de monitoramento.	185
Quadro 21 – Dados estatísticos de Nitrato nas estações de monitoramento.	185
Quadro 22 – Dados estatísticos de Nitrogênio Amoniacal Total nas estações de monitoramento.	190
Quadro 23 – Dados estatísticos de Zinco Total nas estações de monitoramento.	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Interferências humanas no meio ambiente e suas consequências.	52
Tabela 2 - Estações de Monitoramento na Calha do Rio DOCE.....	70
Tabela 3 – Parâmetros de qualidade da água avaliados neste estudo.	72
Tabela 4 – Intervalos de coeficiente de correlação linear.	74
Tabela 5 – Valores e categorias de qualidade da água do IQA.....	77
Tabela 6 – Interpretação das condições por contaminação de tóxicos.	78
Tabela 7 – Principais atividades econômicas desenvolvidas na bacia hidrográfica do Rio Doce.	112
Tabela 8 – Limites máximos para o parâmetro nitrogênio amoniacal, segundo a DN Conjunta COPAM/CERH N°01/2008.	190
Tabela 9 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD072.	210
Tabela 10 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD019.	212
Tabela 11 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD023.	213
Tabela 12 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD035.	214
Tabela 13 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD033.	215
Tabela 14 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD083.	216
Tabela 15 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD044.	217
Tabela 16 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD045.	218
Tabela 17 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD053.	219
Tabela 18 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD058.	220
Tabela 19 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD059.	221
Tabela 20 – Níveis de contaminação da água do Rio Doce por tóxicos entre os anos de 2008 a 2018 – Estação de Monitoramento RD067.	222
Tabela 21 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD072, entre 2008 e 2018.....	224

Tabela 22 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e outros compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD072 durante o período de 2008 a 2018.	226
Tabela 23 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD019 no período de 2008 a 2018.	227
Tabela 24 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e outros compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD019, durante o período de 2008 a 2018.	229
Tabela 25 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD023 no período de 2008 a 2018.	230
Tabela 26 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e outros compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD023, no período de 2008 a 2018	232
Tabela 27 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD035, entre 2008 e 2018.....	233
Tabela 28 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e demais compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD035, durante o período de 2008 a 2018.	235
Tabela 29 – Correlações de Pearson entre as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD033, no período compreendido entre 2008 e 2018.	237
Tabela 30 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD033, durante o período de 2008 a 2018.....	239
Tabela 31 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD083, entre 2008 e 2018.....	241
Tabela 32 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD083, durante o período de 2008 a 2018.....	242
Tabela 33 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD044, entre período de 2008 a 2018.	244
Tabela 34 – Correlação (Pearson) entre as concentrações de metais pesados e compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD044, durante o período de 2008 a 2018.....	246
Tabela 35 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD045, entre 2008 e 2018.....	247
Tabela 36 – Correlação (Pearson) entre as concentrações dos metais pesados e compostos tóxicos analisados na estação de monitoramento RD045, durante o período de 2008 a 2018.	249
Tabela 37 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD053, entre 2008 e 2018.....	250
Tabela 38 – Correlação (Pearson) entre as concentrações dos metais pesados analisados na estação de monitoramento RD053, durante o período de 2008 a 2018.	252
Tabela 39 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD058, entre período 2008 e 2018.....	253
Tabela 40 – Correlação (Pearson) entre as concentrações dos metais pesados analisados na estação de monitoramento RD058, durante o período de 2008 a 2018.	255

Tabela 41 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD059, entre 2008 e 2018.....	257
Tabela 42 – Correlação (Pearson) entre as concentrações dos metais pesados analisados na estação de monitoramento RD059, durante o período de 2008 a 2018.	258
Tabela 43 – Correlações de Pearson ente as variáveis do IQA na estação de monitoramento RD067, entre 2008 e 2018.....	259
Tabela 44 – Correlação (Pearson) entre as concentrações dos metais pesados analisados na estação de monitoramento RD067, durante o período de 2008 a 2018.	261
Tabela 45 - Análise particular dos parâmetros de qualidade da água (IQA) antes e após o rompimento da barragem de Fundão.	265
Tabela 46 - Análise particular dos metais e compostos tóxicos (IT) na qualidade da água antes e após o rompimento da barragem de Fundão.....	266

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'sólidos totais' no período de 2008 a 2018, na estação RD072.	225
Gráfico 2 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD072.	225
Gráfico 3 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD072.	225
Gráfico 4 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018 na estação RD019.	228
Gráfico 5 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'turbidez' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018 na estação RD019.	228
Gráfico 6 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD019.	229
Gráfico 7 – Análise da correlação de Pearson dos parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD019.	229
Gráfico 8 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cu e Hg no período de 2008 a 2018, na estação RD019.	229
Gráfico 9 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD023.	231
Gráfico 10 – Análise de correlação de Pearson dos parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD023.	231
Gráfico 11 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cd no período de 2008 a 2018, na estação RD023.	232
Gráfico 12 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD023.	232
Gráfico 13 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD023.	233
Gráfico 14 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	234
Gráfico 15 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	234
Gráfico 16 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cd no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236
Gráfico 17 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236
Gráfico 18 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236
Gráfico 19 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236

Gráfico 20 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236
Gráfico 21 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD035.	236
Gráfico 22 – Análise da correlação de Pearson dos parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	238
Gráfico 23 – Análise da correlação de Pearson dos parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	238
Gráfico 24 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cd no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 25 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 26 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 27 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 28 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 29 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD033.	240
Gráfico 30 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e sólido totais no período de 2008 a 2018, na estação RD083.	241
Gráfico 31 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD083.	241
Gráfico 32 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD083.	242
Gráfico 33 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD083.	243
Gráfico 34 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD083.	243
Gráfico 35 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'sólidos totais' no período entre 2008 e 2018, na estação RD044.	244
Gráfico 36 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período entre 2008 e 2018, na estação RD044.	244
Gráfico 37 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	245
Gráfico 38 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	245
Gráfico 39 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'turbidez' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	245

Gráfico 40 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	246
Gráfico 41 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	246
Gráfico 42 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	247
Gráfico 43 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'sólidos totais' no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	248
Gráfico 44 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD044.	248
Gráfico 45 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período entre 2008 e 2018, na estação RD045.	248
Gráfico 46 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'fósforo total' no período entre 2008 e 2018, na estação RD044.	248
Gráfico 47 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD045.	249
Gráfico 48 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD045.	249
Gráfico 49 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD045.	250
Gráfico 50 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'sólidos totais' no período entre 2008 e 2018, na estação RD053.	251
Gráfico 51 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período entre 2008 e 2018, na estação RD053.	251
Gráfico 52 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'turbidez' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD053.	251
Gráfico 53 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD053.	252
Gráfico 54 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cu e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD053.	252
Gráfico 55 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cr e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD053.	253
Gráfico 56 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'sólidos totais' no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	254
Gráfico 57 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'oxigênio dissolvido' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	254
Gráfico 58 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	254
Gráfico 59 – Análise de correlação de Pearson entre os parâmetros 'turbidez' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	254

Gráfico 60 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Pb no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	256
Gráfico 61 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	256
Gráfico 62 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Pb e Cr no período de 2008 a 2018, na estação RD058.	256
Gráfico 63 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD059.	257
Gráfico 64 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD059.	257
Gráfico 65 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cd e Hg no período de 2008 a 2018, na estação RD059.	258
Gráfico 66 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cianeto Livre e Fenóis no período de 2008 a 2018, na estação RD059.	258
Gráfico 67 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'turbidez' no período de 2008 a 2018, na estação RD067.	260
Gráfico 68 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'sólidos totais' e 'fósforo total' no período de 2008 a 2018, na estação RD067.	260
Gráfico 69 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros 'turbidez' e 'fósforo total' no período compreendido entre 2008 e 2018, na estação RD067.	260
Gráfico 70 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros Cr e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD067.	261
Gráfico 71 – Análise da correlação de Pearson entre os parâmetros As e Nitrito no período de 2008 a 2018, na estação RD067.	261

LISTA DE ABREVIATURAS

ANA – Agência Nacional das Águas

APP – Área de Preservação Permanente

BHRD – Bacia Hidrográfica do Rio Doce

CBH-DOCE – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Doce

CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

COPAM – Conselho Estadual de Política Ambiental

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DN – Deliberação Normativa

EFVM – Estrada de Ferro Vitória-Minas

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

GPS – *Global Positioning System*

IAP – Índice de Qualidade da Água para fins de Abastecimento Público

IB – Índice de Balneabilidade

IBIO AGB-DOCE – Instituto BioAtlântica da Agência de Água do Doce

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICMBio – Instituto Chico Mendes de Conservação de Biodiversidade

IDE-SISEMA – Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IEF – Instituto Estadual de Florestas

IET – Índice de Estado Trófico

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

INFOHIDRO – Informações sobre Recursos Hídricos

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPEA – Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas

IQA – Índice de Qualidade da Água

IT – Índice de Toxicidade

IVA – Índice de Qualidade da Água para a Proteção da Vida Aquática

LAT. – Latitude

LONG. – Longitude

MEC – Massa Equatorial Continental

MDE – Modelo Digital de Elevação

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MTC – Massa Tropical Continental

MPA – Massa Polar Atlântica

MW – Megawatt

ONG – Organizações não Governamentais

ONU – Organização das Nações Unidas

PIRH-DOCE – Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce

RMVA – Região Metropolitana do Vale do Aço

SEMAD – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TGS – Teoria Geral dos Sistemas

UC – Unidade da Conservação

UE – Unidade de Análise

UFV – Universidade Federal de Viçosa

UHE – Usina Hidrelétrica

USGS – *United States Geological Survey*

ZEE – Zoneamento Ecológico Econômico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1 A abordagem sistêmica na Ciência e na Geografia	25
2.1.1 Abordagem sistêmica na análise das bacias hidrográficas	30
2.1.2 Abordagem sistêmica geográfica no uso de geotecnologias.....	32
2.1.3 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)	34
2.2 Contexto histórico do desenvolvimento e a relação do Homem com o uso dos recursos naturais	36
2.2.1 O avanço na mudança de consciência rumo ao desenvolvimento sustentável.....	38
2.3 Fatores relacionados aos impactos ambientais, com destaque para os recursos hídricos	41
2.4 A água como recurso natural	44
2.4.1 Aspectos ambientais.....	45
2.4.2 A água no mundo: demanda e disponibilidade	46
2.4.3 Condições naturais que influenciam a qualidade da água.....	49
2.4.4 Interferência humana na qualidade da água	51
2.4.5 Aspectos sociais	53
2.4.6 Aspectos econômicos	55
2.4.7 Aspectos institucionais	58
2.5 Monitoramento da qualidade da água.....	60
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	64
3.1 Materiais e Técnicas	65
3.2 Tratamento e análise dos dados de qualidade da água	68
3.2.1 Obtenção e sistematização dos dados de monitoramento da qualidade das águas do Rio Doce	68
3.2.2 Estações de monitoramento.....	69
3.2.3 Definição dos parâmetros adotados.....	71
3.2.4 Análise estatística dos dados e aplicação do Coeficiente de Pearson	73
3.2.5 Análise da qualidade da água pelos métodos IQA e IT	74
3.3 Dados geoespaciais	78
3.3.1 Limites municipais.....	79
3.3.2 Drenagem.....	79
3.3.3 Geologia.....	80
3.3.4 Geomorfologia	80

3.3.5	Pedologia	80
3.3.6	Vegetação e Bioma.....	81
4.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	82
4.1	Caracterização do Meio Físico.....	85
4.1.1	Geologia.....	85
4.1.2	Geomorfologia	91
4.1.3	Relevo e Topografia	94
4.1.4	Clima	96
4.1.5	Pedologia	98
4.1.6	Vegetação	102
4.2	Processo de ocupação e modificação da paisagem na Bacia do Rio Doce.....	105
4.2.1	Aspectos populacionais da Bacia do Rio Doce	110
4.2.2	Aspectos econômicos da Bacia do Rio Doce	111
4.2.3	Aspectos econômicos e sociais dos impactos ambientais na bacia do Rio Doce	113
4.2.4	Desastre na Bacia do Rio Doce – Rompimento da barragem de Fundão em Mariana/MG.....	120
5.	RESULTADOS.....	124
5.1	Avaliação dos parâmetros de qualidade da água	125
5.1.1	Oxigênio dissolvido (OD)	125
5.1.2	Potencial hidrogeniônico (pH ‘in loco’)	130
5.1.3	Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	133
5.1.4	Fósforo total (P).....	136
5.1.5	Temperatura.....	139
5.1.6	Sólidos totais	142
5.1.7	Turbidez.....	145
5.1.8	Coliformes totais	149
5.1.9	Arsênio total (As)	152
5.1.10	Bário total (Ba)	156
5.1.11	Cádmio total (Cd).....	159
5.1.12	Cobre dissolvido (Cu).....	162
5.1.13	Cromo total (Cr)	165
5.1.14	Chumbo total (Pb)	168
5.1.15	Cianeto total e Cianeto livre	171
5.1.16	Fenóis totais.....	175
5.1.17	Manganês total (Mg)	178

5.1.18	Mercúrio total (Hg).....	181
5.1.19	Nitrato e Nitrito.....	184
5.1.20	Nitrogênio amoniacal total (N).....	189
5.1.21	Zinco total (Zn)	193
5.2	Avaliação da evolução do Índice de Qualidade da Água – IQA	196
5.3	Avaliação do Índice de Toxicidade da Água – IT	209
5.4	Avaliação do Coeficiente linear de Pearson	223
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	262
	REFERÊNCIAS.....	270