

INSTITUTO FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO LATO SENSU EM EDUCAÇÃO AMBIENTAL E
SUSTENTABILIDADE

GENSWESLEY DIAS DE JESUS

**USO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS
PARÂMETROS RELEVANTES PARA COMPOSIÇÃO DE UM IQA: ESTUDO DE
CASO NA CALHA DO RIO DOCE, ESTADO DE MINAS GERAIS**

IBATIBA

2018

GENSWESLEY DIAS DE JESUS

**USO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS
PARÂMETROS RELEVANTES PARA COMPOSIÇÃO DE UM IQA: ESTUDO DE
CASO NA CALHA DO RIO DOCE, ESTADO DE MINAS GERAIS**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental e Sustentabilidade do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Ibatiba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Educação Ambiental e Sustentabilidade.

Orientador: Prof. M.e. Robson Vieira da Silva
Coorientador: Prof. M.e. Benvindo S. Gardiman Junior

IBATIBA

2018

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Ifes - Campus Ibatiba)

J585u Jesus, Genswesley Dias de, 1991-
 Usos da estatística multivariada para identificação dos parâmetros
 relevantes para composição de um IQA: estudo de caso na calha do Rio
 Doce, estado de Minas Gerais / Genswesley Dias de Jesus. – 2018.
 27 f. : Il. ; 30 cm.

 Orientador: Robson Vieira da Silva
 Coorientador: Benvindo Sirtoli Gardiman Junior
 Monografia (especialização) – Instituto Federal do Espírito Santo,
 Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental e
 Sustentabilidade, 2018.

 1. Análise multivariada. 2. Água - Qualidade. 3. Doce, Rio (MG e
 ES). 4. Degradação ambiental. 5. Recursos hídricos. 6. Instituto Federal
 do Espírito Santo. Campus Ibatiba. I. Silva, Robson Vieira da. II.
 Gardiman Junior, Benvindo Sirtoli. III. Instituto Federal do Espírito
 Santo. IV. Título.

CDD: 628.161

GENSWESLEY DIAS DE JESUS

**USO DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA PARA IDENTIFICAÇÃO DOS
PARÂMETROS RELEVANTES PARA COMPOSIÇÃO DE UM IQA: ESTUDO DE
CASO NA CALHA DO RIO DOCE, ESTADO DE MINAS GERAIS**

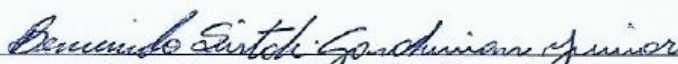
Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental e Sustentabilidade do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Ibatiba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Especialista em Educação Ambiental e Sustentabilidade.

Aprovado em: 13 de setembro de 2018.

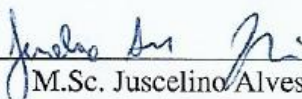
COMISSÃO EXAMINADORA



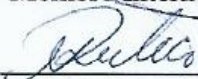
M.Sc. Robson Vieira da Silva
Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Ibatiba
Orientador



M.Sc. Benvindo Sirtoli Gardiman Junior
Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Ibatiba
Co-orientador



M.Sc. Juscelino Alves Henriques
Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Campus Ibatiba
Membro Interno



D.Sc. Mariângela Dutra de Oliveira
Instituto Federal do Espírito Santo – IFES – Campus Vitória
Membro externo

DECLARAÇÃO DE AUTORIA

Diante deste instrumento, responsabilizo-me integralmente pelo conteúdo apresentado neste trabalho de conclusão de curso ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo (Ifes) – Campus Ibatiba, estando ciente das sanções e punições legais, no que tange a cópia parcial ou total de obra intelectual, o que se configura como violação do direito autoral previsto no Código Penal Brasileiro no art.184. (*[...]§ 1º Se a violação consistir em reprodução total ou parcial, com intuito de lucro direto ou indireto, por qualquer meio ou processo, de obra intelectual, interpretação, execução ou fonograma, sem autorização expressa do autor, do artista intérprete ou executante, do produtor, conforme o caso, ou de quem os represente [...]*), estando também ciente das penalidades previstas no art.299 (*Omitir, em documento público ou particular, declaração que dele devia constar, ou nele inserir ou fazer inserir declaração falsa ou diversa da que devia ser escrita, com o fim de prejudicar direito, criar obrigação ou alterar a verdade sobre fato juridicamente relevante*) do mesmo código no que tange a falsidade ideológica.

Assim sendo e por ser verdade subscrevo-me,



Genswesley Dias de Jesus

Autor da Monografia

Ibatiba, 13 de setembro de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente glorifico a Deus por essa Pós-graduação, pois foi uma oração atendida por Ele. Aos meus orientadores, por serem tão solícitos em compartilhar seus conhecimentos, dispondo-se de seu tempo para me apoiar no aprendizado aqui adquirido. À minha noiva Ana Carolina, por ser minha companheira de todas as horas. À minha família, pelo apoio incondicional.

Um agradecimento aos colegas de curso pela amizade e incentivo. Aos professores da primeira turma do curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Educação Ambiental e Sustentabilidade do Instituto Federal do Espírito Santo – Campus Ibatiba, pelo profissionalismo em contribuir com a nossa evolução acadêmica, meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A crescente geração de efluentes e resíduos oriundos das atividades agrícolas e de mineração têm se mostrado o principal fator de degradação dos recursos hídricos. Diante dessa realidade, emprega-se a estatística multivariada para a análise de complexos conjuntos de dados envolvendo variáveis associadas, sem perdas significativas de informações e com resultados considerados altamente satisfatórios. Objetivou-se, por meio de uma pesquisa quantitativa, utilizando-se as técnicas de Análise Fatorial (AF) e de Análise das Componentes Principais (ACP), identificar as principais contribuições da degradação da qualidade da água do Rio Doce e classificar os parâmetros monitorados entre os anos de 2012 a 2017. Verificou-se que a estatística multivariada se apresentou como uma importante ferramenta para selecionar os parâmetros a serem utilizados em um novo IQA, com vistas à caracterização das peculiaridades da bacia hidrográfica examinada e à otimização de recursos no planejamento de monitoramentos hídricos, sem a perda de informações dos dados significativos. Outrossim, caracterizou-se o principal agente de degradação da qualidade da água do Rio Doce, sendo o lançamento de esgoto *in natura*, proporcionando alta carga orgânica ao curso hídrico.

Palavras-chave: Degradação hídrica. Estatística multivariada. Rio Doce. Monitoramento hídrico.

ABSTRACT

The growing generation of effluents and wastes from agricultural and mining activities has been shown to be the main factor for the degradation of water resources. In view of this reality, multivariate statistics are used for the analysis of complex data sets involving associated variables, without significant loss of information and with results considered highly satisfactory. The objective of this study was to quantify the main contributions of water quality degradation in the Doce River and to classify the parameters monitored using the Factorial Analysis (FA) and Principal Component Analysis (PCA) techniques, between 2012 and 2017. It was verified that multivariate statistics presented as an important tool to select the parameters to be used in a new IQA, with a view to the characterization of the peculiarities of the hydrographic basin examined and to the optimization of resources in the planning of water monitoring, without the loss of significant data information. Also, the main agent of water quality degradation in the Doce River was characterized, with the release of sewage in natura, providing a high organic load to the water course.

Keywords: Water degradation. Multivariate statistics. Rio Doce. Water monitoring.

LISTA DE FIGURA

Figura 1 – Delimitação da bacia do Rio Doce.....	14
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estações de monitoramento presentes na calha do Rio Doce.....	15
Tabela 2 – Parâmetros analisados pela estatística multivariada.....	15
Tabela 3 – Quantidade (Q) e percentual (%) de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água, estabelecidos pela legislação estadual	17
Tabela 4 – Média e desvio padrão dos dados, comparando os padrões da norma estadual para Classe II.....	18
Tabela 5 – Matriz de correlação	19
Tabela 6 – Componentes principais, com respectivos autovalores e variâncias	20
Tabela 7 – Matriz de correlação entre as variáveis padronizadas e as componentes principais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado	20

LISTA DE SIGLAS

ACP	Análise das Componentes Principais
AF	Análise Fatorial
ANA	Agência Nacional de Águas
CE	Condutividade elétrica
CERH	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
Cl ⁻	Cloreto total
Clor <i>a</i>	Clorofila <i>a</i>
CONAMA	Concelho Nacional do Meio Ambiente
COPAM	Conselho Estadual de Política Ambiental
Cu	Cobre dissolvido
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
<i>E. Coli</i>	<i>Escherichia Coli</i>
ES	Espírito Santo
IAP	Índice da Qualidade de Águas Brutas
IB	Índice da Balneabilidade
Ifes	Instituto Federal do Espírito Santo
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão das Águas
IQA	Índice da Qualidade das Águas
IQA _{NSF}	Índice da Qualidade das Águas Elaborado pela National Sanitation Foundation
IVA	Índice da Preservação da Vida Aquática
MG	Minas Gerais
NH ₄ ⁺	Nitrogênio amoniacal total
NO ₃	Nitrato
OD	Oxigênio dissolvido
pH	Potencial hidrogeniônico
PIRH	Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce
P _{Tot}	Fósforo total
SD _{Tot}	Sólidos dissolvidos totais
SS _{Tot}	Sólidos em suspensão totais
Turb	Turbidez

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO GERAL	13
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	METODOLOGIA	14
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	17
5	CONCLUSÃO	24
	REFERÊNCIAS	25

1 INTRODUÇÃO

A água, líquido mais abundante no planeta terra, teve uma função importante na história das civilizações, conforme destacado por Ribeiro e Roock (2010). Além disso, é indispensável para a higienização dos ambientes e para o saneamento.

A crescente geração de efluentes e resíduos oriundos das atividades agrícolas e de mineração têm se mostrado o principal fator de degradação dos recursos hídricos, tornando a água, juntamente com as diversas degradações antrópicas, um recurso natural limitado, definido pela Lei nº 9.433/1997, como dotado de valor econômico (BRASIL, 1997).

Diante dessa realidade, pesquisas são desenvolvidas para aprimorar a metodologia de monitoramento das características da água, buscando um modelo eficaz e confiável para subsidiar o gerenciamento dos recursos hídricos. Nesse mesmo raciocínio, surgiu o desafio de encontrar um meio de apresentar de forma sistêmica e prática a situação real da água para a população alheia e principalmente para tomadores de decisões.

Em 1975, a CETESB adaptou e desenvolveu o Índice de Qualidade das Águas – IQA criado pela “National Sanitation Foundation” dos Estados Unidos, abrangendo nove variáveis consideradas indispensáveis para abastecimento público, buscando, assim, sanar tal desafio. No entanto, o índice demonstrava algumas fragilidades, entre elas a pouca abrangência de parâmetros significativos para caracterização da água. Sendo assim, na década de 2000, a mesma companhia ambiental desenvolveu outros índices, tais como: Índice da Qualidade de Águas Brutas (IAP); Índice da Preservação da Vida Aquática (IVA); e Índice da Balneabilidade (IB).

Apesar das fragilidades, o IQA composto pelas nove variáveis propostas inicialmente pela CETESB ainda é o mais utilizado no Brasil para análise da água (ANA, 2018), fazendo-se necessária a busca por ferramentas capazes de identificar as variáveis essenciais para a real caracterização do ambiente. É o caso do emprego da estatística multivariada para identificação e adequação do Índice de Qualidade da Água - IQA em uma bacia hidrográfica (GARDIMAN JUNIOR, 2015).

A estatística multivariada foi desenvolvida pela necessidade de se analisar conjuntos de dados com muitas variáveis correlacionadas (VICINI, 2005), aplicada em diversas áreas, como na geologia, hidrologia, psicologia, agronomia, dentre outros campos da ciência, sem perdas significativas de informações e com resultados considerados altamente satisfatórios pelos seus usuários (ANDRITTI, 1997).

Por tais motivos, utilizou-se tal ferramenta para alcançar os objetivos a seguir traçados.

2 OBJETIVO GERAL

O trabalho objetivou identificar os principais parâmetros de degradação da qualidade da água do Rio Doce, empregando métodos estatísticos e a classificação de parâmetros monitorados.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

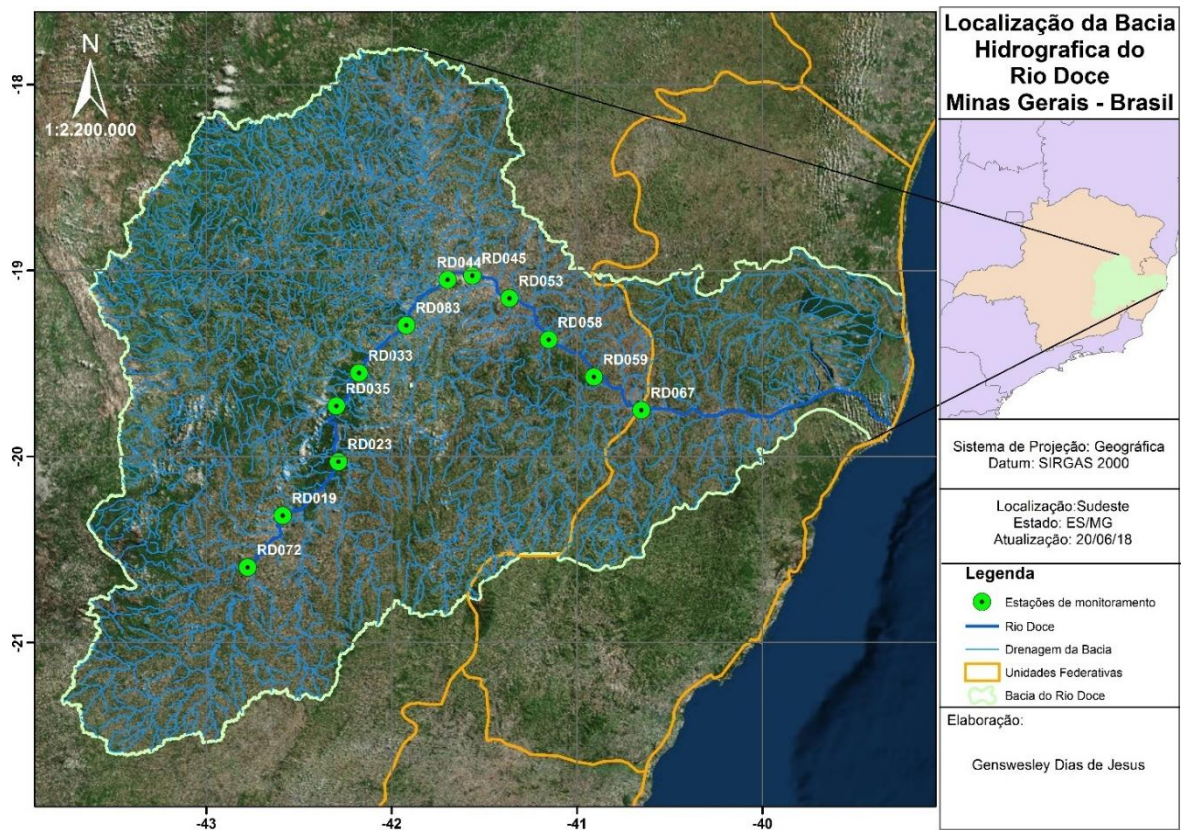
- Identificar dentre os parâmetros monitorados pelo Instituto Mineiro de Gestão das águas - IGAM, os que se apresentam recorrentes e em desacordo com os padrões da Norma COPAM/CERH-MG nº 1/2008.
- Identificar utilizando a estatística multivariada, dentre os parâmetros monitorados com frequência mensal pelo Instituto Mineiro de Gestão das águas - IGAM, os que caracterizam a poluição do trecho hídrico em estudo.

3 METODOLOGIA

A metodologia iniciou-se pela delimitação da área de influência da pesquisa: a bacia do Rio Doce (Figura 1), com área de aproximadamente 86.700 km², entre os paralelos 17°45' e 21°15' S e os meridianos 39°30' e 43°45' W, integrando a região hidrográfica do Atlântico Sudeste (PIRH, 2010).

Definiu-se, para a análise, todas as estações de monitoramento distribuídas na calha do Rio Doce no estado de Minas Gerais (Figura 1), identificando-se as localizações das estações no trecho hídrico (Tabela 1). Os dados de Qualidade de água foram coletados nos anos e meses subsequentes de 2012 a 2017, como disponibilizado pelo IGAM (2018).

Figura 1 – Delimitação da bacia do Rio Doce



Fonte: O autor.

Na primeira análise, compararam-se todos os 38 parâmetros com registros monitorados pelo IGAM, com as duas legislações às quais o recurso hídrico está submetido: a estadual, por meio da Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n° 1/2008 e a federal,

conforme estabelece o CONAMA, por meio da Resolução nº 357/2005, e suas alterações, as Resoluções nº 397/2008 e 430/2011.

Tabela 1 – Estações de monitoramento presentes na calha do Rio Doce

Estação	Latitude	Longitude	Municípios
RD019	-20,02	-42,75	RIO CASCA (MG), SÃO DOMINGOS DO PRATA (MG)
RD023	-19,76	-42,48	MARLIÉRIA (MG), PINGO-D'ÁGUA (MG)
RD033	-19,33	-42,38	BELO ORIENTE (MG), BUGRE (MG)
RD035	-19,49	-42,49	IPATINGA (MG)
RD044	-18,88	-41,95	GOVERNADOR VALADARES (MG)
RD045	-18,86	-41,83	GOVERNADOR VALADARES (MG)
RD053	-18,97	-41,65	GALILÉIA (MG), TUMIRITINGA (MG)
RD058	-19,17	-41,46	CONSELHEIRO PENA (MG)
RD059	-19,35	-41,24	RESPLENDOR (MG)
RD067	-19,51	-41,01	AIMORÉS (MG), BAIXO GUANDU (ES)
RD072	-20,27	-42,92	RIO DOCE (MG), SANTA CRUZ DO ESCALVADO (MG)
RD083	-19,10	-42,15	FERNANDES TOURINHO (MG), PERIQUITO (MG)

Fonte: O autor.

Entretanto, na segunda análise, selecionaram-se as variáveis com frequência mensal de coleta no monitoramento, para obter dados com amostragem homogênea, bem como, compor a matriz quadrática [R] em (p x p), sendo p o número de variáveis utilizadas e empregando os seguintes parâmetros listados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros analisados pela estatística multivariada

Parâmetros	Siglas	Unidades
Condutividade elétrica	CE	µS cm-1
Cloreto total	Cl-	Cl L-1
Clorofila <i>a</i>	Clor <i>a</i>	µg L-1
Cobre dissolvido	Cu	Cu L-1
<i>Escherichia Coli</i>	<i>E. Coli</i>	NMP 100 ml-1
Demanda Bioquímica de Oxigênio	DBO	mg L-1
Fósforo total	PTot	mg de P L-1
Nitrato	NO3	mg L-1
Nitrogênio amoniacal total	NH4+	mg L-1
Potencial hidrogeniônico	pH	-
Oxigênio dissolvido	OD	mg L-1
Sólidos dissolvidos totais	SDtot	mg L-1
Sólidos em suspensão totais	SStot	mg L-1
Turbidez	Turb	NTU

Fonte: O autor.

Em busca de conhecer a forma de distribuição dos dados originais, foram calculados a média e o desvio padrão. Prosseguiu-se, então, para a utilização da técnica da estatística multivariada, com a normatização dos dados (GIRÃO et al., 2007; GUEDES et al., 2012), a fim de equalizar as diferentes unidades de medidas, através da Equação 1, utilizada por Vicini (2005), tem-se:

$$\mathbf{X}_{sij} = (\mathbf{X}_{ij} - \bar{\mathbf{X}}_i) \mathbf{S}_i^{-1} \quad (1)$$

em que:

\mathbf{X}_{sij} é a *i-ésima* observação da variável *j-ésima* padronizada;

\mathbf{X}_{ij} é o valor *i-ésimo* observado da *j-ésima* variável;

$\bar{\mathbf{X}}_i$ é a média da *j-ésima* e *i-ésima* variável;

\mathbf{S}_i é o desvio padrão da variável \mathbf{X}_{ij} ;

$\bar{\mathbf{X}}_i$ é a média da amostra \mathbf{X}_{ij} ;

i é o número de variáveis; e

j é o número de pontos de coleta.

Completando esta etapa, em busca das principais variáveis que influenciam a degradação desse curso hídrico e seu respectivo peso, utilizaram-se as técnicas de estatística multivariada, a saber a Análise Fatorial (AF) e de Componentes Principais (ACP), como já aplicado por alguns autores (GIRÃO et al., 2007; GUEDES et al., 2012; BASTOS et al., 2018).

Para a determinação dos componentes principais, empregou-se a matriz de correlação entre as variáveis, observando-se os coeficientes maiores ou iguais a 0,7 e, sequencialmente, calcularam-se os autovalores para escrever as combinações lineares, as quais foram as novas variáveis, denominadas de componentes principais, independentes entre si (REGAZZI, 2001).

Ao final, conclui-se com a geração da matriz de correlação entre as variáveis padronizadas e os componentes principais rotacionados pelo método Varimax Normatizado (VICINI, 2005; PEREIRA, 2001), a fim de explicitar melhor os dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio dos dados, observa-se, na Tabela 3, a quantidade e o percentual das variáveis em desconformidade com os padrões de qualidade da água nos seis anos analisados, em destaque para: Sulfeto; Óleos e graxas, cujas amostras coletadas apresentam-se 100% acima do limite estabelecido pela norma regulamentadora estadual.

Tabela 3 – Quantidade (Q) e percentual (%) de desconformidade das variáveis com os limites de qualidade de água, estabelecidos pela legislação estadual

Parâmetros	2012		2013		2014		2015		2016		2017	
	Q	%	Q	%	Q	%	Q	%	Q	%	Q	%
Alumínio dissolvido	1	4	12	43	2	7	6	21	14	19	28	29
Chumbo total	1	3	2	6	1	3	0	0	10	13	11	11
Coliformes termotolerantes	39	81	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cor verdadeira	0	0	5	16	0	0	0	0	11	34	2	7
Cromo total	0	0	0	0	0	0	0	0	8	11	2	2
Ensaio ecotoxicológico	47	39	47	39	47	39	47	39	47	39	5	28
<i>Escherichia coli</i>	0	0	72	67	95	66	76	58	92	70	66	69
Ferro dissolvido	5	11	6	14	1	2	4	9	7	9	11	11
Fósforo total	8	17	12	11	4	3	10	8	40	30	11	11
Manganês total	13	34	14	37	4	11	1	3	47	59	33	34
Óleos e graxas	32	100	32	100	32	100	32	100	29	100	1	100
Sólidos em suspensão totais	5	10	13	12	5	3	11	8	48	36	19	20
Sulfeto	36	100	36	100	36	100	36	100	36	100	30	100
Turbidez	0	0	13	12	5	3	12	9	68	52	29	30

Fonte: O autor.

A *Escherichia coli* mostra registros recorrentes de desconformidade com o limite normativo, característico de lançamentos de esgotos in natura no corpo receptor. Vale ressaltar que o parâmetro *Escherichia coli* iniciou suas medições a partir do ano de 2013; até então realizava-se apenas a medição dos Coliformes termotolerantes.

No ensaio ecotoxicológico do monitoramento, por meio do organismo aquático omicrocrustáceo *Ceriodaphnia dubia*, com registro dos efeitos agudo, crônico e não tóxico, para descrever os eventuais impactos nocivos aos organismos aquáticos, ainda assim não se registrou neste período efeito agudo, mas periódicos registros de efeitos crônicos.

Destaca-se, também, os regulares registros de desconformidade dos metais: Alumínio dissolvido; Chumbo total; Ferro dissolvido; Fósforo total e Manganês total, com repentino aumento a partir do ano de 2016, incluindo Cromo total, influenciados possivelmente pelo

desastre do rompimento da barragem de minérios em Mariana-MG. Nessa mesma perspectiva, os parâmetros Turbidez, Sólidos em suspensão totais e Cor verdadeira que, segundo a Agência Nacional de Águas - ANA (2016), ultrapassaram a média histórica do Rio Doce no mês subsequente ao desastre.

Os principais fatores que corroboraram para esse cenário de degradação ambiental foram a falta de coleta e tratamento de esgotos sanitários, com seu consequente lançamento em cursos hídricos sem tratamento, e a atividade agropecuária, juntamente com os efluentes das indústrias de produção diversa e de extração minerária, conforme exposto pelos relatórios de monitoramento das águas superficiais de Minas Gerais entre os anos de 2012 a 2017.

Na segunda etapa da análise, demonstrou-se, por meio do cálculo de todos os parâmetros com frequência mensal de monitoramento entre os anos de 2012 a 2017 (Tabela 4), o alto valor da média dos dados de E. Coli, extrapolando o padrão de 1000 NMP/100 ml estabelecido na normativa estadual (MINAS GERAIS, 2008). Por outro lado, o desvio padrão em torno da média mostra um alto grau de variabilidade dos dados desse parâmetro. Ainda observando a média dos parâmetros, nota-se que o conjunto de dados identifica uma dispersão nos dados dos parâmetros turbidez e sólidos em suspensão totais.

Tabela 4 – Média e desvio padrão dos dados, comparando os padrões da norma estadual para Classe II

Parâmetros	Média	Desvio Padrão	Padrão da Norma
Condutividade elétrica	57,4	13,1	100 ¹
Cloreto total	3,4	1,1	250
Clorofila <i>a</i>	4,1	5,9	30
Cobre dissolvido	0,004	0,001	9
<i>Escherichia Coli</i>	10133,6	20344,5	1000
Demanda Bioquímica de Oxigênio	2,1	0,5	5
Fósforo total	0,06	0,04	0,1
Nitrato	0,9	0,4	10
Nitrogênio amoniacal total	0,2	0,1	0,5
Potencial hidrogeniônico	6,9	0,5	6-9
Oxigênio dissolvido	7,9	0,7	6
Sólidos dissolvidos totais	50,3	16,4	500
Sólidos em suspensão totais	46,2	75,5	100
Turbidez	50,8	99,2	100

Fonte: O autor.

¹ Em geral, níveis superiores a 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ indicam ambientes impactados (CETESB, 2008).

A Tabela 5 apresenta a correlação entre as variáveis analisadas. Nela, destaca-se que o cloreto total obteve correlação de 74% com a condutividade elétrica, e correlação de 91% entre sólidos suspensos e turbidez.

Tabela 5 – Matriz de correlação

Parâmetros	CE	Cl ⁻	Clor a	Cu	<i>E. Coli</i>	DBO	P _{tot}	NO ₃ ⁻	NH ₄ ⁺	pH	OD	SD	SS	Turb
CE	1,00													
Cl ⁻	0,74	1,00												
Clor a	-0,05	-0,02	1,00											
Cu	-0,01	-0,01	-0,01	1,00										
<i>E. Coli</i>	-0,03	-0,01	0,12	0,02	1,00									
DBO	0,04	0,03	0,22	0,02	0,09	1,00								
P _{tot}	-0,08	-0,04	0,03	-0,01	0,11	0,10	1,00							
NO ₃ ⁻	0,48	0,39	-0,14	-0,01	-0,09	0,05	-0,12	1,00						
NH ₄ ⁺	0,09	0,14	-0,06	0,06	0,11	0,10	0,13	0,12	1,00					
pH	0,24	0,12	0,10	0,06	-0,09	0,18	-0,05	0,12	-0,03	1,00				
OD	0,12	0,07	0,21	0,01	-0,04	0,18	-0,09	0,08	0,04	0,40	1,00			
SD	0,10	0,21	0,04	0,16	0,04	0,01	0,29	0,02	0,24	-0,06	-0,11	1,00		
SS	-0,10	-0,09	0,01	0,10	0,09	0,06	0,34	-0,13	0,27	-0,06	-0,10	0,38	1,00	
Turb	-0,11	-0,07	0,01	0,05	0,07	0,06	0,41	-0,12	0,30	-0,06	-0,12	0,44	0,91	1,00

Fonte: O autor.

Por meio dos autovalores calculados (Tabela 6), identificaram-se os principais componentes dentre os elencados, sendo que 6 (seis, em destaque), são responsáveis por 69% de variabilidade dos dados, sendo que os dois primeiros representam mais de 35% dessa variabilidade.

Cabe destacar que o limite de autovalores estabelecido em 70% da variância acumulada é usual dentre diversos autores, tal como observado na aplicação desse método em: Girão et al., (2007), em que duas componentes explicaram 68,44% de seus dados; Guedes et al., (2012), em que 74,3% dos dados são representados por três componentes; e Bastos et al., (2018), em que três componentes esclarecem 71% da variância dos dados, sendo que a primeira componente representa 54% destes.

Essa distinção no quantitativo de componentes principais encontradas no presente estudo representa que, quanto maior a quantidade de componentes explicando um mesmo limite estabelecido de representatividade, mais complexa é a análise, uma vez que as variáveis representativas aumentam.

Tabela 3 – Componentes principais, com respectivos autovalores e variâncias

Componentes	Autovalores	Variância Unitária (%)	Autovalores Acumulados	Variância Acumulada (%)
1	2,73	19,51	2,73	19,51
2	2,27	16,19	5,00	35,70
3	1,61	11,50	6,61	47,20
4	1,13	8,04	7,73	55,24
5	1,02	7,31	8,76	62,55
6	0,94	6,69	9,69	69,24
7	0,81	5,79	10,50	75,02
8	0,79	5,66	11,30	80,68
9	0,71	5,05	12,00	85,73
10	0,60	4,27	12,60	90,00
11	0,55	3,90	13,15	93,91
12	0,54	3,84	13,68	97,75
13	0,23	1,66	13,92	99,40
14	0,08	0,60	14,00	100,00

Fonte: O autor.

Na matriz de correlação (Tabela 7), já rotacionada pelo método Varimax, são expostos os sete fatores, sendo possível identificá-los pela sua contribuição para a deterioração hídrica.

Tabela 4 – Matriz de correlação entre as variáveis padronizadas e as componentes principais rotacionadas pelo método Varimax Normalizado

Parâmetros	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4	Fator 5	Fator 6
CE	-0,06	0,73	0,14	-0,01	-0,01	0,03
Cl ⁻	-0,05	0,98	0,03	0,00	-0,01	0,06
Clor a	0,00	-0,01	0,04	0,06	-0,01	-0,03
Cu	0,04	-0,01	0,03	0,01	1,00	0,02
<i>E. Coli</i>	0,04	0,00	-0,04	0,99	0,01	0,05
DBO	0,03	0,01	0,08	0,04	0,01	0,05
P _{tot}	0,23	-0,02	-0,02	0,05	-0,02	0,04
NO ₃ ⁻	-0,07	0,25	0,05	-0,05	-0,01	0,06
NH ₄ ⁺	0,17	0,07	-0,02	0,06	0,02	0,97
pH	-0,03	0,08	0,97	-0,04	0,03	-0,02
OD	-0,06	0,04	0,20	-0,02	0,01	0,03
SD	0,26	0,12	-0,03	0,01	0,09	0,10
SS	0,96	-0,05	-0,03	0,04	0,05	0,09
Turb	0,93	-0,04	-0,01	0,01	0,00	0,13

Fonte: O autor.

O Fator 1, correlacionado pela “Turb” (0,93) e “SS” (0,96), tem sua origem em solos expostos ou agricultáveis (IGAM, 2017), proporcionando um aporte de matéria inorgânica e orgânica oriundas da erosão do solo para a calha do rio. Nesse sentido, Rodrigues, Pissarra e Campos (2009) apontam que os valores de turbidez foram influenciados pelo uso e ocupação do solo, caracterizando alto potencial de carreamento de partículas para o curso hídrico.

Uma hipótese plausível para a principal causa, nessa análise, está no rompimento da barragem em Mariana-MG, a qual influenciou na alta variabilidade dos sólidos suspensos totais, principalmente após novembro de 2015, contribuindo para o parâmetro com o maior peso no Fator 1. Em consolidação com a hipótese, Fagundes, Fassoni-Andrade e Paiva (2017) concluíram, na análise dos sedimentos em suspensão na bacia do Rio Doce, que houve sensíveis modificações no rio principal, geradas pelo rompimento da barragem.

O Fator 2, influenciado pelo “Cl-” (0,98) e “CE” (0,73), foi um dos indicadores da presença de esgoto sanitário, como também observado por Gardiman Junior (2015), que apontou a condutividade elétrica como “dependente das concentrações iônicas e da temperatura indicando a quantidade de sais existentes na coluna d’água e, portanto, representa uma medida indireta da concentração desses poluentes”. Evidenciado também por Conceição e Bonotto (2002), relacionando o aumento da condutividade com a decomposição orgânica.

O Fator 3, relacionado ao pH (0,97), pode ser explicado pelos recorrentes impactos provenientes do lançamento de efluentes orgânicos, minerários, industriais e agrícolas. Em corroboração, Von Sperling (2005) destaca que o pH pode ter sua origem na oxidação da matéria orgânica, mas também explica que tal origem advém da dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera ou até mesmo da fotossíntese.

Quanto ao Fator 4, correlacionado pela “E. Coli” (0,99), evidencia-se a contaminação fecal no curso hídrico, derivada do lançamento de esgoto sanitário, uma vez que, apenas 41 das 209 cidades localizadas na bacia do rio Doce apresentam serviços de coleta e tratamento de esgotos, sendo que somente 28 dessas cidades tratam mais da metade do esgoto que produzem (ANA, 2015). Tal é a realidade do Brasil, o qual, segundo Madeira (2010), mesmo que atinja suas metas, não cobrirá toda a população com esse serviço. A E. Coli, que está presente em número elevado nas fezes de organismos endotérmicos, é raramente detectada na ausência de

poluição fecal, sendo considerada o indicador mais adequado de contaminação fecal em águas doces (CETESB, 2008).

O Fator 5 associado ao “Cu” (1,00), pode ser oriundo das atividades de mineração presentes na bacia do Rio Doce. O composto destacado nesse fator tem sua concentração diretamente relacionada com intoxicações que afetam o homem, a fauna aquática e os microrganismos (CETESB, 2008).

O Fator 6, indicado pelo nitrogênio amoniacal total “NH₄⁺” (0,97), é considerado um macronutriente necessário para o processo biológico, cuja origem antrópica advém das descargas de esgotos sanitários e de efluentes industriais e da lixiviação agrícola. Confirma-se, com isso, o exposto pela ANA (2018) no detalhamento das fontes de lançamento e da correlação dos efeitos causados pela concentração do composto ao meio ambiente. Destaca-se, ainda, que o excesso de nitrogênio é um condutor ao processo de eutrofização das águas naturais.

Ao final da análise estatística do presente estudo, pode-se caracterizar a poluição deste trecho hídrico como sendo devida principalmente pelo lançamento de esgoto in natura no rio Doce, aferindo-se a redução de quatorze para seis parâmetros, demonstrando a viabilidade em priorizar ações de controle, como também o monitoramento de determinadas variáveis.

A técnica de estatística multivariada é apresentada como uma importante ferramenta para selecionar os parâmetros a serem utilizados em um novo IQA, posto que o IQA_{NSF} desenvolvido pela National Sanitation Foundation (ANA, 2018) tem seus parâmetros preestabelecido, sem a investigação das peculiaridades da bacia hidrográfica. Na mesma linha, Piasentini et al., (2009) conclui que a relativa estabilidade no IQA_{NSF} utilizado em seu estudo não representa impactos importantes no ambiente.

Ainda no mesmo sentido, Fernandes (2017) notou que parâmetros como turbidez, sólidos totais, metais e ametais apresentaram medições capazes de inviabilizar a captação no Rio Doce para abastecimento de 12 cidades, como também observou que o IQA_{NSF} não se mostrou um instrumento capaz de retratar a gravidade da situação.

Em contrapartida, a técnica ora utilizada se mostra eficaz na caracterização das peculiaridades da bacia hidrográfica examinada, visto que os seis parâmetros identificados representam pouco mais de 69% da poluição hídrica, sendo viável o seu uso no planejamento de campanhas de monitoramento de cursos hídricos, para otimização de recursos.

5 CONCLUSÃO

A comparação dos dados monitorados com a normativa estadual proporcionou identificar os parâmetros que apresentam em recorrente desacordo com os limites estabelecidos. A técnica de estatística multivariada, que corresponde à análise da componente principal e à análise fatorial, é apresentada como uma ferramenta eficaz para caracterização dos parâmetros a serem selecionados em um IQA adequado a cada bacia. Essa análise estatística possibilitou a redução de quatorze para seis variáveis monitoradas, com redução de 57% no monitoramento, sem a perda de informações dos dados significativos, viabilizando a otimização de recursos em programas de monitoramento hídrico.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Encarte Especial Sobre a Bacia do Rio Doce-Rompimento da Barragem em Mariana-MG**. Brasília: Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Superintendência de Planejamento de Recursos Hídricos - SPR, 2016. Disponível em: <http://arquivos.ana.gov.br/RioDoce/EncarteRioDoce_22_03_2016v2.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2018.

ANDRIOTTI, J. L. S. Análise de componentes principais: fundamentos de uma técnica de análise de dados multivariada aplicável a dados geológicos. **Acta Geologica Leopoldensia**. Porto Alegre: CPRM, 1997. Vol XX, n. 44, p.27-50.

BASTOS, S. Q. de A.; BETARELLI JUNIOR, A. A.; GOMES, B. S. de M.; DINIZ, J. A. de S. Evidências entre a Qualidade das Bacias Hidrográficas e as Características dos Municípios de Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**. Piracicaba: RESR, 2018. v. 56, n. 1, p. 143-162.

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, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 1997.

BRASIL. Resolução 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2005.

BRASIL. Resolução nº 397, de 3 de abril de 2008. Altera o inciso II do § 4º e a Tabela X do § 5º, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA no 357, de 2005, que 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. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 2008.

BRASIL. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n.º 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília DF, 2011.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório de Qualidade das Águas Interiores do Estado de São Paulo**. São

Paulo: CETESB, 2017. (Série Relatórios. Apêndice E). Disponível em: <<http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/12/2018/06/Ap%C3%AAndice-E-Significado-Ambiental-das-Vari%C3%A1veis-de-Qualidade.pdf>>. Acesso em 22 jun 2018.

CONCEIÇÃO, F. T. da; BONOTTO, D. M. Relações hidroquímicas aplicadas na avaliação da qualidade da água e diagnóstico ambiental na bacia do Rio Corumbataí (SP). **Geochimica brasiliensis**. Rio Claro: UNESP, 2017. v. 16, n. 1, p. 1.

CONSÓRCIO ECOPLAN LUME. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Doce e Planos de Ações para as Unidades de Planejamento e Gestão dos Recursos Hídricos no Âmbito da Bacia do Rio Doce**. Volume III, Relatório Final, Minas Gerais. 2010. Disponível em: <http://www.cbhdoce.org.br/_docs/planobacia/PARH/PARH_SM_Doce>. Acesso em 30 jul. 2018.

FAGUNDES, H. de O.; FASSONI-ANDRADE, A. C.; PAIVA, R. C. D. de. Análise dos sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do Rio Doce com imagens de satélite. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE HIDROSEDIMENTOLOGIA, 2., 2017, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: Interciência, 2017.

FERNANDES, K. N. **Qualidade das águas nos Rios Gualaxo do Norte, Gualaxo do Sul e do Carmo - Afluentes do Alto Rio Doce (Watu): metais, metaloides e Índice de Qualidade das Águas antes e após o rompimento da barragem de rejeitos Fundão da Samarco/VALE/BHP Billiton, em Mariana, MG**. 2017. 223f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

GARDIMAN JUNIOR, B. S. Caracterização do processo de poluição das águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Jucu, estado do Espírito Santo, Brasil. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**. Boa Viasta:UFRR, 2015. v. 9, n. 3, p. 235-242. ISSN 1982-8470.

GIRÃO, E. G.; ANDRADE, E. M. de; ROSA, M. de F.; ARAÚJO, L. de. F. P. de; MEIRELES, A. C. M. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal. **Revista Ciência Agronômica**. Fortaleza: UFCE, 2007. v. 38, n. 1, p. 17-24.

GUEDES, H. A. S.; SILVA, D. D. da; ELESBON, A. A. A.; RIBEIRO, C. B. M.; MATOS, A. T. de; SOARES, J. H. P. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água do Rio Pomba, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi**. Campina Grande: UAEEA/UFCG, 2012. v. 16, n. 5.

LOPES, Y. K. L.; NEU, V.; FELIZZOLA, J. F.; TEIXEIRA, L. C. G. M.; COSTA, C. E. A. de S. Variabilidade hidrogeoquímica em águas do Estuário Amazônico. **Ambiência**. Guarapuava: CEDETEG, 2017. v. 13, n. 2, p. 325-341.

MADEIRA, Rodrigo Ferreira. O setor de saneamento básico no Brasil e as implicações do marco regulatório para universalização do acesso. **Revista do BNDES**. Rio de Janeiro: BNDES, 2010. n. 33, p. 123-154.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável e Conselho Estadual de Política Ambiental - **COPAM. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG Nº 1**, 05 maio 2008.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável de Minas Gerais - SEMAD. **Instituto Mineiro de Gestão de Águas - Igam**. Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/serie-historica>>. Acesso em 22 maio 2018.

PEREIRA, J. C. R. **Análise de dados qualitativos**: estratégias metodológicas para as ciências da saúde, humanas e sociais. São Paulo: Edusp, 2001.

PIASENTIN, A. M.; SEMENSATTO JUNIOR, D. L.; SAAD, A. R.; MONTEIRO JUNIOR, A. J.; RACZKA, M. F. Índice de Qualidade da Água (IQA) do reservatório Tanque Grande, Guarulhos (SP): Análise sazonal e efeitos do uso e ocupação do solo. **Geociências**. São Paulo: UNESP, 2009. p. 305-317.

PORTAL da Qualidade das Águas. **Índice de Qualidade das águas**. Disponível em: <Disponível em:http://portalpnqa.ana.gov.br/indicadores-indice-aguas.aspx#_ftn6>. Acesso em: 15 maio 2018.

PORTAL Info Hidro. **Monitoramento das águas superficiais**. Disponível em: <Disponível em: <<http://portalinfohidro.igam.mg.gov.br/gestao-das-aguas/monitoramento/agua-superficialL>>. Acesso em: 29 maio 2018.

REGAZZI, A. J. INF 766 - **Análise multivariada**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas. Departamento de Informática, 2001. p. 166. Apostila de disciplina.

RIBEIRO, J. W.; ROOKE, J. M. S. Saneamento básico e sua relação com o meio ambiente e a saúde pública. **Monografia de Especialização em Análise Ambiental, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil**, 2010.

RODRIGUES, F. M.; PISSARRA, T. C. T.; CAMPOS, S. Condições Hidrológicas de Uma Bacia Hidrográfica com Diferentes Usos do Solo na Região de Taquaritinga-SP. **Irriga**. Botucatu: UNESP, 2018. v. 14, n. 2, p. 158-169, 2018.

SILVA, D. L. da; FERREIRA, M. C.; SCOTTI, M. R. O maior desastre ambiental brasileiro: de Mariana (MG) a Regência (ES). **Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico da UFMG**, Belo Horizonte: UFMG 2015. v. 24, n. 1-2.

VICINI, Lorena; SOUZA, A. M. Análise multivariada da teoria à prática. Santa Maria. **Monografia** (Especialização em Estatística)–Departamento de Estatística, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria (RS). 2005. Disponível em: <<http://w3.ufsm.br/adriano/livro/Caderno%20dedatico%20multivariada%20-%20LIVRO%20FINAL%201.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2018.

VON SPERLING, M. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 2007. p. 588.