

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Livia de Andrade Ribeiro

**PROPOSIÇÃO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (IQA_{SUB}) PARA
APLICAÇÃO EM ÁREAS COM POTENCIAL MINERÁRIO**

Belo Horizonte
2024

Lívia de Andrade Ribeiro

**PROPOSIÇÃO DE ÍNDICE DE QUALIDADE DE ÁGUA SUBTERRÂNEA (IQA_{SUB}) PARA
APLICAÇÃO EM ÁREAS COM POTENCIAL MINERÁRIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Saneamento

Linha de pesquisa: Qualidade e tratamento de água para consumo humano

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Libânio

Belo Horizonte
2024

R484p

Ribeiro, Lívia de Andrade.

Proposição de índice de qualidade de água subterrânea (IQA_{SUB}) para aplicação em áreas com potencial mineralício [recurso eletrônico] / Lívia de Andrade Ribeiro. – 2024.

1 recurso online (151 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Marcelo Libânio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Apêndices e anexos: f. 118-151.

Bibliografia: f. 109-117.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Águas subterrâneas - Qualidade - Teses. 4. Monitoramento ambiental - Teses. 5. Indicadores ambientais- Teses. I. Libânio, Marcelo, 1960-.

I. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia.
III. Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Curso de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

"Proposição de Índice de Qualidade de Água Subterrânea (iqasub)s"

LÍVIA DE ANDRADE RIBEIRO

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. MARCELO LIBÂNIO

Profª MARIA CLARA VIEIRA MARTINS STARLING

Prof. SERGIO FRANCISCO DE AQUINO

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Profª. Priscilla Macedo Moura
Coordenadora

Prof. Marcelo Libânio
Orientador

Belo Horizonte, 27 de maio de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Sérgio Francisco de Aquino, Usuário Externo**, em 28/05/2024, às 08:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Libanio, Professor do Magistério Superior**, em 05/08/2024, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Maria Clara Vieira Martins Starling, Professora do Magistério Superior**, em 05/08/2024, às 17:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 13/08/2024, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3255440** e o código CRC **4D551A27**.

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Roseli e Valtemir, à minha irmã, Julia e ao
meu tio Zezinho.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e a toda espiritualidade pela presença, amparo e por guiar meus caminhos.

Aos meus pais Roseli e Valtemir, pelo amor, cuidado, pelos ensinamentos que me passaram e por serem meus maiores exemplos. Vocês me dão forças nos momentos mais difíceis e eu os amo infinitamente.

Aos meus avós Albertina, José, Maria e Mário, os quatro *in memoriam*, pela luta de toda uma vida, que abriu os caminhos para que eu chegasse até aqui. Eu lhes tenho muito amor, honro e agradeço a história de vocês, mesmo que ausentes fisicamente.

À minha irmã, Julia, pelo amor, parceria, cumplicidade, bom humor e confidências.

Ao meu tio/padrinho Zezinho, por ser meu anjo da guarda em vida, por me apoiar, acolher e aconselhar, sempre me tirando um sorriso do rosto. À tia Nen e à tia Norma, por todo carinho, cuidado e refúgio quando preciso.

Aos meus amigos, principalmente à Beatriz, à Shirlei e à Yara (e Ayla), que não me deixaram desistir dessa jornada, se mantiveram próximas e que sempre me fazem acreditar na minha capacidade e me trazem motivos para rir, deixando a vida mais leve. À Aline pela parceria incrível e essencial para este trabalho na elaboração dos mapas, assim como Yara (novamente, rs) e Ana que foram verdadeiras consultoras de estatística.

À Priscila, Luiza e Roberta pelo incentivo, dicas, orientações e por me encorajarem a iniciar, trilhar e concluir esta etapa.

Aos meus professores, pelo conhecimento compartilhado, em especial ao meu orientador Marcelo Libânio por todo suporte, por confiar no meu trabalho e por me encorajar todas as vezes que precisei, sempre com muita paciência e otimismo.

À UFMG e ao IGAM, pelo amparo concedido para o desenvolvimento da pesquisa.

“O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido ficar crianças toda a vida.” Albert Einstein

RESUMO

Em algumas regiões do mundo, a água subterrânea representa a principal alternativa de abastecimento. Porém, tal recurso possui um vínculo direto com a geologia local, e a dissolução de elementos pode torná-lo naturalmente inadequado para os usos destinados - consumo humano, irrigação e dessedentação animal, por exemplo. Portanto, fazem-se necessários o controle e o monitoramento dessas águas a fim de garantir os padrões preconizados pelas legislações vigentes, assim como é imprescindível o repasse das informações acerca da qualidade da água oferecida à população para a transparência e a confiabilidade do processo. A maioria das pesquisas desenvolvidas sobre índices de qualidade de água direcionaram-se para águas superficiais, enquanto os estudos sobre as águas subterrâneas foram pouco explorados. Nesse contexto, a atual pesquisa se propôs ao desenvolvimento de um Índice de Qualidade de Água Subterrânea (IQA_{SUB}) para aplicação em áreas com potencial mineral, a partir de dados da rede de monitoramento das águas subterrâneas do Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) entre os anos de 2018 e 2022. Em segunda vertente, tenciona-se elaborar a classificação de tais pontos por meio do índice proposto, assim como a comparação dos resultados obtidos a partir do IQA_{SUB} com os resultados decorrentes da aplicação do índice desenvolvido pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME) (IQA_{CCME}), que permite a flexibilidade na seleção dos parâmetros, das matrizes e das referências de qualidade da água. Adicionalmente, foram realizadas análise de *clusters* e análise dos componentes principais (ACP). O desenvolvimento do IQA_{SUB} considerou 10 parâmetros – arsênio, chumbo, mercúrio, nitrato, urânio, dureza, ferro, manganês e zinco - que podem advir da dissolução de componentes da geologia local. Para cada um desses parâmetros foram construídas curvas, atribuídos pesos e os poços foram classificados pelo IQA_{SUB} e pelo IQA_{CCME}. Ademais, para a aplicação da análise de *clusters* e ACP, foi utilizado o *software Rstudio*, sendo o método de *clusterização* escolhido o *k-means*. Considerando banco de dados com 795 registros de análises realizadas nas Redes Guarani, Norte de Minas, PANM e Velhas, observou-se que os resultados obtidos com a aplicação do IQA_{SUB} foram majoritariamente mais conservadores do que os obtidos com a aplicação do IQA_{CCME}, fato associado à ponderação dos parâmetros no IQA_{SUB}. A análise de *clusters* resultou em três *clusters*: *cluster 1* – qualidade IQA_{SUB} péssima, *cluster 2* – qualidade IQA_{SUB} regular e *cluster 3* – qualidade IQA_{SUB} péssima. Por fim, a ACP considerou cinco componentes principais que foram capazes de explicar 79,9% da variância total.

Palavras-chave: Qualidade da água subterrânea; monitoramento; IQA_{SUB}; IQA_{CCME}, análise de *clusters*, análise de componentes principais.

ABSTRACT

In some regions of the world, groundwater represents the main alternative supply. However, this resource has a direct link with local geology, and the dissolution of elements can make it naturally unsuitable for its intended uses - human consumption, irrigation and animal watering, for example. Therefore, it is necessary to control and monitor these waters in order to guarantee the standards recommended by current legislation, just as it is essential to pass on information about the quality of the water offered to the population for the transparency and reliability of the process. Most of the research carried out on water quality indices focused on surface waters, while studies on groundwater were little explored. In this context, the current research proposed the development of a Groundwater Quality Index (GWQI) for application in areas with mining potential, based on data from the groundwater monitoring network of the "Instituto Mineiro de Gestão das Águas" (IGAM) between the years 2018 and 2022. Secondly, it is intended to classify such points using the proposed index, as well as compare the results obtained from the GWQI with the results resulting from the application of the CCME WQI developed by the Canadian Council of Ministers of the Environment, which allows flexibility in the selection of parameters, matrices and water quality references. Additionally, cluster analysis and principal component analysis (PCA) were performed. The development of GWQI considered 10 parameters – arsenic, lead, mercury, nitrate, uranium, hardness, iron, manganese and zinc – which may arise from the dissolution of components of local geology. For each of these parameters, curves were constructed, weights were assigned and the wells were classified by GWQI and CCME WQI. Furthermore, to apply cluster analysis and PCA, the Rstudio software was used, with k-means being the clustering method chosen. Considering a database with 795 records of analyzes carried out in the Guarani, Norte de Minas, PANM and Velhas Networks, it was observed that the results obtained with the application of GWQI were mostly more conservative than those obtained with the application of CCME WQI, a fact associated with to the weighting of parameters in GWQI. The cluster analysis resulted in three clusters: cluster 1 – terrible GWQI quality, cluster 2 – regular GWQI quality and cluster 3 – terrible GWQI quality. Finally, the PCA considered five main components that were able to explain 79.9% of the total variance.

Keywords: Groundwater quality; monitoring; GWQI; CCME WQI; cluster analysis; PCA.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa das redes de monitoramento das águas subterrâneas do IGAM	25
Figura 2 – Mapa dos domínios hidrogeológicos de Minas Gerais	63
Figura 3 – Mapa geológico da rede de monitoramento Guarani	64
Figura 4 – Mapa geológico da rede de monitoramento Norte de Minas (porção norte)	65
Figura 5 – Mapa geológico da rede de monitoramento Norte de Minas (porção sul)	66
Figura 6 – Mapa geológico da rede de monitoramento PANM (porção leste)	67
Figura 7 – Mapa geológico da rede de monitoramento PANM (porção oeste).....	68
Figura 8 – Mapa geológico da rede de monitoramento Bacia do Rio das Velhas (porção norte).....	69
Figura 9 – Mapa geológico da rede de monitoramento Bacia do Rio das Velhas (porção sul)	70
Figura 10 – Mapa geológico da rede de monitoramento Bacia do Rio das Velhas (porção central)	71
Figura 11 – Mapa das Redes de Monitoramento de Águas Subterrâneas do IGAM.	73
Figura 12 – Gráfico do VMP da Portaria GM/MS nº 888 / Menor VMP da CONAMA nº 396 (Dessedentação de Animais, Irrigação e Consumo Humano) para metais e metais traço	74
Figura 13 – Resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{SUB} por rede de monitoramento	93
Figura 14 – Resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{CCME} por rede de monitoramento	94
Figura 15 – Mapa com a classificação pelo IQA_{SUB}	95
Figura 16 – Mapa com a classificação pelo IQA_{CCME}	96
Figura 17 – Gráfico de dispersão do IQA_{CCME} versus IQA_{SUB}	97
Figura 18 – Gráfico do número ótimo de <i>clusters</i> , pelo método de <i>elbow</i>	100
Figura 19 – Gráfico da clusterização <i>k-means</i> de 124 poços das redes de monitoramento	101
Figura 20 – Gráfico da inércia explicada por cada componente principal	104
Figura 21 – Gráfico da qualidade no mapa de fatores – visualização por valores de \cos^2	105

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação do IQA	37
Quadro 2 – Classificação do IQA _{SUB}	56
Quadro 3 – Classificação do IQA _{CCME}	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aplicação do IQA _{CCME} em estudos de águas subterrâneas	43
Tabela 2 – IQAs aplicados em estudos de águas subterrâneas em área de mineração	47
Tabela 3 – Aplicação da análise de <i>clusters</i> , associada ou não à ACP na avaliação da qualidade de água.....	50
Tabela 4 – Distribuição dos dados do IGAM entre os anos de 2005 e 2022.....	52
Tabela 5 – Distribuição dos poços monitorados nas redes do IGAM entre 2018 e 2022	52
Tabela 6 – Parâmetros selecionados para a composição do IQA _{SUB} e seus respectivos pesos.....	55
Tabela 7 – Distribuição dos dados do IGAM entre 2018 e 2022	72
Tabela 8 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA _{SUB} na Rede Bacia do Rio das Velhas, com destaque para as violações.....	75
Tabela 9 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA _{SUB} na Rede Guarani, com destaque para as violações.....	75
Tabela 10 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA _{SUB} na Rede Norte de Minas, com destaque para as violações	76
Tabela 11 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA _{SUB} na Rede PANM, com destaque para as violações	76
Tabela 12 – Número de registros e frequências percentuais de violações absoluta simples e relativa simples para os parâmetros considerados no IQA _{SUB}	98
Tabela 13 – Proposição de valores de r e respectiva intensidade da correlação.....	98
Tabela 14 – Estatística descritiva das águas dos poços do <i>cluster 1</i> , com destaque para as violações	102
Tabela 15 – Estatística descritiva das águas dos poços do <i>cluster 2</i> , com destaque para as violações	102
Tabela 16 – Resultados dos parâmetros do único ponto do <i>cluster 3</i> , com destaque para as violações	102
Tabela 17 – Coordenadas das variáveis nos cinco componentes principais com destaque para as maiores correlações	106

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACP – Análise de componentes principais

Al - Alumínio

ANA - Agência Nacional de Águas

As – Arsênio

B - Boro

Ba - Bário

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

Ca²⁺ - Cálcio

Cd - Cádmió

Cl⁻ - Cloreto

Co - Cobalto

CO₃²⁻ - Carbonato

COD - Carbono orgânico dissolvido

Cr – Cromo

Cu - Cobre

CNARH - Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos

CP – Componentes principais

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO - Demanda química de oxigênio

ETA - Estação de tratamento de água

ETR - Elementos Terras Raras

F⁻ - Fluoreto

Fe - Ferro

HCO₃⁻ - Bicarbonato

Hg – Mercúrio

IAP - Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IPAS - Indicador de potabilidade das águas subterrâneas

IQA - Índice de Qualidade de Água

IQAB - Índice de Qualidade da Água Bruta

IQABF - Índice de Qualidade de Água Bruta *Fuzzy*

IQA_{CCME} - Índice de Qualidade de Água desenvolvido pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (*Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME*)

IQA_{SUB} – Índice de Qualidade de Água Subterrânea

ISTO - Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas

K⁺ - Potássio

LD – Limite de detecção

LI – Limite inferior

LQ - Limite de Quantificação

LS – Limite superior

Mg²⁺ - Magnésio

Mn – Manganês

Na⁺ - Sódio

NH₄⁺ - Amônia

Ni - Níquel

NO₃⁻ - Nitrato

NO₂⁻ - Nitrito

NSF - *National Science Foundation*

OCDE - Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico

O₂ - Oxigênio

OD - Oxigênio Dissolvido

OMS – Organização Mundial da Saúde

PANM - Projeto Águas do Norte de Minas

Pb - Chumbo

PFTHM - potencial de formação de trihalometanos

pH – Potencial hidrogeniônico

PO_4^{3-} - Fosfato

RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas

SAA - Sistemas de abastecimento de água para consumo humano

SAC - Solução alternativa coletiva

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

Se - Selênio

SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIAM - Sistema Integrado de Informação Ambiental

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SO_4^{2-} - Sulfato

SR – Sensoriamento remoto

SS – Sólidos suspensos

TPC - *Total Plate Count*

TR - Taxa de remoção média

UGRHs - Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos

UPGRH - Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos

VMP - Valores Máximos Permitidos

WSS - *Within Sum of Squares* (dentro dos limites das somas dos quadrados)

WQS - *Water Quality Satus*

Zn – Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	21
2.1	Objetivo Geral	21
2.2	Objetivos Específicos	21
3	REVISÃO DA LITERATURA	21
3.1	A relevância das águas subterrâneas no Brasil como mananciais de abastecimento	21
3.2	Qualidade das águas subterrâneas: bases legais, monitoramento e parâmetros relevantes	22
3.3	Geologia de Minas Gerais e a qualidade das águas subterrâneas	25
3.3.1	Domínios hidrogeológicos de Minas Gerais	28
3.3.2	Informações acerca dos parâmetros selecionados para compor o IQA _{SUB}	31
3.4	Índices de qualidade	34
3.4.1	Índices de qualidade da água	36
3.4.2	Índices de qualidade de água subterrânea	40
3.4.3	Índices de qualidade de água subterrânea aplicados a áreas de mineração	46
3.4.4	Análise de <i>Clusters</i> e Análise dos Componentes Principais (ACP)	48
4	METODOLOGIA	52
4.1	Avaliação da base de dados fornecida pelo IGAM e pré-seleção dos parâmetros	52
4.2	Desenvolvimento do IQA _{SUB}	53
4.3	Cálculo do IQA _{CCME}	57
4.4	Análise de Clusters e Análise dos Componentes Principais (ACP)	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1	Área de estudo	61
5.2	Avaliação da base de dados fornecida pelo IGAM e pré-seleção dos parâmetros	72
5.3	Resultados obtidos pelo IQA _{SUB} e pelo IQA _{CCME}	92
5.4	Análise de <i>clusters</i> e de componentes principais	99
6	CONCLUSÕES	107
7	RECOMENDAÇÕES	108
	REFERÊNCIAS	109
	APÊNDICE A – Localização e características geológicas e hidrogeológicas dos pontos monitorados pelo IGAM	118
	APÊNDICE B – Box-plots dos parâmetros considerados nos índices por rede	128

APÊNDICE C – Curvas médias de variação de qualidade das águas IQASUB.....	133
APÊNDICE D – Resultado do cálculo do IQASUB e do IQACCME de todos os pontos 137	
APÊNDICE E – Padronização pelo método Zscores	143
APÊNDICE F – Código utilizado no software RStudio – k-means.....	147
APÊNDICE G – Código utilizado no software RStudio - ACP	148
ANEXO A – Parâmetros analisados pela CETESB no monitoramento subterrâneo 149	
ANEXO B – Principais parâmetros analisados pelo IGAM.....	150
ANEXO C – Curvas médias de variação de qualidade das águas	151

1 INTRODUÇÃO

Sabe-se que a água subterrânea é um dos mais importantes recursos globais de água doce, devido à sua estabilidade e relevância (ALEXAKIS *et al.*, 2016; KERAGA *et al.*, 2017) e que seu uso tem crescido devido à busca pelo suprimento das demandas hídricas, seja para o abastecimento da população, para a produção de alimentos ou para atividades industriais (NAJEEB e SAEED, 2022). Em certas regiões do mundo, esses mananciais de águas subterrâneas representam a principal, se não a única alternativa de abastecimento (PRATES *et al.*, 2015). Exemplos desta situação recaem para a Índia (JHA *et al.*, 2020), áreas semiáridas do Irã (VADIATI *et al.*, 2016) e do semiárido brasileiro (DE SOUZA *et al.*, 2013). Somam-se a tais exemplos cenários decorrentes de rupturas de barragens de rejeito de mineração, como da barragem B1 em Brumadinho em janeiro de 2019. Tal evento resultou no impeditivo do uso das águas superficiais do Córrego Ferro-Carvão e do Rio Paraopeba por apresentarem riscos à saúde humana e animal, conforme recomendação da Nota de Esclarecimento 9 – Desastre Barragem B1 (IGAM, 2019). Dada a proibição do uso das águas superficiais, fizeram-se necessárias perfurações de poços para o atendimento das demandas hídricas da Bacia do Paraopeba, entre os municípios de Brumadinho e Três Marias.

Ao contrário das águas superficiais, em que as fontes de poluição e disponibilidade são visíveis, o movimento e a poluição das águas subterrâneas são ocultos. Assim, a qualidade das águas subterrâneas depende da qualidade da água nas zonas de recarga dos aquíferos, da precipitação atmosférica e dos processos geoquímicos subterrâneos (VASANTHAVIGAR *et al.*, 2010). Portanto, as águas subterrâneas possuem um vínculo direto com a geologia local, podendo, assim, apresentar características que as tornam naturalmente inadequadas para alguns usos (IGAM, 2018).

Nesse contexto, a avaliação da qualidade das águas subterrâneas é de suma importância para determinar as possibilidades de uso, com base em suas propriedades físicas, químicas e bacteriológicas (PRASAD *et al.*, 2021). Tal avaliação só é possível através do monitoramento e controle da qualidade das águas subterrâneas e o seu direcionamento para tratamentos adequados, a fim de garantir o atendimento aos padrões preconizados pelas legislações vigentes, de acordo com

os usos aos quais essas águas são destinadas. Além disso, a comunicação com as comunidades abastecidas e o repasse das informações sobre a qualidade da água oferecida são imprescindíveis para a transparência e confiabilidade do processo.

De tal modo, o desenvolvimento de um Índice de Qualidade de Água Subterrânea (IQA_{SUB}) se torna relevante, tendo em vista que o Índice de Qualidade de Água (IQA), desenvolvido pela *National Science Foundation* (NSF), adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e utilizado pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM), é voltado para mananciais superficiais e não considera alguns parâmetros de relevância para água subterrânea, como alguns metais, por exemplo. Ainda, a apresentação dos laudos de qualidade não é de fácil interpretação para quem não é da área técnica. Assim, a utilização de um IQA_{SUB} pode ser capaz de auxiliar nas tomadas de decisão dos órgãos competentes, na interpretação das normativas e repasse das informações às comunidades de forma mais clara e intuitiva, com um caráter informativo para a população atendida pelos poços em questão, sendo capaz de apresentar de maneira mais clara as informações a respeito da qualidade da água dessas fontes. No entanto, vale ressaltar que o uso de índices de qualidade não exige a necessidade de monitoramentos completos conforme preconizados pelas normativas, e que a aplicação da ferramenta e a liberação das fontes de abastecimento devem levar em conta o olhar crítico de profissionais capacitados.

Neste estudo, propõe-se o desenvolvimento de um IQA_{SUB}, a partir de dados da rede de monitoramento das águas subterrâneas do IGAM, assim como a classificação de tais pontos a partir do índice proposto. Propõe-se também comparar os resultados obtidos a partir do IQA_{SUB} com os resultados decorrentes da aplicação do IQA_{CCME} a esses dados.

O trabalho tem ainda como proposta a implementação da análise de *cluster*, a fim de avaliar quais domínios hidrogeológicos, geológicos e recursos minerais presentes nas regiões das redes de monitoramento do IGAM resultam em águas naturalmente impróprias para uso sem tratamento prévio.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um IQA_{SUB} que se preste como balizador dos mananciais subterrâneos utilizados para fins de abastecimento, em áreas com potencial mineral.

2.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma ferramenta que seja capaz de quantificar a qualidade das águas subterrâneas em áreas com potencial mineral;
- Facilitar o repasse das informações acerca da qualidade da água para a população interessada;
- Comparar o IQA_{SUB} desenvolvido com o IQA desenvolvido pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (*Canadian Council of Ministers of the Environment* – CCME) (IQA_{CCME}), ambos aplicados à mesma base de dados do IGAM; e
- Aplicar a análise de *clusters* à base de dados do IGAM, a fim de verificar a adesão das classificações do IQA_{SUB} e do IQA_{CCME} aos *clusters* encontrados pela aplicação do método *k-means*;
- Aplicar a análise dos componentes principais (ACP) à base de dados do IGAM, objetivando compreender quais variáveis originais estão correlacionadas entre si, a partir da formação dos componentes principais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 A relevância das águas subterrâneas no Brasil como mananciais de abastecimento

Segundo o relatório pleno sobre a Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil (2021) da Agência Nacional de Águas (ANA), estima-se que a disponibilidade de água subterrânea no Brasil seja de aproximadamente 13.205 m³/s, com variações na distribuição no território nacional, características hidrogeológicas e produtividade de acordo com os aquíferos. No ano de 2017, existiam no Brasil cerca de 1,2 milhões de poços, estimados pelo Censo Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), valor ampliado para cerca de 2,6 milhões em 2021. Esse valor é correspondente a 8% das reservas exploráveis, tratando-se, entretanto, de

informações médias, divergentes do cenário real. Tal situação decorre do fato de que apenas 330.265 poços - 12,7% do número total estimado - estavam cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), sendo apenas 126.221 captações correspondentes a poços regularizados no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), o que representa apenas 4,8% do total (ANA, 2022).

No Estado de Minas Gerais, de acordo com o Relatório de Gestão e Situação dos Recursos Hídricos de Minas Gerais (2020) do IGAM, foram contabilizadas 63.083 usos insignificantes subterrâneos e 17.272 portarias de outorgas subterrâneas vigentes até o final de 2019, correspondente a 17,2% das vazões outorgadas (96.617 L/s), com base em informações cadastradas no banco de dados do Sistema Integrado de Informação Ambiental (SIAM). Em contrapartida, para as captações superficiais foram identificados 75.303 usos insignificantes superficiais, 10.074 outorgas superficiais individuais e 1.726 intervenções coletivas distribuídas em 97 portarias de outorga coletiva, respondendo por 82,8% das vazões (~465 m³/s) (IGAM, 2020).

Apesar das vazões de captações subterrâneas serem menores que as vazões de captações superficiais em Minas Gerais, nota-se que o número de outorgas subterrâneas representa a maior parcela das outorgas. Ademais, o abastecimento por fontes subterrâneas ocorre de forma mais descentralizada, dificultando o controle sobre a qualidade desse recurso. Portanto, é evidente a necessidade de monitoramento e a garantia da qualidade dessas águas, sendo a utilização de um IQA_{SUB} um facilitador nesse processo, o que não extingue a necessidade do monitoramento semestral completo, conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

3.2 Qualidade das águas subterrâneas: bases legais, monitoramento e parâmetros relevantes

No Brasil, a diretriz que versa sobre as águas subterrâneas é a Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008, e a normativa que estabelece as orientações sobre a qualidade da água para fins potáveis é a Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. A primeira *dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas*. Tal normativa define que os *Valores*

Máximos Permitidos - VMP para o respectivo uso das águas subterrâneas deverão ser observados quando da sua utilização, com ou sem tratamento, independentemente da classe de enquadramento, sendo os usos preponderantes principais: consumo humano, dessedentação de animais, irrigação e recreação (BRASIL, 2008).

A Portaria GM/MS nº 888/2021 dispõe sobre *os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade*. Ela estabelece no 2º inciso do Art.42 que: os responsáveis pelos sistemas de abastecimento de água para consumo humano (SAA) e solução alternativa coletiva (SAC), supridos por manancial subterrâneo, devem analisar ao menos uma amostra semestral da água bruta em cada ponto de captação, visando uma gestão preventiva de risco, considerando os parâmetros: turbidez, cor verdadeira, pH, fósforo total, nitrogênio amoniacal total, condutividade elétrica e parâmetros inorgânicos, orgânicos e agrotóxicos, listados na referida normativa (BRASIL, 2021).

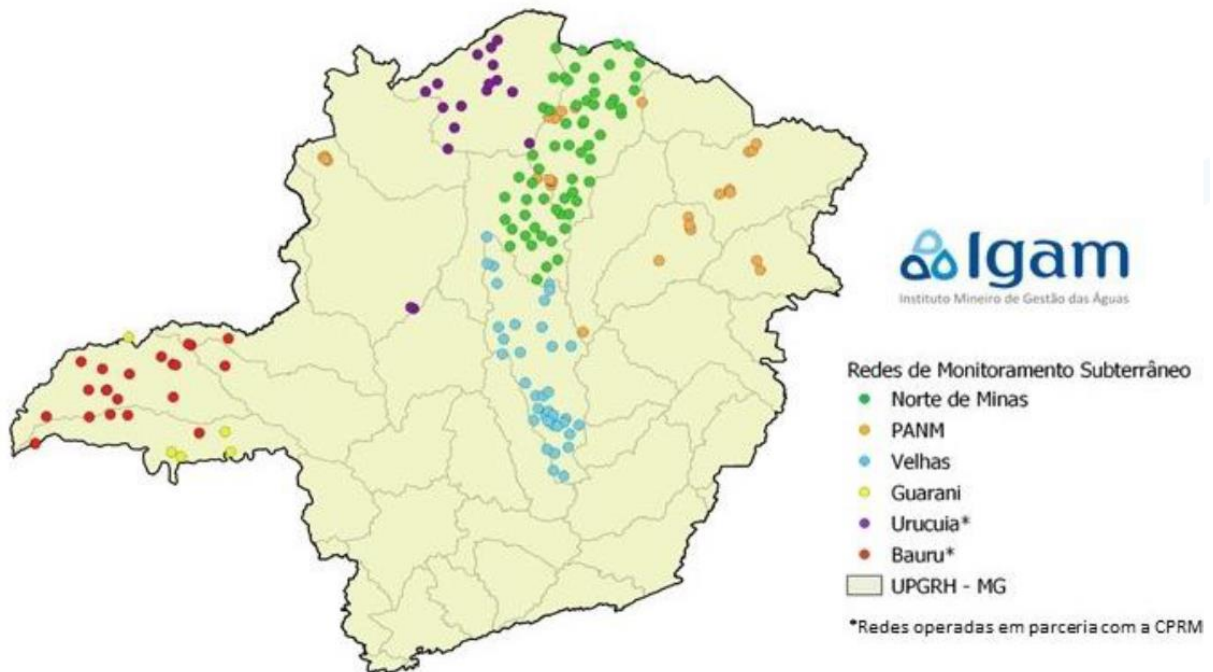
Sabe-se ainda que a qualidade das águas subterrâneas está vinculada a fatores naturais como: o regime pluviométrico, o escoamento superficial, a cobertura vegetal, a geologia local e a dinâmica de interação com as rochas dos aquíferos, bem como pelo tempo de circulação da água no subsolo. Interferências antrópicas também são relevantes sobre este aspecto: contaminações pontuais e difusas de lançamento de efluentes, o manejo dos solos, cargas contaminantes manipuladas, despejadas ou dispostas em superfície ou subsuperfície (ANA, 2022).

Ainda segundo a ANA (2022), o monitoramento da qualidade das águas subterrâneas no Brasil é incipiente. Devido a essa realidade, o Serviço Geológico do Brasil da CPRM desenvolveu a Rede Integrada de Monitoramento de Águas Subterrâneas (RIMAS), com o intuito de centralizar os conhecimentos e dados hidrogeológicos dos principais aquíferos brasileiros. O RIMAS analisa aspectos quantitativos e qualitativos, conforme preconizado pela CONAMA nº 396/2008, considerando uma relação de 43 parâmetros inorgânicos, além de orgânicos voláteis e semivoláteis, compondo as análises físico-químicas que devem ser realizadas após a implantação do poço e repetidas quinzenalmente. Já as análises semestrais consideram pH, condutividade elétrica, potencial de oxirredução e temperatura.

No Estado de São Paulo, a CETESB possui um programa de monitoramento de qualidade das águas subterrâneas, cuja rede é formada majoritariamente por poços tubulares utilizados para o abastecimento público, além de algumas nascentes. Os poços estão localizados em praticamente todas as 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHs) e Sistemas Aquíferos do Estado. O escopo analítico proposto pela CETESB é composto por parâmetros inorgânicos, orgânicos e microbiológicos, e estão apresentados no ANEXO A. Visando analisar as variações sazonais, as campanhas de amostragem são semestrais e ocorrem nos períodos de março a abril e setembro a outubro. A partir dos resultados, a CETESB apresenta um indicador de potabilidade das águas subterrâneas (IPAS), que quantifica as amostras conformes segundo os padrões de potabilidade e indica o percentual de potabilidade das águas subterrâneas brutas (CETESB, 2021). Gonçalves (2021) ressalta que esse monitoramento deveria ocorrer com maior frequência, a fim de viabilizar uma análise mais detalhada acerca da qualidade das águas.

Ao analisar tal contexto no Estado de Minas Gerais, o Programa Águas de Minas, desenvolvido pelo IGAM no ano de 2005, compreende 165 pontos de monitoramento e é composto por seis redes regionais: Norte de Minas, Projeto Águas do Norte de Minas (PANM), Guarani, Velhas, Urucuia e Bauru, conforme apresentado no mapa da Figura 1 (ANA, 2022). Em cada campanha, são analisados aproximadamente 70 parâmetros físicos, químicos e biológicos monitorados, sendo que alguns agroquímicos também são investigados no aquífero Bauru. Os principais parâmetros considerados pelo IGAM estão relacionados no ANEXO B.

Figura 1 - Mapa das redes de monitoramento das águas subterrâneas do IGAM



Fonte: IGAM (2020).

Observa-se que o Programa Águas de Minas não contempla todas as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) e que os parâmetros selecionados não consideram todos aqueles recomendados pela Portaria GM/MS nº888/2021. Dentre os parâmetros excluídos estão: agrotóxicos e metabólitos, cujas detecções na água estão diretamente vinculadas às atividades antrópicas e ao uso e ocupação do solo, principalmente às atividades agropecuárias; algumas substâncias orgânicas vinculadas às contaminações por derivados de petróleo; alguns parâmetros organolépticos e ainda algumas substâncias inorgânicas. Assim, para que fosse possível tecer um cenário completo acerca da qualidade das águas subterrâneas do estado de Minas Gerais, seria importante que o programa se estendesse a todas as UPGRH e que o monitoramento considerasse todos os parâmetros preconizados pela Portaria GM/MS nº888/2021, mesmo que o monitoramento completo contemplasse apenas pontos estratégicos.

3.3 Geologia de Minas Gerais e a qualidade das águas subterrâneas

Minas Gerais se destaca dos demais estados brasileiros por possuir algumas das maiores jazidas, províncias e distritos minerais do País, e ainda centenas de ocorrências menores. Grandes distritos minerais de ouro – supergrupo *greenstone belt* Rio das Velhas - e de ferro – Supergrupo Minas - estão localizados no núcleo

arqueano-paleoproterozoico, ambos na região do Quadrilátero Ferrífero. Nos cinturões marginais do Estado se encontram a região de Porteirinha detentora de ferro; a Província Pegmatítica Oriental, com pedras preciosas; a jazida aurífera de Morro do Ouro; o nióbio do Maciço de Araxá; estanho e tântalo, além de bauxita. Outros minerais também podem ser encontrados no Estado, em depósitos e minas de manganês, níquel, cobre, Elementos Terras Raras (ETR – leves: lantânio, cério, praseodímio e neodímio; médios: samário, európio e gadolínio; pesados: térbio, disprósio, hólmio, érbio, túlio, itérbio, lutécio e ítrio), alumínio, tântalo, diamante, fósforo, cromo, urânio, esmeralda, calcário, grafita, e rochas ornamentais (LOBATO e COSTA, 2018). Na região de Diamantina são encontrados depósitos superficiais diamantíferos dos tipos laterítico e coluvial, amplamente distribuídos ao longo da mesma faixa altimétrica, mas que se desenvolveram em processos geológicos e tempos completamente distintos. (CHAVES e BENITEZ, 2004).

No quadrilátero ferrífero, a gênese dos minérios moles de alto teor e dos itabiritos ricos em ferro se deve a processos supergênicos. Com a lixiviação dos minerais de ganga pelas águas subterrâneas houve o enriquecimento residual de ferro dos itabiritos, processos esses favorecidos pelo clima tropical e pela topografia da região (SPIER *et al.*, 2003).

A riqueza mineral do Estado de Minas Gerais se torna, então, um ponto de alerta para a qualidade dos recursos hídricos. Esta situação decorre dos efeitos de liberação e de propagação desses minerais/contaminantes no meio ambiente, que incluem a alteração das características naturais das águas, acarretando restrições ao uso desse recurso, em especial das águas subterrâneas (FEAM, 2015). Ademais, somam-se aos fenômenos naturais os efeitos de atividades antrópicas provenientes das atividades minerárias, como a drenagem ácida de minas, que é uma das principais causas de degradação da qualidade da água, pois torna-a altamente ácida e rica em metais e metais-traço. O processo ocorre devido a uma série de reações geoquímicas e microbianas complexas, quando minerais sulfetados provenientes das atividades minerárias entram em contato com a atmosfera e a água (como exemplo, pode-se citar a pirita - sulfeto de ferro -, que produz ácido sulfúrico e ferro dissolvido). O escoamento ácido, por sua vez, favorece a dissolução de metais e metais-traço, como alumínio, cobre, chumbo e mercúrio, encontrados nas rochas e no solo. Importante

ressaltar que esse fenômeno é intensificado em minas abandonadas, pois as rochas ficam expostas por muito tempo, portanto, é de extrema importância o preenchimento dessas minas com material estéril (SWER e SINGH, 2004).

De acordo com LIMA *et al.* (2024), dentre as amostragens de águas subterrâneas utilizadas como base para o estudo desenvolvido na região de Brumadinho, Minas Gerais, 99% das violações de ferro e manganês detectadas foram provenientes de contribuições naturais, relacionadas à abundância de rochas ricas em ferro na região do Quadrilátero Ferrífero. Quanto ao restante das violações detectadas (1%), estas podem ser atribuídas à drenagem de depósitos de rejeitos.

Também na região do Quadrilátero Ferrífero, as principais fontes naturais de arsênio se relacionam às rochas que hospedam depósitos auríferos sulfetados e carbonatos, e as fontes antrópicas são as pilhas de rejeito, solos e sedimentos contaminados. Amostras de água de minas auríferas subterrâneas e em nascentes das regiões de Ouro Preto e Mariana revelaram concentrações de arsênio total variando de 2 a 2980 µg/L. Considerando o limite de 10 µg/L preconizado para tal parâmetro pela Portaria GM/MS nº888/2021, esses dados são alarmantes (BORBA *et al.*, 2004). A ingestão de água contendo arsênio pode ocasionar doenças como conjuntivite, hiperpigmentação, doenças cardiovasculares, distúrbios do sistema nervoso, câncer de pele e gangrena nos membros (SANTANA FILHO, 2005).

Ainda na região de Ouro Preto e Mariana, Pimentel *et al.* (2003) realizaram um estudo a respeito de dados de qualidade de água de abastecimento público em um ciclo sazonal, entre setembro de 1999 (inverno) e fevereiro de 2000 (verão). As amostragens de água foram realizadas em 22 estações (43 amostras), sendo os pontos escolhidos: antigas minas de ouro abandonadas para a coleta de águas subterrâneas, fontes públicas, pequenos rios e córregos. Os autores analisaram os teores dos metais cálcio, magnésio, sódio (Na⁺), potássio (K⁺) e ferro (Fe) (43 registros de cada parâmetro), alumínio, arsênio, manganês e zinco (42 registros de cada parâmetro); além pH, temperatura, sólidos dissolvidos totais (SDT), condutividade elétrica, turbidez, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ (43 registros de cada parâmetro). Também foram realizados testes de lixiviação com quatro amostras de rocha da mina de ouro Passagem, verificando a contribuição desse processo para o teor de metais nas

águas. Foram verificadas violações de arsênio, manganês e alumínio no verão e inverno, e de zinco no inverno. Os resultados encontrados nas amostras de água se assemelharam aos da extração realizada sob condições oxidantes com peróxido de hidrogênio, principalmente para as amostras de mármore bandado. Portanto, os testes de lixiviação demonstraram que esse processo provoca a mobilização do arsênio e dos demais elementos para o sistema hidrológico.

O Grupo Bambuí ocupa uma posição importante na geologia de Minas Gerais, ocupando quase um terço da superfície do Estado e por conter recursos minerais importantes como zinco, chumbo, fosfato, ardósias, fluorita, calcários e dolomitos (COUTO, *et al.*, 1981). No sistema aquífero Bambuí, localizado na região do médio rio São Francisco em Minas Gerais, foram realizados estudos com a amostragem de 127 poços e 74 parâmetros monitorados entre 2005 e 2011, totalizando 33.925 resultados. Desses parâmetros, 20 violaram as legislações vigentes à época (CONAMA 396/2008 e Portaria MS nº 2914/2011): alumínio, arsênio, bário, boro, chumbo, cloreto, cobre, cor, dureza, índice de fenóis, fluoreto, ferro, manganês, níquel, nitrato, selênio, sódio, sulfato, turbidez e zinco (SOUZA, 2013).

Ainda que a presença de alguns parâmetros nas águas subterrâneas seja vinculada aos aspectos naturais da região de interesse, principalmente no que tange à geologia e à hidrogeologia, é imprescindível que haja uma gestão da qualidade desse recurso, com a atribuição de tecnologias de tratamento adequadas para a potabilização da água, uma vez que os VMPs são estabelecidos com base nos riscos de contaminação e nos efeitos à saúde humana.

3.3.1 Domínios hidrogeológicos de Minas Gerais

O Estado de Minas Gerais possui sete domínios hidrogeológicos: bacias sedimentares, carbonatos-metacarbonatos, cristalino, formações cenozóicas, metassedimentos/metavulcânicas, poroso/fissural e vulcânicas.

As **bacias sedimentares** correspondem às sequências de rochas sedimentares, muitas vezes associadas a vulcanismo, que constituem entidades geotectônicas homônimas. No que se refere à hidrogeologia, essas bacias possuem um alto potencial e representam os reservatórios de águas subterrâneas mais importantes,

provenientes da grande espessura dos sedimentos e da alta permeabilidade (na maior parte das suas litologias), o que resulta na exploração de vazões significativas (BONFIM, 2010).

Os **carbonatos/metacarbonatos** são sistemas aquíferos desenvolvidos em regiões com predominância de rochas calcáreas, calcáreas magnesianas e dolomíticas, cuja principal característica é a presença de formas de dissolução cárstica, responsáveis pela formação de cavernas, sumidouros, dolinas e outras feições erosivas presentes nesses tipos de rochas. Tais características favorecem a porosidade e permeabilidade secundárias, ocasionando a acumulação de grandes volumes de água, geralmente carbonatada e com dureza bastante elevada. Porém, tal acumulação não ocorre de forma homogênea, conferindo aos aquíferos heterogeneidade e anisotropia elevadas (BONFIM, 2010). Dentre os pontos monitorados pelo IGAM, encontram-se neste domínio: vinte pontos da rede Norte de Minas (BC001, BC003, CJ005, CJ006, CP001, EN001, FD001, FD002, FS002, FS003, FS007, JF001, JF002, JQ001, JR001, MC002, MC003, MC004, MC006 e MR001), um ponto da rede PANM (RIC_83_IGAM) e quatorze pontos da rede Bacia do Rio das Velhas (CFNGR, GOUPA, ITAAS, JABRA, LSQSU, MONOA, MTBSP, PLFEX, PLFID, PLMMC, PMFSR, SRCM, VPCEM e VPCLV).

O **crystalino** reúne granitóides, gnaisses, granulitos, migmatitos e rochas básicas e ultrabásicas, que formam o aquífero fissural. Nessas rochas, a porosidade primária é praticamente nula e a ocorrência de água subterrânea fica condicionada a fraturas e fendas (porosidade secundária). Como consequência, os reservatórios são aleatórios, descontínuos e de pequena extensão, o que resulta em pequenas vazões e águas muitas das vezes salinizadas (BONFIM, 2010). Dos poços monitorados nas redes do IGAM, localizam-se neste domínio cinco poços da rede Norte de Minas (EP001, MA001, MA003, PP001 e PP004), cinco na rede PANM (PM_ITA1, PM_PA1, PM_TO1, PM_TO2 e PME_PA1) e cinco na rede Bacia do Rio das Velhas (CBCSL, DATOM, ITASGB, SJLRM e SPPEX).

Formações cenozoicas são compostas por pacotes de rochas sedimentares com espessuras e naturezas diversas, recobrando rochas mais antigas. Comportam-se como aquíferos porosos, visto que possuem porosidade primária, além de elevada

permeabilidade em terrenos arenosos, podendo apresentar vazões significativas em poços tubulares perfurados. Entretanto, é comum que os poços deste domínio captem água de aquíferos subjacentes (BONFIM, 2010). Dentre os poços das redes de monitoramento do IGAM, quinze estão localizados na rede Norte de Minas (GM001, JB003, JB007, JB008, JB020, JB021, JN001, JQ003, MC005, MTC002, PP002, RM001, SP002, VD001 e VD020), seis na rede PANM (PM_MOC1, PM_VZ2, RIC_01_IGAM, RIC_03_IGAM, RIC_06_IGAM e RIC_08_IGAM) e quatro na rede Bacia do Rio das Velhas (COFBM, MGNOA, VPBGU e VPCRD).

Os **metassedimentos/metavulcânicas** se constituem de xistos, filitos, metarenitos, metassiltitos, anfibolitos, quartzitos, ardósias, metagrauvacas, metavulcânicas diversas e possuem relação com o aquífero fissural. Portanto, a ocorrência de água subterrânea é condicionada por fraturas e fendas, resultando em reservatórios aleatórios, descontínuos e de pouca extensão. As vazões em geral são baixas e a água muitas vezes salinizada. Possuem comportamento similar ao cristalino, mas se diferem por apresentarem comportamento reológico distinto, pois reagem de forma diferente aos esforços que geram as fendas e fraturas, além de parâmetros fundamentais no acúmulo e fornecimento de água e por apresentarem uma potencialidade hidrogeológica maior do que no cristalino tradicional (BONFIM, 2010).

O domínio **poroso-fissural** se enquadra como um aquífero misto, com baixo a médio potencial hidrogeológico e que possui porosidade primária baixa/média e comportamento fissural acentuado. Isso se deve ao fato de ser constituído por pacotes sedimentares sem ou com muito baixo grau metamórfico, onde ocorrem litologias arenosas com pelitos e carbonatos, mas com uma litificação acentuada, forte compactação e fraturamento acentuado (BONFIM, 2010).

Por fim, o domínio **vulcânicas** é composto por rochas vulcânicas e meta-vulcânicas de baixo grau metamórfico, com natureza ácida a básica e comportamento majoritariamente fissural. Tal domínio geralmente possui comportamento anisotrópico com acentuada foliação ou acamadamento, facilitando o desenvolvimento de porosidade secundária. Algumas apresentam porosidade primária, associada a estruturas vesiculares, principalmente derrames básicos. O potencial hidrogeológico é mais elevado que o do domínio dos metassedimentos/metavulcânicas.

3.3.2 Informações acerca dos parâmetros selecionados para compor o IQA_{SUB}

O **arsênio** é um semimetal de ocorrência natural na crosta terrestre e que pode ser disponibilizado no meio ambiente por fontes naturais ou antropogênicas. No quadrilátero ferrífero, por exemplo, suas principais fontes naturais estão relacionadas a rochas que hospedam depósitos auríferos sulfetados (BORBA, 2004). No sistema aquífero guarani, as ocorrências de arsênio estão associadas a águas subterrâneas bicarbonatadas sódicas e com pH superior a 8,0 (GASTMANS *et al.*, 2010). Seu transporte na água depende da sua forma química, sendo liberado da fase sólida sob condições redutoras. Tal componente não é um elemento essencial ao ser humano e os sinais e sintomas iniciais de uma intoxicação aguda incluem dor abdominal, vômito, diarreia, vermelhidão na pele, dor muscular e fraqueza. Também podem ocorrer dormência e formigamento das extremidades, câibras, pápula eritematosa. Em populações expostas à contaminação ao longo dos anos lesões dérmicas são observadas, neuropatia periférica, câncer de pele, bexiga e pulmão e doença vascular periférica (CETESB, 2017A)

O **chumbo** é um metal-traço encontrado em pequenas quantidades na crosta terrestre, normalmente associado a minérios, principalmente aos de zinco. O chumbo pode estar presente na água como resultado de sua dissolução a partir de fontes naturais e pode provir de elementos das tubulações, como soldas, acessórios e conexões que contenham esse metal. Iglesias e Uhlein. (2009), por exemplo, retratam a aparição de mineralizações de chumbo na Formação Sete Lagoas, do Grupo Bambuí. A quantidade de chumbo dissolvido depende de fatores como a presença de cloro e oxigênio dissolvido, dureza da água, tempo de permanência da água na tubulação, pH e temperatura. A contaminação por chumbo pode ocasionar danos neurológicos, hematológicos, gastrointestinais, cardiovascular, reprodutor e renal. Exposições a longo prazo podem desencadear aumento na pressão sanguínea, danos renais e efeitos neurológicos e em gestantes a alta exposição pode provocar nascimento prematuro, baixo peso ao nascer, aborto espontâneo e parto natimorto (CETESB, 2022A).

O **mercúrio** é um metal-traço tóxico e é encontrado na forma líquida na natureza, quando em temperatura ambiente. Ele é considerado pela OMS como umas das dez substâncias de maior criticidade para a saúde pública. Este metal é incomum na crosta

terrestre e a sua liberação ocorre naturalmente por atividade vulcânica ou erosão, ou de forma antrópica, advindo de atividades minerárias, aterros mal operados e acidentes, podendo causar a contaminação de águas subterrâneas. A contaminação por mercúrio pode causar danos no sistema nervoso, em áreas sensoriais e de coordenação, resultando em formigamento nas extremidades e ao redor da boca, perda da coordenação motora e muscular, diminuição do campo visual, perda de visão, déficit de memória e cognição, podendo ainda levar à morte. Também está associado a anomalias no desenvolvimento, paralisia cerebral, alopecia e baixo peso corpóreo em crianças nascidas de mães contaminadas (CETESB, 2023).

O **nitrito** ocorre de forma natural no ambiente como espécie iônica, proveniente de rochas ígneas e vulcânicas, da decomposição animal e vegetal, além de fazer parte do ciclo do nitrogênio. É amplamente utilizado em fertilizantes inorgânicos na agricultura e em plantios florestais, devido às necessidades de nutrientes dos vegetais. Em água, o nitrito corresponde à principal forma de nitrogênio presente, dada a sua maior estabilidade e a contaminação das águas subterrâneas por esse componente é de difícil restauração. A contaminação das águas subterrâneas por nitrito pode ter origem na decomposição de resíduos orgânicos e fixação biológica de nitrogênio; na lixiviação de áreas com fossas sépticas, depósitos de esterco e camas de animais; e ainda ter origem na adubação do solo. A intoxicação por nitrito pode oxidar a hemoglobina para metemoglobina, que reduz o transporte de oxigênio para os tecidos, reduz a pressão arterial, aumenta os batimentos cardíacos, além de provocar dores de cabeça, cólica abdominal, vômito e até mesmo a morte. A ingestão de nitrito também pode estar associada ao desenvolvimento de câncer (CETESB, 2022C).

O **urânio** é um metal radioativo presente nas rochas normalmente em pequenas quantidades, mas podem ocorrer em concentrações significativas em algumas substâncias, como em depósitos de fosfato e minérios enriquecidos com urânio. Devido à sua mobilidade, as águas subterrâneas tendem a ser as principais fontes de exposição individual ao urânio. Quando ingerido, a maior parte é excretada pelas fezes e urina e uma pequena parte pode ficar por anos depositada nos ossos do indivíduo. No interior do organismo, a radiação e os danos químicos podem ocasionar câncer e outros problemas de saúde, incluindo doenças renais (EPA, 2002).

A **dureza** está associada à concentração de cátions multimetálicos em solução, sendo mais frequentes os cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} . A dureza não representa grandes questões sanitárias, mas em concentrações elevadas provoca sabor desagradável, pode ter efeitos laxativos e ainda estar associada à formação de cálculos renais. Além disso, reduz a formação de espuma e provoca incrustação nas tubulações (VON SPERLING, 2005).

O **ferro** é um dos elementos mais abundantes na crosta terrestre e está presente em uma grande quantidade de solos. O Grupo Itabira, presente no Quadrilátero Ferrífero, corresponde à sequência mais espessa de formações ferríferas bandadas, com corpos de minério de alto teor (ROSIÈRE e CHEMALE JR, 2000). No Norte de Minas Gerais, no Grupo Macaúbas, também são conhecidos depósitos de ferro que merecem destaque (VILELA *et al.*, 2014). Na ausência de oxigênio o ferro se apresenta na água em sua forma dissolvida, como é o caso das águas subterrâneas ou fundo de lagos e represas. Quando expostas ao ar atmosférico, essa forma reduzida volta a oxidar, retornando à forma insolúvel, o que pode conferir cor e turbidez à água. O ferro possui pouco significado sanitário nas concentrações usualmente encontradas nas águas naturais, mas pode resultar na rejeição da água por parte do indivíduo, devido à cor conferida a ela, fazendo com que o consumidor questione a sua confiabilidade e busque por águas que podem oferecer maiores riscos à saúde (VON SPERLING, 2005).

O **manganês** é um metal que ocorre na natureza combinado com outras substâncias, como o oxigênio, o enxofre e o cloro. Nas rochas do subgrupo Paraopeba, por exemplo, a presença de manganês é derivada de compostos de origem predominantemente marinha, que foram formados em ambientes de precipitação química (FONSECA e VIANNA, 2012). Na água, ocorre nas formas suspensa e dissolvida, variando conforme o pH e o potencial redox. Em condições anaeróbias, como nas águas subterrâneas, frequentemente são encontrados níveis elevados de manganês dissolvido. Este metal é um nutriente essencial para o ser humano em pequenas quantidades, mas a exposição crônica pode ocasionar efeitos neurológicos e neuropsiquiátricos, como alucinações, instabilidade emocional, fraqueza, distúrbios de comportamento e da fala, alterações na expressão facial, tremores, ataxia, rigidez muscular e distúrbios de marcha (CETESB, 2022B).

O **zinco** é um metal-traço que ocorre naturalmente na crosta terrestre de forma isolada ou combinada com outros elementos. Ele é um elemento necessário para o organismo em pequenas quantidades, entretanto, em excesso, pode provocar cólicas estomacais, náuseas e vômitos e casos de ingestão aguda e, a longo prazo, pode provocar anemia, danos ao pâncreas e diminuição do colesterol HDL (CETESB, 2017B).

A **turbidez** representa o nível de interferência com a passagem da luz através da água e é uma excelente ferramenta para avaliação ambiental, no que se refere à quantidade de material particulado presente nas águas. Quando de origem natural, não traz consigo questões sanitárias diretas, mas os materiais suspensos podem servir de abrigo para os microrganismos patogênicos e uma redução na eficiência da desinfecção, além de conferir aspecto desagradável à água. Sua origem antropogênica pode estar associada a compostos tóxicos e a organismos patogênicos (VON SPERLING, 2005).

3.4 Índices de qualidade

Na literatura, existem diversos conceitos de indicadores e, provavelmente, a forma mais compreensível consiste na definição de variáveis capazes de condensar informações relevantes. Em geral, essas informações são reduzidas a um número capaz de descrever o estado de um fenômeno ou dos ambientes em que se inserem, constando de indicadores quantitativos. Por outro lado, na vida cotidiana os indicadores qualitativos assumem papel de destaque, como: a classificação das praias em relação à balneabilidade como *própria* ou *imprópria*; a qualidade do ar nas grandes metrópoles que se apresentam como *boa*, *regular*, *ruim*, *péssima* ou *crítica* e o saldo bancário, classificado como *positivo* ou *negativo*. Vale ressaltar que diversos indicadores qualitativos correspondem a indicadores ou variáveis quantitativas.

Para a Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OCDE (1993), um indicador pode ser definido como um parâmetro, ou um valor derivado de um parâmetro, que descreve um estado de um fenômeno do meio ambiente ou de uma zona geográfica. Tal indicador tem um significado além da informação diretamente emitida pelo valor do parâmetro (CREDES, 1993). Além disso, a construção de indicadores é um meio eficaz para prover as políticas com informações que

demonstrem seu desempenho ao longo do tempo, além de auxiliar em previsões. Dessa forma, os indicadores podem ser utilizados para a promoção de políticas específicas e no monitoramento de variáveis espaciais e temporais das ações públicas (WILL e BRIGGS, 1995).

Segundo Meadows (1998), os indicadores são imprescindíveis para o fluxo de informações utilizadas com o objetivo de entender o mundo, na tomada de decisões e no planejamento das ações. Como eles estão no centro do processo de tomada de decisão, os indicadores devem conter algumas características importantes como: precisão; ser de fácil compreensão; conter informações suficientes e ser viáveis, com mensuração a um custo razoável.

Quanto aos índices, estes são desenvolvidos com a finalidade de integrar, comunicar e facilitar a interpretação de dados (HURLEY *et al.*, 2012). Para tal, um índice sintetiza em uma única variável as informações de diversas variáveis utilizadas para medir um determinado fenômeno (MINGOTI, 2017). De acordo com Siche *et al.* (2007), indicador e índice podem ser considerados sinônimos, em uma análise superficial, mas a diferença para os pesquisadores se encontra no fato de que um índice se constitui de um valor final, que provém de um procedimento de cálculos a partir de variáveis, que podem, inclusive, serem indicadores.

Sabe-se que a água é o recurso mais essencial para a vida, sendo utilizada para consumo humano, irrigação, dessedentação de animais, recreação, piscicultura, uso industrial e atividades minerárias, além da preservação e equilíbrio natural das comunidades aquáticas, navegação e harmonia paisagística. Dada a relevância desse recurso, é de extrema importância o desenvolvimento de uma ferramenta capaz de converter dados de múltiplos parâmetros em informações compreensíveis para toda a população, sejam ou não técnicos, visto que as abordagens tradicionais não garantem uma visão completa da situação da qualidade da água (DIOP *et al.*, 2023).

Em síntese, como vantagens gerais dos índices podem ser citadas a capacidade de sintetizar as medidas de uma gama de variáveis em um único número, a possibilidade de combinar medidas com unidades distintas em uma métrica única e a facilidade na comunicação dos resultados. Como pontos desfavoráveis, estão inclusas a perda de informações sobre as variáveis individuais, a sensibilidade dos resultados para a

formulação do índice, a perda de informações a respeito de interações entre variáveis e a falta de portabilidade dos índices para ecossistemas diferentes (ZANDBERGEN e HALL, 1998).

3.4.1 Índices de qualidade da água

As abordagens usuais utilizadas na verificação da qualidade da água comparam os valores dos parâmetros, analisados experimentalmente, com os valores preconizados pelas diretrizes existentes, de acordo com o uso para o qual a água é destinada (BOYACIOGLU, 2007). Tais relatórios de qualidade da água costumam ser demasiadamente técnicos e detalhados, sem uma imagem completa e interpretada da qualidade. Nesse sentido, com o objetivo de descrever a situação geral dos corpos hídricos, têm sido desenvolvidos diversos índices de qualidade da água, sendo a maioria deles baseada na formulação original do IQA (OCAMPO-DUQUE *et al.*, 2006). Portanto, um índice de qualidade da água é capaz de resumir dados complexos da qualidade da água, facilitando a comunicação com o público em geral (CCME, 2001; CASH E WRIGHT, 2001).

A formulação original utilizada para o cálculo do IQA foi desenvolvida por Horton (1965) e revisada pela *National Science Foundation* (NSF) em 1970. Tal formulação considera a média ponderada de alguns parâmetros pré-estabelecidos e normalizados em uma escala de 0 a 100. Nesse método, são considerados os pesos relativos correspondentes a cada parâmetro (VON SPERLING, 2005).

No Brasil, o IQA foi adaptado pela CETESB, tendo como principal objetivo a sua utilização para o abastecimento público. Sua criação foi baseada em uma pesquisa de opinião, com a participação inicial de 142 especialistas em qualidade de águas e esses profissionais indicaram as variáveis a serem consideradas, o peso relativo e a condição com que se apresenta cada parâmetro, de acordo com uma escala de valores ponderados. Foram propostos inicialmente 35 parâmetros, dos quais nove foram selecionados: Coliformes termotolerantes ou *E.coli*, pH, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total, Fósforo Total, Temperatura, Turbidez, Resíduo Total e Oxigênio Dissolvido (OD). Ainda, cada profissional estabeleceu curvas de variação da qualidade das águas, de acordo com o estado ou a condição de cada parâmetro. As curvas de variação foram sintetizadas em um conjunto de curvas

médias para cada parâmetro e estão apresentadas com seus pesos relativos correspondentes no ANEXO C. Por fim, o cálculo do IQA é realizado pelo produtório ponderado das qualidades de água de cada uma das variáveis que integram o índice, de acordo com a Equação 1 (CETESB, 2022).

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

Em que:

IQA: Índice de Qualidade das Águas, um número entre 0 e 100;

qi: qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida;

wi: peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1, atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade,

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

Por fim, é possível determinar a qualidade das águas naturais a partir do IQA, que varia de 0 a 100, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Classificação do IQA

Categoria	Ponderação
ÓTIMA	79 < IQA < 100
BOA	51 < IQA ≤ 79
REGULAR	36 < IQA ≤ 51
RUIM	19 < IQA ≤ 36
PÉSSIMA	IQA ≤ 19

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

O Índice de Qualidade da Água Bruta (IQAB) teve como objetivo a comparação da tratabilidade dos mananciais superficiais, afluentes a estações de tratamento de água (ETAs) convencionais. Tal estudo foi fundamentado no IQA desenvolvido pela NSF, a partir da metodologia Delphi (SOUZA e LIBÂNIO, 2009).

Também com o objetivo de analisar o desempenho das ETAs, foi desenvolvido o Índice de Qualidade de Água Bruta *Fuzzy* (IQABF), em uma nova abordagem do IQAB. Tal índice se baseia na lógica *Fuzzy*, buscando um modelo não determinístico e que é capaz de lidar com as incertezas, a não linearidade dos parâmetros e o

conhecimento dos especialistas. Quando comparado com o IQAB, o IQABF se mostrou mais restritivo, consistente na quantificação dos parâmetros e flexível para ajustes ao ser aplicado a seis mananciais da Região Sudeste (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

O Índice de Qualidade das Águas Brutas para Fins de Abastecimento Público (IAP), desenvolvido pela CETESB, corresponde ao produto da ponderação dos resultados do IQA e do Índice de Substâncias Tóxicas e Organolépticas (ISTO). O ISTO, por sua vez, é composto por parâmetros que indicam a presença de substâncias tóxicas - potencial de formação de trihalometanos (PFTHM), número de células de cianobactérias, cádmio, chumbo, cromo total, mercúrio e níquel – e por variáveis de caráter organoléptico - ferro, manganês, alumínio, cobre e zinco. Para cada parâmetro são criadas curvas de qualidade, atribuindo-se ponderações variando de 0 a 1. Para a construção de cada curva, o valor numérico 1,0 é associado ao limite inferior (LI) e o valor 0,5 ao limite superior (LS), o que resulta em uma curva decrescente. O LI de cada variável corresponde ao padrão de potabilidade e o LS ao padrão de qualidade de água doce Classe 3, da CONAMA 357/2005. Para os parâmetros em que o VMP da CONAMA 357/2005 é equivalente ao padrão de potabilidade, determinou-se o LS a partir do acréscimo das concentrações passíveis de remoção por tratamento convencional, de acordo com o *Drinking Water and Health*, ao VMP (CETESB, 2022).

Ao contrário da maioria dos índices de qualidade de água encontrados na literatura, que incluem etapas de subindexação e de ponderação (UDDIN *et al.*, 2021), o índice de qualidade de água desenvolvido pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (*Canadian Council of Ministers of the Environment – CCME*) (IQA_{CCME}), utiliza as medições dos parâmetros diretamente em funções matemáticas fixas, considerando todas as variáveis como igualmente importantes e com a facilidade de adaptação às legislações de cada país. Tal facilidade se deve à comparação dos resultados das análises hidroquímicas com valores ou padrões de referência que podem ser escolhidos por quem deseja aplicar o índice, sem utilizar curvas subjetivas de classificação como ocorre no IQA original. Essa proposta, além de permitir a flexibilidade na seleção das referências de qualidade da água e dos parâmetros - em termos de tipo, número e combinação de variáveis –, também permite selecionar o período de avaliação e o tipo de corpo hídrico, que pode ser córrego, rio, lago, aquífero etc. (CCME, 2001; LUMB *et al.* 2006; BOYACIOGLU, 2010; NIKOO *et al.* 2011;

SALCEDO-SÁNCHEZ *et al.*, 2016; DE ALMEIDA E DE OLIVEIRA, 2018). Tais características do IQA_{CCME} tornaram-no um dos índices mais populares no mundo e que tem sido aplicado a todas as matrizes de água (ALEXAKIS, 2022). Para sua aplicação, recomenda-se que sejam consideradas ao menos quatro variáveis, sem limitações quanto ao número máximo de variáveis ou amostras. O período escolhido depende da quantidade de dados disponibilizados, sendo o período de um ano o mais utilizado, visto que os dados normalmente são amostrados para refletir esse período (monitoramentos mensais ou trimestrais, por exemplo). Ademais, o IQA_{CCME} permite a combinação de dados de diferentes anos, principalmente quando o monitoramento de algum dos anos for incompleto, mas nesse cenário, haverá perda de algum grau de variabilidade. Por fim, o corpo d'água ao qual o índice for aplicado pode ser definido por uma estação de amostragem ou por várias estações diferentes. Quando aplicado em estações individuais, o funcionamento do índice será adequado apenas quando houver dados disponíveis suficientes; por outro lado, quanto maior o número de estações combinadas, mais generalizadas serão as conclusões a respeito da qualidade do corpo hídrico (CCME, 2001).

Por outro lado, como fragilidade do IQA_{CCME} pode ser citada a ausência de ponderação dos parâmetros na formulação final, que resulta em um igual efeito na pontuação final do IQA_{CCME} para diferentes parâmetros (RICKWOOD e CARR, 2009; LUMB *et al.*, 2006; OCAMPO-DUQUE *et al.*, 2006; HURLEY *et al.*, 2012; MOHEBBI *et al.*, 2013). Assim, desconsideram-se fatores importantes como o nível de toxicidade desses parâmetros e a complexidade de suas remoções, bem como a possível dificuldade na disposição final dos resíduos gerados no processo de tratamento de água. Outras fragilidades do IQA_{CCME}, elencadas por HURLEY *et al.* (2012), são a ausência de uma metodologia padronizada para a aplicação do índice e a não acomodação de frequências desiguais de amostragem entre os parâmetros analisados, que pode resultar em uma super-representação desses parâmetros no cálculo e, assim, ocasionar em uma pontuação enviesada.

Segundo Cash e Wright (2001), o IQA_{CCME} não foi desenvolvido com o objetivo de substituir uma análise detalhada dos dados de monitoramento e não deve ser utilizado como a única ferramenta de gestão dos corpos hídricos. O que ele fornece é uma

visão ampla do desempenho ambiental, por meio de resultados acessíveis tanto à comunidade em geral, quanto aos gestores técnicos.

O IQ_{ACCME} foi aplicado em diversas regiões em avaliações da qualidade da água superficial, por exemplo: em corpos hídricos de províncias canadenses (Ilha do Príncipe Eduardo, Nova Escócia, Nova Brunswick, Terra Nova e Labrador, Saskatchewan, Territórios do Noroeste, Alberta, Colúmbia Britânica, Manitoba) (KHAN *et al.*, 2003; KHAN *et al.*, 2004; KHAN *et al.*, 2005; DAVIES, 2006; LUMB *et al.*, 2006; HURLEY *et al.*, 2012); na bacia do rio Caístro na Turquia (BOYACIOGLU, 2010); no rio Tigre no Iraque (AL-JANABI, 2012); na calha do Rio das Velhas em Minas Gerais (SILVA, M. T. L., 2017) e no rio Joanes no estado da Bahia (DE ALMEIDA e DE OLIVEIRA, 2018); (na bacia do rio Coruh na Turquia (BILGIN, 2018); na bacia do rio Mesta na Grécia e Bulgária (GIKAS, 2020; YOTOVA *et al.*, 2021); no rio Ganges da Índia (TIWARI, 2022); na bacia do rio Paraopeba no estado de Minas Gerais (FONSECA, 2023).

3.4.2 Índices de qualidade de água subterrânea

De acordo com Vadiati *et al.* (2016), muitas das pesquisas desenvolvidas sobre índices de qualidade focaram em águas superficiais, enquanto os estudos sobre as águas subterrâneas foram pouco explorados. Além disso, o desenvolvimento de um índice específico e apropriado para essa matriz continua sendo um desafio, visto que existem deficiências na seleção e ponderação dos parâmetros a serem incluídos, na interpretação, na metodologia de cálculos e nas faixas de aceitabilidade da qualidade da água. Os autores ressaltam ainda que a seleção de parâmetros depende do propósito e da capacidade de avaliação dos parâmetros por parte da equipe técnica. Outro aspecto importante é que essa seleção deve incluir os parâmetros mais adequados aos ambientes locais, relacionados à qualidade das águas subterrâneas.

Pei-yue *et al.* (2010) avaliaram a qualidade das águas subterrâneas no condado de Pengyang na China, com base em um índice de qualidade de água melhorado. Tal índice considerou os seguintes parâmetros em seu cálculo: cloreto, sulfato, pH, demanda química de oxigênio (DQO), SDT, dureza total, nitrato, nitrogênio amoniacal, fluoreto, ferro total, arsênio, iodo, alumínio, nitrito, ácido metasilícico e dióxido de carbono livre. Para a atribuição de peso a cada parâmetro, foi utilizado um método de

entropia de informação. Os autores realizaram a seleção dos parâmetros com base no uso e ocupação do solo e no potencial de desenvolvimento da região nos setores agrícola e industrial, o que justifica em partes a seleção. Todavia, para uma maior representatividade, talvez fosse mais relevante considerar alguns agroquímicos de maior uso na região no lugar do ácido metassilícico e do dióxido de carbono livre.

Por outro lado, Jha *et al.* (2020) propuseram uma avaliação da qualidade das águas subterrâneas a partir de uma estrutura híbrida, unindo a Lógica *Fuzzy* – capaz de lidar com as incertezas envolvidas na avaliação de problemas ambientais - e o Sistema de Informações Geográficas (SIG), que se mostra uma ferramenta econômica na análise da qualidade das águas subterrâneas e sua variabilidade em maior escala. O estudo investigou a interferência das monções nas águas subterrâneas e a sua variabilidade espacial no distrito de Tiruchirappalli, Índia. Foram considerados sete parâmetros para a qualidade das águas subterrâneas: SDT, NO_3^- , Na^+ , Cl^- , potássio, fluoreto e dureza. Foi verificado que os parâmetros Ca^{2+} , Mg^{2+} e SO_4^{2-} permaneceram dentro dos limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS) para potabilidade durante todo o ano, enquanto os parâmetros SDT, NO_3^- , Na^+ , Cl^- , K^+ , F^- e dureza excederam os limites permitidos pré e pós-monção. Observou-se que existe uma piora na qualidade da água pós-monção, resultante das contaminações provenientes das indústrias, da mineração, da disposição de resíduos e das atividades agrícolas que ocorrem nas estações das monções. Os autores concluíram que a tomada de decisão baseada na *Lógica Fuzzy* é confiável e pragmática para a avaliação e análise da qualidade das águas subterrâneas em grande escala, podendo servir de ferramenta útil para o planejamento e tomadas de decisão dos órgãos competentes.

Toledo e Nicoletta (2002) estabeleceram um IQA baseado na técnica multivariada da análise fatorial, visando avaliar a qualidade da água em microbacias sob diferentes usos. Tal método permitiu a seleção das variáveis mais representativas para o corpo hídrico, o que favoreceu a definição de um indicador mais sensível para fins de monitoramento e a avaliação das alterações desses corpos hídricos. Além disso, o método favoreceu a interpretação dos dados de forma exploratória, por uma dimensão reduzida do espaço original dos parâmetros.

Liu *et al.* (2021) compararam a eficiência da Metodologia Delphi e dos métodos de análise de estatística multivariada, por meio da análise de componentes principais, para a avaliação da qualidade das águas subterrâneas do manancial de Dawu, na China. Em tal pesquisa, as duas metodologias que podem ser utilizadas na elaboração de índices de qualidade de água foram comparadas ao monitoramento completo, de forma a verificar a representatividade dos dois índices em avaliação. Nesse sentido, os resultados apontaram que a aplicação do método estatístico apresentou uma classificação mais representativa do monitoramento completo que a metodologia Delphi.

O IQA_{CCME} também tem sido aplicado em avaliações da qualidade da água subterrânea ao redor do mundo, conforme consolidado na Tabela 1. Vale ressaltar que, embora cada um dos estudos leve em consideração um conjunto específico de parâmetros, é possível traçar um comparativo entre índices no que se refere à capacidade de representação e de atuação como balizadores de mananciais subterrâneos, dentro das áreas de estudos propostas.

Tabela 1 – Aplicação do IQA_{CCME} em estudos de águas subterrâneas

Autores	Área de estudo	Proposta	Normativas e Parâmetros adotados	Conclusões
Mohebbi et al. (2013).	Áreas urbanas do Irã.	IQA _{CCME} modificado, considerando fatores de peso para os parâmetros de entrada em sua formulação. O índice proposto foi aplicado na avaliação da qualidade da água dos poços que abastecem as regiões urbanas do Irã em 2011 e para a atribuição dos pesos adequados foi utilizada a metodologia Delphi, contando com um painel de especialistas de todo o país em análise.	<i>Chemical Specifications of Drinking Water - Institute of Standards and Industrial Research of Iran - ISIRI 2009;</i> 25 parâmetros: Al, NH ₄ ⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻ , dureza total, Fe, Mg ²⁺ , pH, Na ⁺ , SO ₄ ²⁻ , SDT, Zn, As, Cd, Cr, Cu, coliformes fecais, F ⁻ , Pb, Mn, Hg, NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ e turbidez.	A situação geral da qualidade da água subterrânea foi classificada como boa. A análise de sensibilidade indicou que a formulação do índice foi desenvolvida corretamente e a remoção dos parâmetros de entrada mais violadores alterou a pontuação do índice na direção esperada.
CHONATTU, J. et al, 2016.	Distrito de Kozhikode, estado de Kerala, Índia.	Aferição do impacto gerado por um aterro de resíduos sólidos nas águas subterrâneas por meio da amostragem aleatória em 18 poços, em um raio de 0,5 km, assim como a caracterização de amostras de lixiviado. Foi proposta a distribuição espacial de diferentes parâmetros, dos resultados do IQA _{CCME} e do índice de poluição por lixiviados na área de estudo.	<i>BIS 2012 (Bureau of Indian Standards for drinking water);</i> 18 parâmetros: pH, condutividade elétrica, dureza total, alcalinidade total, SDT, COD, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Fe, Cu, Zn, Mn e Cd.	Os estudos revelaram a deterioração da qualidade das águas devido à percolação dos lixiviados e os resultados mostraram que os poços próximos ao aterro foram os mais afetados pela percolação de chorume. Quanto à classificação pelo IQA _{CCME} , a maior parte dos poços tinham uma qualidade ruim ou péssima e a maioria dos parâmetros apresentou uma relação inversa entre concentração e distância do aterro.
SALCEDO-SÁNCHEZ et al., 2016.	Vale de Puebla, no México.	Avaliação espacial e temporal da qualidade da água na área urbana do aquífero Vale de Puebla com base no IQA _{CCME} , através de dados históricos e atuais (1997, 2000, 2002, 2005, 2011 e 2013).	<i>Mexican standards (NOM-127- SSA1– 1994) e Guia para água potável da OMS de 2008 - WHO (2008);</i> 9 parâmetros: pH, SDT, dureza total, SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , NO ₃ ⁻ .	Detectou-se que a qualidade do aquífero está sendo afetada pelo esgotamento do aquífero superior, com redução dos níveis piezométricos, visto que a água do aquífero profundo tem se misturado com a água do aquífero superior. As águas do aquífero profundo são ricas em sulfatos, cálcio, magnésio e SDT, resultantes da dissolução de minerais sulfatados e carbonatados, característicos da geologia local. Os autores ressaltam a importância de implementar condições sustentáveis de operação dos poços de abastecimento.
UDDIN, et al. 2017.	Área da Usina Nuclear de Rooppur em Bangladesh.	Aplicação do IQA _{CCME} para análise da qualidade da água subterrânea de 17 poços distribuídos homogeneamente pela área de estudo, amostrados em janeiro de 2017 e identificação dos parâmetros críticos durante o período estudado.	<i>BDS 2000 (Bangladesh Standards);</i> 22 parâmetros: Temperatura, pH, condutividade elétrica, alcalinidade, Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , OD, DBO, DQO, <i>E. coli</i> , Pb, Cr, Mn, Fe, Cu, Cd e As.	O índice se mostrou uma ferramenta efetiva e conveniente para a avaliação da área. Todos os poços ficaram classificados como péssimos ou ruins e, no geral, a área ficou qualificada como péssima, reflexo do fluxo de águas residuárias agrícolas e industriais da região. Os parâmetros mais importantes para a categorização foram: temperatura, condutividade elétrica, OD e pH.

MENEZES, J. M. <i>et al.</i> , 2018.	Bacia Hidrográfica do Rio São Domingos no estado do Rio de Janeiro, Brasil.	Desenvolvimento de um Índice de Qualidade de Água Subterrânea para Consumo Humano (IQAS _{CH}), aplicável a áreas de aquíferos cristalinos sob uso agrícola e comparação com os resultados obtidos com os índices IQA _{CCME} e SEQ <i>Eaux Souterraines</i> . Foram analisados 37 pontos de águas de aquíferos rasos (nascentes e poços escavados) e 10 poços tubulares.	CONAMA nº 396/2008, Portaria nº 518/2004, SEQ- <i>Eaux Souterraines</i> (2003), <i>Australian Drinking Water Guidelines</i> 6 (NHMRC/NRMMC, 2003), Norma 98/83/CE; 25 parâmetros: Coliformes termotolerantes, condutividade elétrica, dureza total, Fe, Mn, NO ₃ ⁻ , pH, turbidez, SS, As, Ba, F ⁻ , Aldrin, Clorpirifós, Diazinon, Diclorvós, Endossulfan (alfa e beta), Fenitrothion, Fentoato, Lindano, Malation, Metilparation, Metolocloro e Pesticidas estabelecidos pela Diretiva 98/83/CE.	As classificações dos poços pelo IQA _{CCME} e SEQ <i>Eaux Souterraines</i> se mostraram menos restritivas que a do IQAS _{CH} . O estudo apontou para a necessidade de investimento em saneamento e educação ambiental na área de estudo a fim de evitar o agravamento da contaminação das águas subterrâneas, principalmente do aquífero raso.
HAIDER <i>et al.</i> , 2019.	Cidade de Unayzah, província de Qassim, Arábia Saudita.	Proposição de um IQA _{CCME} modificado para avaliar a qualidade espaço-temporal da água desde a fonte de água subterrânea até os sistemas de tratamento e redes de distribuição em pequenos sistemas, considerando a necessidade da ausência dos parâmetros microbiológicos para atendimento aos padrões de qualidade de água potável, entre os anos 2016, 2017 e 2018.	Guia para água potável da OMS de 2011 - WHO (2011); 10 parâmetros: SDT, pH, Turbidez, NH ₃ , NO ₂ ⁻ , Fe, cloro livre, coliformes totais, <i>E. coli</i> , estreptococos fecais.	A aplicação do IQA _{CCME} modificado revelou que os distritos mais remotos apresentaram qualidade inferior aos localizados próximos às estações de tratamento. O estudo revelou ainda que fonte, tratamento e distribuição apresentaram falhas na qualidade ao longo do período de avaliação.
MESTER <i>et al.</i> , 2020.	Município de Báránd, na Hungria.	Avaliação das alterações na qualidade das águas subterrâneas de um assentamento após a construção de uma rede de esgoto em 2014, com base nos índices IQA _{CCME} , IQA desenvolvido por Rapant <i>et al.</i> (1995) (C _d) e IQA desenvolvido por Brown <i>et al.</i> (1970) (<i>water quality status</i> – WQS). As amostragens ocorreram em 2013 e em 2017, 2018 e 2019.	Diretiva quadro da água (2000/60/EC); 8 parâmetros: pH, condutividade elétrica, NH ₄ ⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , COD e Na ⁺ .	Os três índices detectaram uma forte poluição das águas subterrâneas do assentamento antes da construção da rede de esgoto (2013). Após, houve uma melhora nesse cenário, dada a redução das amostras contaminadas nos anos de 2017, 2018 e 2019. Foram encontradas correlações significativas entre os três índices analisados, sendo as correlações mais fortes entre o IQA _{CCME} e o C _d (r = 0,853). As diferenças observadas entre os índices se devem à ponderação do índice WQS, que respondeu de forma mais sensível aos valores de NH ₄ ⁺ e PO ₄ ³⁻ .
AL-HAMDANI <i>et al.</i> , 2021.	Cidade de Mosul, no Iraque.	Aplicação do IQA _{CCME} para a determinação da qualidade da água subterrânea do distrito de Hamdaniyah, Mosul, no Iraque.	Guia para água potável da OMS de 2004 - WHO (2004); 9 parâmetros: pH, SDT, alcalinidade, dureza total, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ e NO ₃ ⁻ .	Cerca de 50% dos poços analisados não apresentaram águas adequadas para o consumo humano. Os autores recomendam o monitoramento periódico dessas fontes.

AL-MASHHADANY, 2021.	Aldeia de Shouira, no Distrito de Talafar, no Iraque.	Aplicação do IQA _{CCME} para análise da qualidade da água subterrânea de dez poços para consumo humano na Aldeia de Shouira	13 parâmetros: pH, O ₂ , SDT, alcalinidade, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , K ⁺ , Cl ⁻ , PO ₄ ³⁻ , SO ₄ ²⁻ , TPC (<i>Total Plate Count</i>) e coliformes fecais.	Os resultados das análises mostraram que as águas subterrâneas da região não são potáveis, visto que foram enquadrados na categoria péssima.
ALEXAKIS, 2022.	Ilha do Egeu, Rodes, Grécia.	Aplicação do IQA _{CCME} e da análise fatorial para verificação da qualidade da água subterrânea de 27 poços dos aquíferos de uma ilha de Rodes, durante duas campanhas de amostragem (2019 - 2020).	Diretiva (98/83/EC); 14 parâmetros: pH, condutividade elétrica, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ²⁻ , NH ₄ ⁺ e SO ₄ ²⁻ .	A maioria das estações de monitoramento foram classificadas como excelentes pelo IQA _{CCME} entre 2019 e 2020. Os parâmetros que mais contribuíram para a variância nos conjuntos de dados e que controlaram o IQA _{CCME} foram: condutividade, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ e NA ⁺ , atribuídos ao processo de intrusão marinha nas áreas costeiras. A associação da análise fatorial ao IQA _{CCME} se mostrou útil como ferramenta de monitoramento.
NAJEEB e SAEED, 2022.	Distrito de Hamdaniya, no Iraque.	Aplicação do IQA _{CCME} para análise da qualidade da água subterrânea de seis poços, amostrados mensalmente entre outubro de 2021 e março de 2022.	Guia para água potável da OMS de 2017 - WHO (2017); 21 parâmetros: turbidez, pH, OD, DBO ₅ , SDT, dureza total, condutividade elétrica, alcalinidade, NO ₃ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , SO ₄ ²⁻ , K, Na, Cl ⁻ , Cd, Fe, Ni, Cu e Zn.	Todos os poços apresentaram águas impróprias para o consumo devido às altas concentrações de SDT, dureza total, NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ e Cl ⁻ . Os autores atribuíram a deterioração da qualidade da água à seca e ressaltaram a impossibilidade de uso das fontes de água subterrânea para fins potáveis sem tratamento adequado.
POPUGAEVA <i>et al.</i> , 2022.	Maciço Alcalino de Khibiny, na Rússia	Investigação das tendências temporais, padrões de variabilidade e o nível de associações entre as variáveis analisadas, por meio da análise quimiométrica do conjunto de dados de 1999-2018, da aplicação de correlação e regressão múltipla, do IQA _{CCME} , da análise espectral baseada no algoritmo da transformada de Fourier e do teste de <i>outlier</i> de Grubbs.	Guia para água potável da OMS de 2018 - WHO (2018); 12 parâmetros: pH, SDT, turbidez, cor, dureza total, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Al e F-	Os estudos apoiam a hipótese de que os níveis de alumínio aumentam ao longo do tempo devido a processos naturais. A avaliação quantitativa do conjunto de dados de 19 anos não revelou evidências de novas influências antropogênicas, que poderiam contribuir para a degradação da qualidade das águas subterrâneas de Khibiny.

3.4.3 Índices de qualidade de água subterrânea aplicados a áreas de mineração

Ao realizar um recorte nos índices de qualidade de águas subterrâneas, foi possível encontrar alguns estudos com foco em áreas minerárias, conforme apresentado na Tabela 2.

Dado o contexto hidrogeológico do Estado de Minas Gerais, atrelado ao elevado número de outorgas subterrâneas cadastradas - 17.272 portarias de outorgas vigentes até o final de 2019 (IGAM, 2020) -, nota-se a relevância de um monitoramento contínuo da qualidade das águas subterrâneas. Esse monitoramento tem como finalidade garantir que esse recurso atenda aos limites preconizados pelas normativas vigentes, para cada um dos usos aos quais ele seja destinado. Nesse sentido, o desenvolvimento do IQA_{SUB} é de grande aplicabilidade, considerando os aspectos de maior relevância para as características naturais das águas subterrâneas de Minas Gerais, o que pode facilitar na visualização das informações acerca da qualidade da água e na gestão desse recurso.

Tabela 2 – IQAs aplicados em estudos de águas subterrâneas em área de mineração

Autores	Área de estudo	Tipo de exploração minerária	Proposta	Normativas e Parâmetros adotados	Conclusões
SAHOO e KHAOASH, 2020.	Cidade de Brajrajnagar, na Índia.	Carvão	Investigação da qualidade da água subterrânea e superficial em uma área de mineração de carvão de Brajrajnagar no verão de 2015 e verificação da adequação para fins potáveis, industriais e agropecuários. Com base na hidroquímica, foram determinados o IQA, o índice de poluição por metais-traço (HPI) e o índice de avaliação de metais-traço para classificar a qualidade geral para consumo humano (HEI).	BIS 2012 (Bureau of Indian Standards for drinking water); 28 parâmetros: pH, condutividade elétrica, SDT, dureza total, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , NO ₃ ⁻ , F ⁻ , HCO ₃ ²⁻ e SO ₄ ²⁻ , B, Al, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Cd, Ba e Pb.	O estudo detectou que a qualidade das águas subterrâneas não foi afetada pelas atividades minerárias, mas que houve contaminação das águas superficiais.
KUMAR e KRISHNA, 2021.	Distritos de Ramgarh e de Hazaribagh, no estado de Jharkhand, na Índia.	Carvão	Investigação da qualidade da água subterrânea e a sua contaminação na região de mineração de carvão dos distritos de Ramgarh e Hazaribagh, Jharkhand, Índia, por meio da aplicação de um IQA, associado a um sistema de informação geográfica (SIG) e ao sensoriamento remoto (SR).	BIS 2003 (Bureau of Indian Standards for drinking water); 12 parâmetros: pH, condutividade elétrica, turbidez, alcalinidade, dureza total, SDT, OD, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , NO ₃ ⁻ , Fe e Mn.	A qualidade da água avaliada no período pré-moção teve 68,89% das amostras com qualidade excelente ou boa e no período pós -moção, 74,19% das amostras apresentaram qualidade excelente ou boa. Os autores atribuem a melhora da qualidade à diluição dos contaminantes, devido ao aumento da infiltração. As técnicas geoespaciais se apresentaram como ferramentas eficazes para gerar mapas espaciais e na identificação de zonas de diferentes níveis de contaminação.
DIOP <i>et al.</i> , 2023.	Comunas de Sabodala e Tomboronkoto, na região de Kedougou, Senegal.	Ouro	Desenvolvimento e aplicação de um IQA para avaliação das águas subterrâneas para fins potáveis, nas áreas de mineração de ouro no sudeste do Senegal. O principal objetivo foi a verificação de impactos da atividade nesse recurso. O índice desenvolvido foi aplicado também em estações de referência, a fim de comparação.	Guia para água potável da OMS de 2008 - WHO (2008); 12 parâmetros: pH, condutividade elétrica, turbidez, Mg ²⁺ , Ca ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , NO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Mn, As, Hg.	O índice se mostrou simples e útil para a área proposta e foi capaz de converter as informações de múltiplos parâmetros em um resultado compreensível para a população. A aplicação do índice na área de estudo revelou que os poços apresentam qualidade péssima ou ruim, enquanto nos poços de referência a qualidade foi classificada como boa ou excelente.

Fonte: Autora (2024)

3.4.4 Análise de *Clusters* e Análise dos Componentes Principais (ACP)

A análise de *clusters*, também conhecida como análise de agrupamentos ou análise de conglomerados é um conjunto de técnicas exploratórias capaz de verificar comportamentos semelhantes entre as observações, em relação às variáveis analisadas. O objetivo de tais métodos é a criação de um número pequeno de grupos, ou *clusters*, que sejam homogêneos internamente, heterogêneos entre si e que sejam capazes de representar o comportamento conjunto das observações a partir das variáveis inseridas na análise. É importante ressaltar que a aplicação das técnicas exploratórias, ou de interdependência, não apresentam caráter preditivo para outras observações não inseridas na análise e, caso sejam inseridas novas observações ou novas variáveis, a reaplicação da modelagem se torna necessária. Também é válido enfatizar que a formação de clusters é bastante sensível à presença de *outliers* e que a retenção ou exclusão desses dados na base depende dos objetivos da pesquisa e da natureza das observações. As observações discrepantes devem ser excluídas se porventura elas representarem aberrações e formarem *clusters* pequenos, mas elas devem ser consideradas, caso representem grupos relevantes, ainda que diferentes dos demais registros (FÁVERO e BELFIORE, 2017).

Ainda segundo Fávero e Belfiore (2017), a aplicação da análise de *cluster* parte da definição dos objetivos da pesquisa. A seguir, escolhe-se a medida de distância ou de semelhança, que serve de embasamento para considerar as observações menos ou mais próximas e determina-se o esquema de aglomeração, que pode seguir os métodos hierárquicos ou não hierárquicos. Os métodos hierárquicos permitem a identificação do ordenamento e da alocação das observações, o que possibilita definir a quantidade de agrupamentos formados. Em contrapartida, os métodos não hierárquicos partem de uma quantidade conhecida de *clusters*, sendo o *k-means* o esquema de aglomeração mais utilizado.

O algoritmo *k-means* corresponde a um método de agrupamento simples, capaz de processar grandes quantidades de dados e de classificá-los em *clusters* (*k*). A formação dos grupos é baseada no ponto central de cada *cluster* (centroide) e a alocação dos pontos em um agrupamento específico é balizada pela similaridade dos dados. Por outro lado, busca-se minimizar a similaridade das informações pertencentes a *clusters* distintos, sendo essas medidas de similaridade calculadas em

função das distâncias. Uma questão sensível do *k-means* é a determinação do número de *clusters* e uma técnica utilizada nesse processo é método de *elbow* ou método do cotovelo. Este método testa a variância dos dados em relação ao número de agrupamentos, sendo a quantidade ideal correspondente àquela com um menor *Within Sum of Squares* (WSS) e também ao menor número de *clusters*, ou seja, o ponto de envergadura ideal ou “cotovelo” da curva (NAINGGOLAN *et al.*, 2019).

A contar da definição do número ideal de agrupamentos, aloca-se as observações nos *clusters*, de acordo com sua proximidade do centroide. A seguir, realiza-se a avaliação da representatividade de cada variável para a formação destes e as observações são transferidas até que não seja mais possível a realocação por proximidade ao centroide de outro *cluster* (MINGOTI, 2017). Ao fim do processo, é possível analisar, interpretar e comparar os resultados obtidos (FÁVERO e BELFIORE, 2017).

Pesquisas relacionadas a aquíferos costumam envolver a análise de grandes conjuntos de dados e técnicas de redução de dimensão são usualmente utilizadas, para uma maior representatividade dessas informações (SANTOS, 2020). Nesse sentido, a análise dos componentes principais (ACP) é uma das ferramentas mais utilizadas dentre os procedimentos associados à análise fatorial, com o intuito de extrair fatores a partir da matriz de correlações de *Pearson*.

A ACP foi introduzida por *Karl Pearson* em 1901 e fundamentada em 1933 no artigo de Hotelling. A técnica tem como objetivo explicar a estrutura de variância e covariância de um vetor aleatório, constituído por *p*-variáveis aleatórias. Tal processo se dá pela construção de combinações lineares das variáveis originais, chamadas componentes principais (CP) que não se correlacionam entre si. É possível obter *p* componentes principais para *p*-variáveis originais, mas o objetivo em geral é obter uma redução do número das variáveis que serão avaliadas (MINGOTI, 2017).

A Tabela 3 apresenta alguns trabalhos que utilizaram a análise de *clusters*, associadas ou não à ACP, na avaliação da qualidade da água para diferentes matrizes e finalidades de uso. Como um aspecto geral, todos os estudos apresentados relataram que tais abordagens estatísticas multivariadas se mostraram como ferramentas eficazes e robustas na avaliação da qualidade das águas, sejam elas subterrâneas, superficiais ou tratadas.

Tabela 3 – Aplicação da análise de *clusters*, associada ou não à ACP na avaliação da qualidade de água

Autores	Área de estudo	Proposta	Método adotado para a análise de <i>clusters</i>	Conclusões
WANG. <i>et al.</i> , 2012	Rio <i>Xiangxi</i> , na China	Associação da análise de <i>clusters</i> , análise de componentes principais (ACP), análise fatorial e análise discriminante para avaliar as variações espaço temporais da qualidade da água no rio <i>Xiangxi</i> .	Hierárquico	Os estudos apontaram para uma boa qualidade da água em áreas florestais e para uma elevada concentração de nitrogênio em áreas agrícolas. Quanto às variações na qualidade da água, estas foram relacionadas a processos naturais de dissolução das rochas, a fontes pontuais de poluição por fósforo, às atividades agrícolas e aos lançamentos de efluentes domésticos no corpo hídrico. Os autores destacam que o material obtido pelos agrupamentos pode ser utilizado na redução dos locais de amostragem, sem que haja muita perda de informação.
NAZIR <i>et al.</i> , 2016	<i>Punjab</i> , no Paquistão	Avaliação da qualidade da água das tubulações em oito distritos ao sul de <i>Punjab</i> por meio do IQA _{CCME} , associado à análise de <i>clusters</i> e à ACP.	Não-hierárquico, <i>k-means</i>	A ACP em conjunto com a análise de <i>cluster</i> e com o IQA _{CCME} se apresentaram como técnicas úteis na avaliação das informações relativas às fontes de poluição da água. Os autores ressaltam que tais ferramentas podem ser úteis para tomadores de decisão no estabelecimento de diretrizes para a gestão dos recursos hídricos.
KHALID <i>et al.</i> , 2019	Baluchistão, no Paquistão	Avaliação dos impactos das olarias na qualidade da água subterrânea, para fins potáveis e irrigação, em três distritos do Baluchistão. Para a análise foram utilizados um IQA proposto, associado a análises estatísticas multivariadas - análise de <i>clusters</i> e ACP.	Hierárquico	As abordagens estatísticas multivariadas foram relevantes na identificação da fonte de poluição, na verificação da variabilidade espacial e da interrelação entre diferentes variáveis. Os estudos revelaram a influência da composição geológica e de atividades antrópicas como atividades agrícolas e das olarias da região. Por fim, a utilização do IQA, associado às ferramentas de estatística, foram capazes de fornecer um panorama abrangente acerca da qualidade da água.
MARÍN CELESTINO <i>et al.</i> , 2019	Vale do <i>Mezquital</i> , no México	Avaliação da qualidade da água subterrânea de 31 poços de água potável por meio do IQA associado à ACP e ao esquema de agrupamento <i>k-means</i> .	Não-hierárquico, <i>k-means</i>	A ACP e o agrupamento <i>k-means</i> se mostraram ferramentas eficazes para identificar processos hidrogeoquímicos. Três componentes definidos pela ACP, associados aos processos de salinização, mineralização e contaminação das águas subterrâneas, foram responsáveis por 85,1% da variância total do conjunto de dados hidroquímicos. O algoritmo <i>k-means</i> identificou duas classes de águas subterrâneas: uma caracterizada pela baixa qualidade e que necessita de tratamento avançado da água (IQA<70) e outra de melhor qualidade e que é adequada ao abastecimento após tratamento convencional (IQA entre 70 e 89).

SOLTANI, A. A. <i>et al.</i> , 2020	Barragem de <i>Beni Haroun</i> , na Argélia	Avaliação da qualidade da água da barragem de <i>Beni Haroun</i> por meio do IQA _{CCME} , associado à análise de <i>clusters</i> , ACP e ao método dos mínimos quadrados ordinários.	Não-hierárquico, <i>k-means</i>	A aplicação conjunta do IQA _{CCME} , ACP, método dos mínimos quadrados ordinários e análise de <i>clusters</i> se mostrou bastante útil na interpretação dos dados e na gestão da qualidade da água. Os autores destacaram a importância dessa associação, visto que as ferramentas forneceram resultados complementares: a estatística multivariada permitiu a interpretação das variações espaciais e temporais da qualidade da água em termos de fontes e parâmetros de poluição, enquanto o índice apresentou uma avaliação global da qualidade da água.
OBEIDAT e AWAWDEH, 2021	<i>Al-Zaatari</i> , na Jordânia	Avaliação da qualidade da água subterrânea na área circundante ao campo de refugiados de <i>Al-Zaatari</i> por meio da associação da análise de <i>clusters</i> com um IQA proposto.	Não-hierárquico, <i>k-means</i>	Os estudos revelaram que os principais processos que influenciaram as águas subterrâneas da área de estudo foram o intemperismo das rochas e os processos de troca iônica, sendo os impactos de origem antrópica limitados. Os autores destacam que os resultados obtidos podem embasar outras pesquisas, assim como auxiliar nas tomadas de decisão das autoridades competentes.
OUKIL, <i>et al.</i> , 2021	Bacia do <i>Sereflikochisar</i> , na Turquia	Proposição de um índice de qualidade da água a partir de uma estrutura baseada em análise envoltória de dados, média ponderada ordenada e esquema de agrupamento <i>k-means</i> . A metodologia foi aplicada na análise de 51 amostras de água.	Não-hierárquico, <i>k-means</i>	O índice proposto permitiu uma avaliação robusta e os poços da região ocidental tiveram suas águas classificadas como inadequadas, enquanto os da área nordeste, leste e sul tiveram águas classificadas como boa. O estudo evidenciou o efeito da salinização das águas subterrâneas, devido à proximidade dos poços ao lago Tuz, um dos maiores lagos hipersalinos do mundo.
KARANGO DA e NANAYAKK ARA, 2023	Distrito de <i>Ratnapura</i> , no Sri Lanka	Análise da qualidade da água subterrânea de <i>Ratnapura</i> para fins potáveis, por meio da associação da análise de <i>clusters</i> , análise de autocorrelação espacial, ACP e modelagem geoestatística com um IQA proposto.	Hierárquico	O estudo revelou que as águas subterrâneas se encontravam severamente deterioradas nas áreas leste e sudeste do distrito, relacionadas à elevada mineralização nas áreas secas. A associação dos métodos estatísticos com a análise espacial e o IQA se mostraram eficazes na avaliação da qualidade das águas subterrâneas de grandes áreas.

Fonte: Autora (2024)

4 METODOLOGIA

4.1 Avaliação da base de dados fornecida pelo IGAM e pré-seleção dos parâmetros

A base de dados fornecida pelo IGAM em outubro de 2022 conta com informações de monitoramento das redes Guarani, Norte de Minas, PANM e Velhas. Os dados das redes Urucuia e Bauru, operadas em parceria com a CPRM não foram disponibilizados.

Com relação à distribuição do conjunto de dados, a Tabela 4 apresenta de forma resumida o número de poços de cada uma das redes, número de parâmetros analisados, período e frequência de monitoramento.

Tabela 4 – Distribuição dos dados do IGAM entre os anos de 2005 e 2022

Rede	Nº de poços	Nº de parâmetros	Período	Frequência
Guarani	5	73	2009 a 2021, exceto 2020	Anual
Norte de Minas	61	68	2005 a 2022	Variável - Anual, semestral ou quadrimestral
PANM	24	73	2018 a 2022	Variável – Anual ou semestral
Velhas	38	73	2015 a 2022	Variável – Anual ou semestral

Fonte: Autora (2024).

Como a rede PANM passou a ser monitorada a partir de 2018, optou-se pela utilização dos dados entre os anos de 2018 e 2022, além desses dados representarem o cenário mais recente da qualidade da água das redes de monitoramento. Com essa limitação do intervalo de tempo, observou-se que alguns dos poços deixaram de ser monitorados nas redes Norte de Minas e Velhas, conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Distribuição dos poços monitorados nas redes do IGAM entre 2018 e 2022

Rede	Nº de poços
Guarani	5
Norte de Minas	58
PANM	24
Velhas	37

Fonte: Autora (2024).

Para a pré-seleção dos parâmetros, verificou-se quais deles foram monitorados em comum nas quatro redes e os excedentes foram excluídos. Com base nessa informação, foram verificados ainda quais os parâmetros possuem VMPs nas normativas consideradas: Portaria GM/MS nº 888/2021 e CONAMA nº 396/2008 (Consumo Humano, Dessedentação de Animais e Irrigação). Os parâmetros que não possuíam VMPs estabelecidos nas legislações foram desconsiderados, além dos metais dissolvidos daqueles metais que foram analisados nas frações totais e dissolvidas. A opção por metais totais parte do fato de que os metais dissolvidos correspondem apenas a uma fração do primeiro, tratando-se, portanto, de uma escolha mais conservadora.

O processo de pré-seleção resultou em 30 parâmetros, sendo eles: alumínio, arsênio, bário, boro, cádmio, chumbo, cloreto, cobre, cor verdadeira, cromo, dureza, *Escherichia coli*, fenóis totais, ferro, fluoreto, lítio, manganês, mercúrio, molibdênio, níquel, nitrato, nitrito, pH, selênio, sódio, sulfato, sulfeto, turbidez, vanádio e zinco. Vale ressaltar que, a exclusão de parâmetros não monitorados foi necessária para fins de cálculo do IQA_{SUB}. Entretanto, uma das funções de um índice é a indução do monitoramento de parâmetros considerados relevantes para determinado cenário. Assim, como a proposta do presente índice é a aplicação em áreas com potencial mineral, foi acrescido o urânio, ausente no monitoramento realizado pelo IGAM, mas presente em determinadas regiões de Minas Gerais. Como exemplo, podem ser citados: o Maciço Alcalino de Poços de Caldas ao sul do Estado (CAMARERO, 2021); o cráton São Francisco que abarca a região centro-sul (região de pegmatitos de São João del Rei e Ubá, passando por Araxá, Tapira e Salitre); composições de euxenita e policrásio em Rio Pomba e Ubá; inclusões de uraninita em cassiterita, uranocolumbita, Pb-tantalita e monazita ao norte de Minas Gerais; e pegmatitos berilíferos com idade de 531 ± 22 Ma em Santa Maria de Itabira (PIRES, 2013).

4.2 Desenvolvimento do IQA_{SUB}

O desenvolvimento do IQA_{SUB} foi inspirado na concepção do IQA, para a formulação do cálculo; do IQA_{CCME}, para a definição das categorias e ponderação; e do ISTO, para a construção das curvas (conforme elucidado no item 3.4.1 Índices de qualidade da água), porém, considerando parâmetros de relevância para a qualidade da água em áreas com potencial mineral. Foram considerados dez parâmetros, entre

substâncias tóxicas e organolépticas – arsênio, chumbo, mercúrio, nitrato, urânio, dureza, ferro, manganês, zinco e turbidez - que podem advir da dissolução de componentes da geologia local ou como resultado de atividades antropicas, e para cada um dos parâmetros foi atribuído um peso, de acordo com o nível de toxicidade e com a dificuldade de remoção por tratamentos convencionais, sendo o somatório dos pesos de todos os parâmetros igual a 1.

Parâmetros microbiológicos não foram considerados neste índice dada a facilidade de inativação em sistemas de tratamento convencionais que utilizam compostos de cloro como desinfetantes. Quanto aos pesticidas, estes não foram abarcados, tendo em vista que cada cultura possui parasitas específicos e, assim, agrotóxicos particulares voltados para o controle dessas pragas, dificultando a seleção de um parâmetro representativo para esta classe. Complexidade similar ocorre para a seleção de um parâmetro que represente os compostos orgânicos e outro que traduza os metabólitos que oferecem riscos à saúde humana.

As curvas de qualidade dos parâmetros selecionados foram construídas, considerando o limite inferior (LI), associado ao nível de qualidade $q_i = 100$, e o limite superior (LS), associado a $q_i = 1$. O LI utilizado para cada parâmetro foi o Limite de Quantificação (LQ) do seu respectivo método analítico, de acordo com os dados fornecidos pelo IGAM.

Já para a determinação do LS, foi considerado o menor VMP entre o preconizado pelo padrão de potabilidade da Portaria GM/MS nº 888/2021 e o recomendado pela Resolução CONAMA 396/2008 (Consumo Humano, Dessedentação de Animais e Irrigação), ou seja, o cenário mais conservador, acrescido da taxa de remoção média (TR) do parâmetro pelas estações de tratamento convencionais, conforme reportado em literatura. Foi considerada a coagulação por cloreto férrico ou por sulfato de alumínio, coagulantes mais utilizados pelas concessionárias, correspondendo a 68–73% do custo dos produtos químicos na ETA Rio das Velhas (R\$ 0,11/m³ em média, segundo dados da COPASA de 2017 a 2018, corrigidos pela inflação até 2022). Os demais produtos químicos utilizados na ETA Rio das Velhas são cal hidratada, cloro gasoso e ácido fluossilícico.

Por fim, as curvas dos parâmetros foram traçadas com o auxílio do Excel, adicionando-se a linha de tendência exponencial ajustada aos pontos para a obtenção da equação da curva de cada parâmetro.

A Tabela 6 apresenta os parâmetros selecionados, e seus respectivos pesos para a construção do índice.

Tabela 6 – Parâmetros selecionados para a composição do IQA_{SUB} e seus respectivos pesos

Parâmetro	Peso	Unidade	LQ	Normativa	VMP	TR	LS	Referência - obtenção de TR
Arsênio	0,13	mg/L	0,0010	Portaria 888/2021	0,01	75%	0,040	Pal <i>et al.</i> , 2007
Chumbo	0,13	mg/L	0,0050	Portaria 888/2021	0,01	89%	0,087	Nilsson, 1971
Mercúrio	0,15	µg/L	0,0200	Portaria 888/2021	1,00	15%	1,176	NRC, 1977
Nitrato	0,13	mg/L	0,1000	Portaria 888/2021	10	64,9%	28,482	Ávila <i>et al.</i> , 2021
Urânio*	0,13	mg/L	0,0005	CONAMA 396/2008 - Irrigação	0,01	48%	0,019	Baeza <i>et al.</i> , 2008
Dureza	0,07	mg/L	5,0000	Portaria 888/2021	300	8%	326,087	Ávila <i>et al.</i> , 2021
Ferro	0,07	mg/L	0,0300	Portaria 888/2021	0,3	94%	5,025	Ávila <i>et al.</i> , 2021
Manganês	0,07	mg/L	0,0030	CONAMA 396/2008 - Dessedentação de Animais	0,05	60%	0,125	NRC, 1977
Zinco	0,07	mg/L	0,0200	CONAMA 396/2008 - Irrigação	2	35%	3,091	Nilsson, 1971
Turbidez	0,05	uT	0,500	Portaria 888/2021	1	98,8%	80,645	Ávila <i>et al.</i> , 2021

*Apesar de não ser um dos parâmetros analisados pelo IGAM, o urânio foi considerado, visto que é um metal-traço de ocorrência em Minas Gerais e que possui difícil gestão, caso esteja associado a violações de radioatividade alfa.

TR- taxa de remoção média do parâmetro por estações de tratamento convencionais; LQ - limite de quantificação do método analítico; LS – limite superior da curva.

Fonte: Autora (2024).

A formulação do IQA_{SUB} foi inspirada na do IQA e está apresentada na Equação 2.

$$IQA_{SUB} = \prod_{i=1}^n q_i^{w_i} \quad (2)$$

Em que: **IQA_{SUB}**: Índice de Qualidade das Águas Subterrâneas, um número entre 0 e 100; **qi**: qualidade do i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 100, obtido da respectiva “curva média de variação de qualidade”, em função de sua concentração ou medida; **wi**: peso correspondente ao i-ésimo parâmetro, um número entre 0 e 1,

atribuído em função da sua importância para a conformação global de qualidade, n : número de variáveis que entram no cálculo do IQA_{SUB} .

Por fim, foi possível determinar a qualidade das águas subterrâneas a partir do cálculo do IQA_{SUB} nas seguintes categorias:

Excelente: As águas subterrâneas enquadradas nesta categoria refletem águas com necessidade de cloração simples e correção de pH, quando para fins potáveis, e adequadas para irrigação e dessedentação. Ressalta-se a importância de respeitar o tempo de contato mínimo, recomendado pela Portaria GM/MS nº888/2021 para a eliminação de patógenos.

Boa: As águas subterrâneas desta categoria refletem águas com necessidade de desinfecção, correção de pH e filtração, precedida ou não de decantação, quando para consumo humano, e adequadas para irrigação e dessedentação.

Regular: As águas subterrâneas desta categoria refletem águas com necessidade de tratamento convencional para consumo humano e que podem ou não necessitar de tratamento para irrigação e dessedentação.

Ruim: As águas subterrâneas desta categoria refletem águas com necessidade de tratamento convencional ou avançado e que podem ou não necessitar de tratamento para irrigação e dessedentação.

Péssima: As águas subterrâneas desta categoria refletem águas com necessidade de tratamento avançado ou inviáveis para uso, ainda que tratadas.

Tais categorias variam de 0 a 100, conforme sintetizado no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação do IQA_{SUB}

Categoria	Ponderação
EXCELENTE	$95 \leq IQA_{SUB} \leq 100$
BOA	$80 \leq IQA_{SUB} < 95$
REGULAR	$65 \leq IQA_{SUB} < 80$
RUIM	$45 \leq IQA_{SUB} < 65$
PÉSSIMA	$IQA_{SUB} < 45$

Fonte: Autora (2024).

Os limites de detecção (LD) dos métodos de análise variam ao longo do tempo devido aos avanços tecnológicos, resultando em uma maior capacidade de detecção e quantificação desses métodos analíticos, com limites cada vez mais sensíveis. Portanto, caso aplicado a dados com LQ superiores ao considerado na construção das curvas, normalmente associados a dados muito antigos, o presente índice pode apresentar distorções nos resultados obtidos para os pontos analisados, devido à associação do LI ao LQ na elaboração da curva. Nesse cenário, o cálculo do índice apontaria para classificações com qualidades inferiores àquelas que seriam apresentadas caso o LQ fosse equivalente ou inferior ao utilizado no desenvolvimento do índice. Para estes casos, recomenda-se a reelaboração das curvas para um resultado mais fidedigno ou, caso o usuário opte por utilizar as curvas já traçadas, recomenda-se uma análise crítica dos resultados obtidos. Por fim, para os casos em que houver a redução do LQ, propõe-se que seja considerado o nível de qualidade $q_i = 100$ para quaisquer valores inferiores aos considerados como LI no desenvolvimento das curvas, desde que não haja redução no VMP do parâmetro em questão. Caso isso ocorra, tendo em vista os avanços nos estudos de toxicidade, também é importante realizar uma adaptação da curva.

É relevante enfatizar que a aplicação do índice não exige a necessidade de monitoramento completo, conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021. Caso sejam detectadas quaisquer violações de parâmetros que não foram considerados no presente índice, faz-se necessária uma análise crítica e especializada, principalmente no que tange às violações de orgânicos, agrotóxicos e metabólitos que representam risco à saúde humana, visto que esses elementos não são passíveis de remoção em sistemas de tratamento convencionais.

4.3 Cálculo do IQA_{CCME}

A opção pelo IQA_{CCME} se deve ao fato de que esse índice oferece uma estrutura matemática flexível quanto ao tipo e número de variáveis de qualidade da água, ao período de aplicação e ao tipo de corpo d'água. Tal flexibilidade permitiu a aplicação ao cenário do presente estudo, considerando os mesmos parâmetros utilizados no IQA_{SUB} para fins de comparação.

Os cálculos do IQA_{CCME} devem considerar os resultados de F_1 (Escopo), F_2 (Frequência) e F_3 (Amplitude), apresentados nas equações 3, 5 e 7. Para o cálculo do *nse* (*normalized sum of excursions* – soma normalizada de excursões, que representa o número de vezes que a concentração de determinado parâmetro é maior que o estabelecido pela diretriz escolhida), apresentado na Equação 4, devem ser consideradas: a Equação 6, quando a excursão for um “mínimo”, ou seja, o valor do teste não deve exceder a excursão; a Equação 8, quando a excursão for um “máximo”, ou seja, o valor do teste não deve estar abaixo de determinado valor.

$$F_1 = \frac{\text{número de variáveis violadas}}{\text{número total de variáveis}} \quad (3)$$

$$F_2 = \frac{\text{número de testes violados}}{\text{número total de testes}} \quad (5)$$

$$F_3 = \frac{nse}{0,01nse + 0,01} \quad (7)$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^n \text{excursão}}{\text{número total de testes}} \quad (4)$$

$$\text{excursão}_i = \left(\frac{\text{valor do teste violado}}{\text{objetivo}_j} \right) - 1 \quad (6)$$

$$\text{excursão}_i = \left(\frac{\text{objetivo}_j}{\text{valor do teste violado}} \right) - 1 \quad (8)$$

Por fim, o cálculo do IQA_{CCME} pode ser realizado a partir da Equação (9), considerando os mesmos parâmetros utilizados para o cálculo do IQA_{SUB} :

$$IQA_{CCME} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1,732} \right) \quad (9)$$

A partir das equações citadas, foi possível determinar a qualidade das águas subterrâneas a partir do cálculo do IQA_{CCME} , que também varia de 0 a 100, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3 – Classificação do IQA_{CCME}

Categoria	Ponderação
EXCELENTE	$95 \leq IQA_{CCME} \leq 100$
BOA	$80 \leq IQA_{CCME} < 95$
REGULAR	$65 \leq IQA_{CCME} < 80$
RUIM	$45 \leq IQA_{CCME} < 65$
PÉSSIMA	$IQA_{CCME} < 45$

Fonte: Adaptado de CCME (2001).

4.4 Análise de Clusters e Análise dos Componentes Principais (ACP)

De acordo com Fávero e Belfiore (2017), quando da aplicação da análise de *clusters*, a divergência de unidades métricas pode influenciar arbitrariamente nas distâncias entre as observações. Assim, para que cada variável tenha a mesma contribuição sobre a medida de distância considerada, é importante realizar a padronização dos dados, sendo o método *Zscores* o mais utilizado. Tal procedimento foi aplicado para a padronização das variáveis do presente estudo e considera uma nova variável padronizada ZX_j para cada observação i , conforme a Equação 10, em que \bar{X} e s representam a média e o desvio padrão da variável X_j .

$$ZX_{ji} = \frac{X_{ji} - \bar{X}_j}{s_j} \quad (10)$$

O esquema de aglomeração escolhido neste trabalho foi o não-hierárquico *k-means*, que realiza uma busca iterativa dos centroides. O processo de clusterização inicia com a identificação dos dados que serão agrupados com base na expressão da distância euclidiana entre duas observações quaisquer p e q . Para um banco de dados que apresente n observações e, para cada observação i ($i = 1, \dots, n$), valores correlatos a cada uma das j ($j = 1, \dots, k$) variáveis métricas X , tem-se a Equação 11, que apresenta a expressão geral da distância euclidiana entre duas observações p e q (FÁVERO E BELFIORE, 2017).

$$d_{pq} = \sqrt{(X_{1p} - X_{1q})^2 + (X_{2p} - X_{2q})^2 \dots + (X_{kp} - X_{kq})^2} = \sqrt{\sum_{j=1}^k (X_{jp} - X_{jq})^2} \quad (11)$$

A cada processo de inclusão ou exclusão de determinada observação p no respectivo *cluster*, a coordenada \bar{x} de um centroide deverá ser recalculada, conforme as equações 12 e 13 - se a observação p for inserida no cluster em análise – e se a observação p for excluída.

$$\bar{x}_{novo} = \frac{N \cdot \bar{x} + x_p}{N + 1} \quad (12)$$

$$\bar{x}_{novo} = \frac{N \cdot \bar{x} + x_p}{N - 1} \quad (13)$$

Em que: N refere-se à quantidade de observações no *cluster*, \bar{x} corresponde à coordenada do seu centroide antes da realocação da observação e x_p se refere à coordenada da observação p que sofreu a mudança de *cluster*.

Na presente pesquisa, a definição do número ideal de *clusters* (k) foi realizada pelo método de *elbow*. De acordo com Nainggolan *et al.* (2019), são necessárias as seguintes etapas para sua aplicação:

- i) Estipular o valor inicial de k ;
- ii) Aumentar o valor de k ;
- iii) Calcular a soma dos quadrados para cada valor de k conforme apresentado na Equação 14, em que d é a distância entre os dados e o centro do *cluster*;

$$WSS = \sum_{i=1}^n (d)^2 \quad (14)$$

- iv) Analisar os resultados obtidos a fim de encontrar o valor de k para o qual a soma dos quadrados reduziu drasticamente; e
- v) Localizar o valor de k onde a curva forma um “cotovelo”.

No processo de ACP, cada fator representa a combinação linear das variáveis originais, portanto, para k variáveis é possível definir um número máximo de k fatores (F_1, F_2, \dots, F_k). Assim, para k variáveis é possível calcular os componentes principais conforme a Equação 15, em que F é a componente principal; s corresponde aos scores fatoriais; X é o valor estimado da variável; k é o número de variáveis; i é o número da amostra (FÁVERO e BELFIORE, 2017).

$$F_{ki} = s_{1k} \cdot X_{1i} + s_{2k} \cdot X_{2i} + \dots + s_{kk} \cdot X_{ki} \quad (15)$$

Por fim, a implementação dos algoritmos da análise de *clusters* e da ACP foi realizada por meio do *software Rstudio*.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Área de estudo

O Estado de Minas Gerais está localizado na Região Sudeste do Brasil e possui uma área de 586.528 km². Conforme apresentado no mapa da Figura 2, Minas Gerais possui sete domínios hidrogeológicos, constituídos de bacias sedimentares, carbonatos-metacarbonatos, cristalino, formações cenozóicas, metassedimentos/metavulcânicas, poroso/fissural e vulcânicas. Tal mapa foi elaborado com o auxílio do *software* ArcGIS e com base no mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil da CPRM (CPRM, 2007).

Dos pontos de monitoramento do IGAM, estão localizados nas **bacias sedimentares**: três poços da rede Guarani (FRT1, FRT2 e UBR3) e um da rede Norte de Minas (CJ002).

No domínio **carbonatos/metacarbonatos** encontram-se vinte pontos da rede Norte de Minas (BC001, BC003, CJ005, CJ006, CP001, EN001, FD001, FD002, FS002, FS003, FS007, JF001, JF002, JQ001, JR001, MC002, MC003, MC004, MC006 e MR001), um ponto da rede PANM (RIC_83_IGAM) e quatorze pontos da rede Bacia do Rio das Velhas (CFNGR, GOUPA, ITAAS, JABRA, LSQSU, MONOA, MTBSP, PLFEX, PLFID, PLMMC, PMFSR, SRCM, VPCEM e VPCLV).

Localizam-se no **cristalino**: cinco poços da rede Norte de Minas (EP001, MA001, MA003, PP001 e PP004), cinco na rede PANM (PM_ITA1, PM_PA1, PM_TO1, PM_TO2 e PME_PA1) e cinco na rede Bacia do Rio das Velhas (CBCSL, DATOM, ITASGB, SJLRM e SPPEX).

Quanto aos poços localizados nas **formações cenozoicas**: quinze estão localizados na rede Norte de Minas (GM001, JB003, JB007, JB008, JB020, JB021, JN001, JQ003, MC005, MTC002, PP002, RM001, SP002, VD001 e VD020), seis na rede PANM (PM_MOC1, PM_VZ2, RIC_01_IGAM, RIC_03_IGAM, RIC_06_IGAM e RIC_08_IGAM) e quatro na rede Bacia do Rio das Velhas (COFBM, MGNOA, VPBGU e VPCRD).

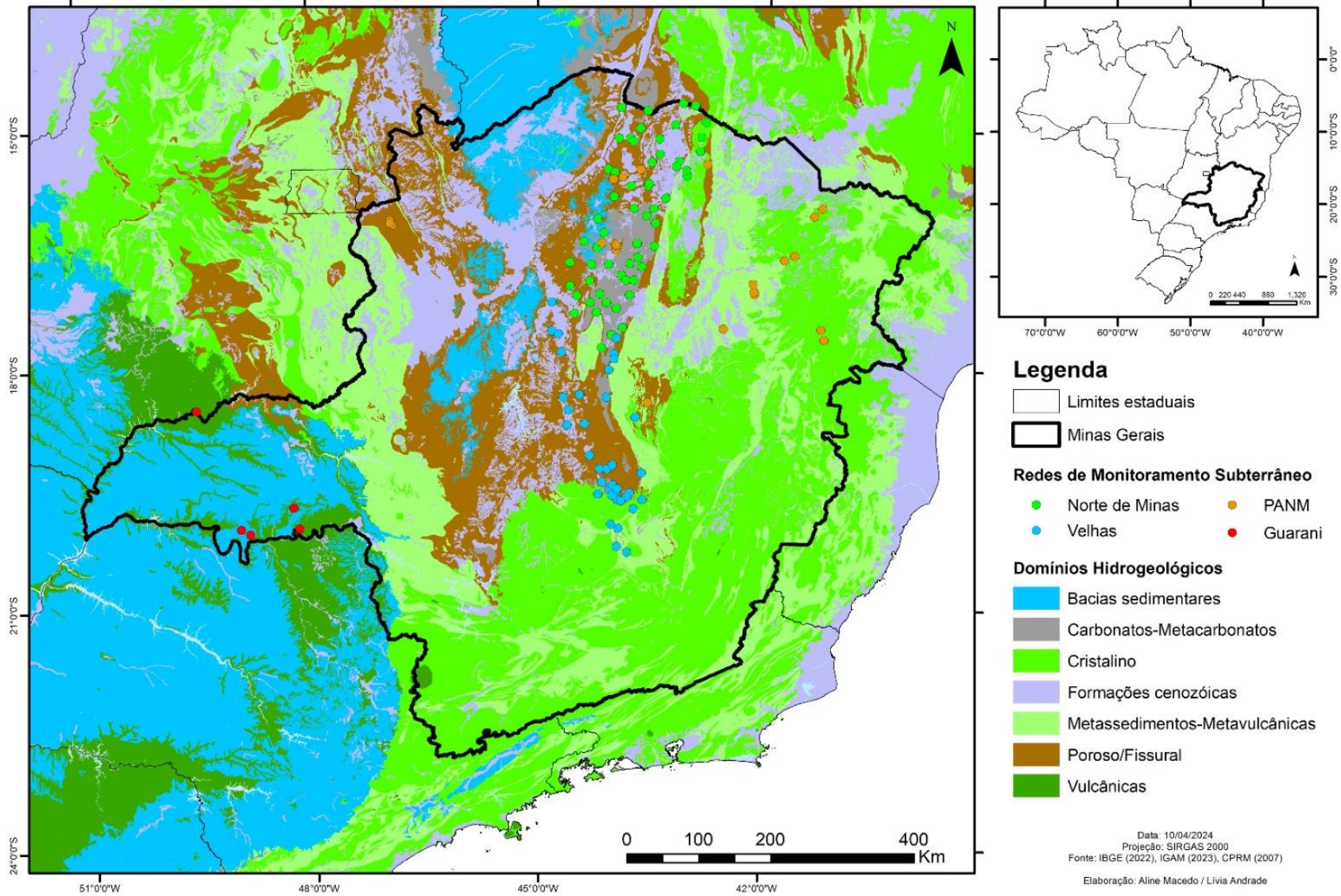
Dos poços da rede do IGAM que estão localizados no domínio **metassedimentos/metavulcânicas** cinco se encontram na rede de monitoramento PANM (PM_ARA1, PM_ARA2, PM_ARA3, PM_CAP1 e PM_ITI1) e três na rede Bacia do Rio das Velhas (ALASB, NILMEG e SABRC).

No domínio **poroso-fissural** se enquadram: dezessete poços da rede Norte de Minas (CE001, CJ004, EP004, EP006, FS004, JQ002, LP001, MR002, MTC001, MTC006, SL001, SP001, VD003, VD013, VD014, VZ001 e VZ006), sete poços da rede PANM (PM_MV1, PM_UNA1, PM_UNA2, PME_SB1, PME_UNA1, PME_VZ1 e PME_VZ2) e onze poços da rede Bacia do Rio das Velhas (ARAPJ, BUCGO, COBMC, CORSM, CUCC13, FUGSJT, JQCVQ, LSCBA, LSCBR, LSPVD e MGCC02).

Por fim, apenas dois poços da rede de monitoramento do IGAM pertencem ao domínio **vulcânicas** e ambos estão situados na rede Guarani (CAL1 e CD3).

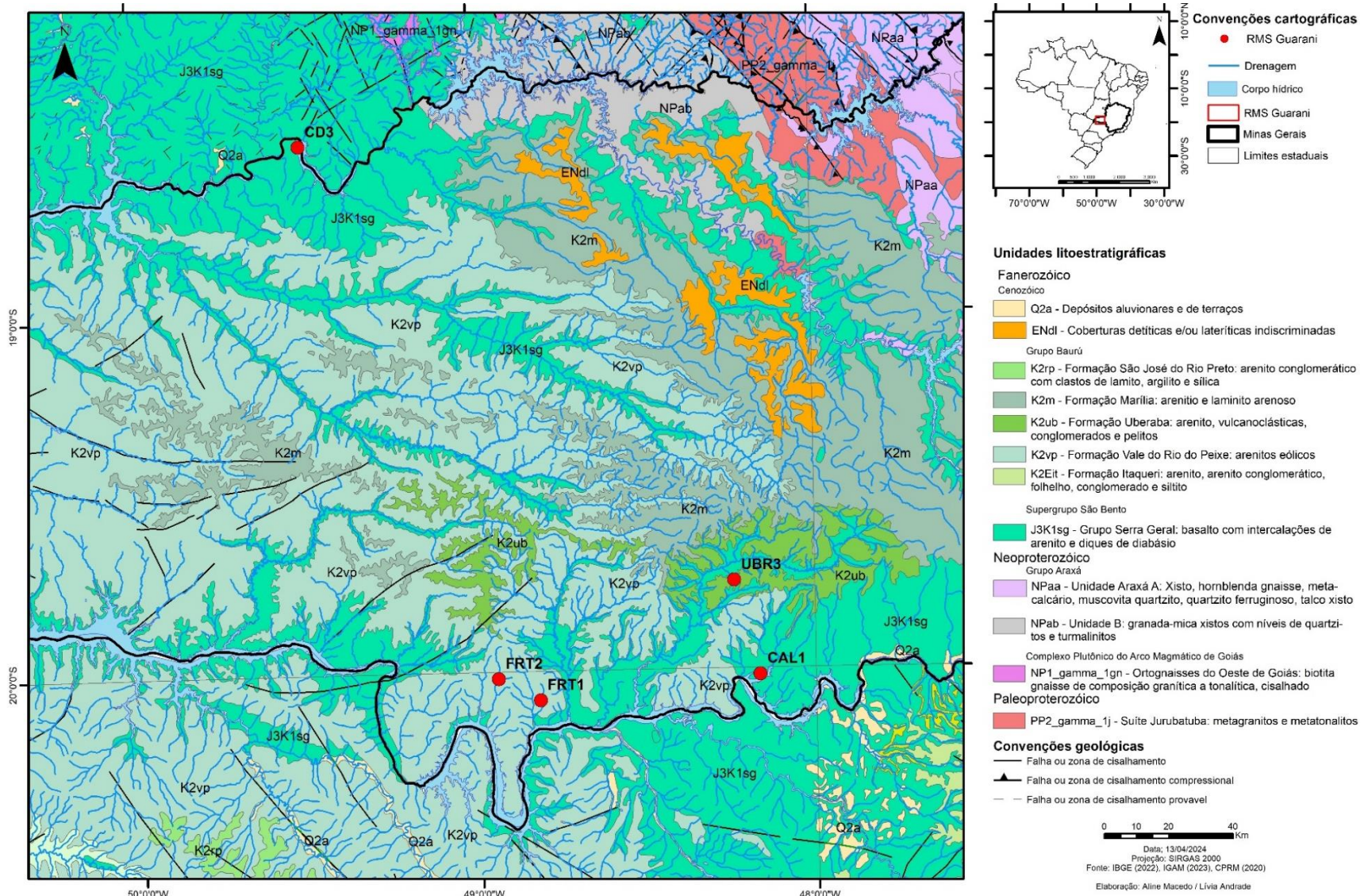
A Figura 3, Figura 4, Figura 5, Figura 6, Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 10 apresentam os mapas geológicos das redes de monitoramento do IGAM: Guarani, Norte de Minas (porção norte), Norte de Minas (porção sul), PANM (porção leste), PANM (porção oeste), Bacia do Rio das Velhas (porção norte), Bacia do Rio das Velhas (porção sul) e Bacia do Rio das Velhas (porção central), respectivamente. Os mapas foram elaborados com o auxílio do *software* ArcGIS e com base no mapa geológico do estado de Minas Gerais da CPRM (CPRM, 2020). Por fim, as informações acerca da localização dos pontos de monitoramento e suas respectivas características hidrogeológicas e geológicas se encontram no APÊNDICE A.

Figura 2 – Mapa dos domínios hidrogeológicos de Minas Gerais



Fonte: Autora (2024).

Figura 3 – Mapa geológico da rede de monitoramento Guarani



Fonte: Autora (2024).

Figura 4 – Mapa geológico da rede de monitoramento Norte de Minas (porção norte)

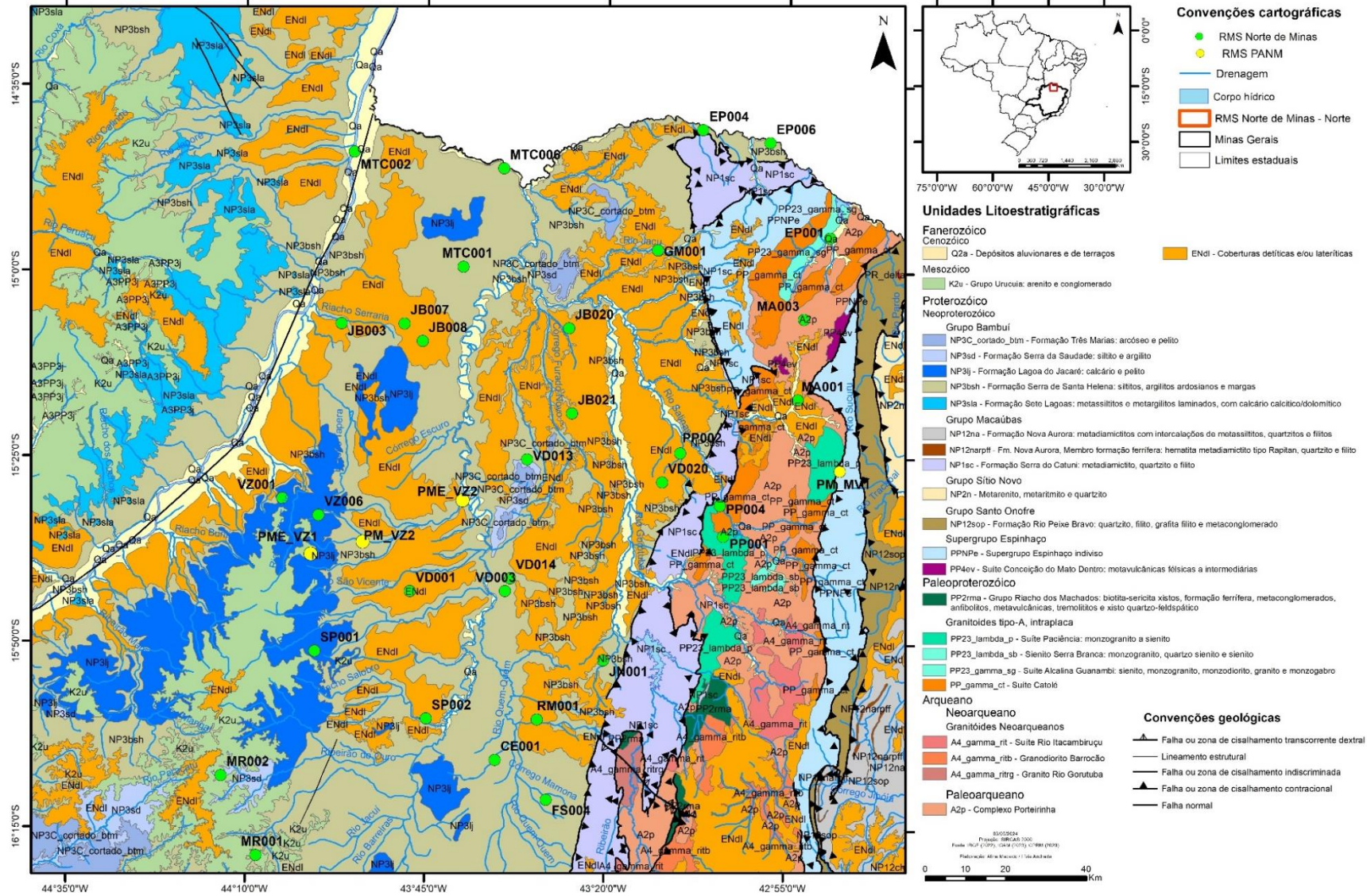


Figura 5 – Mapa geológico da rede de monitoramento Norte de Minas (porção sul)

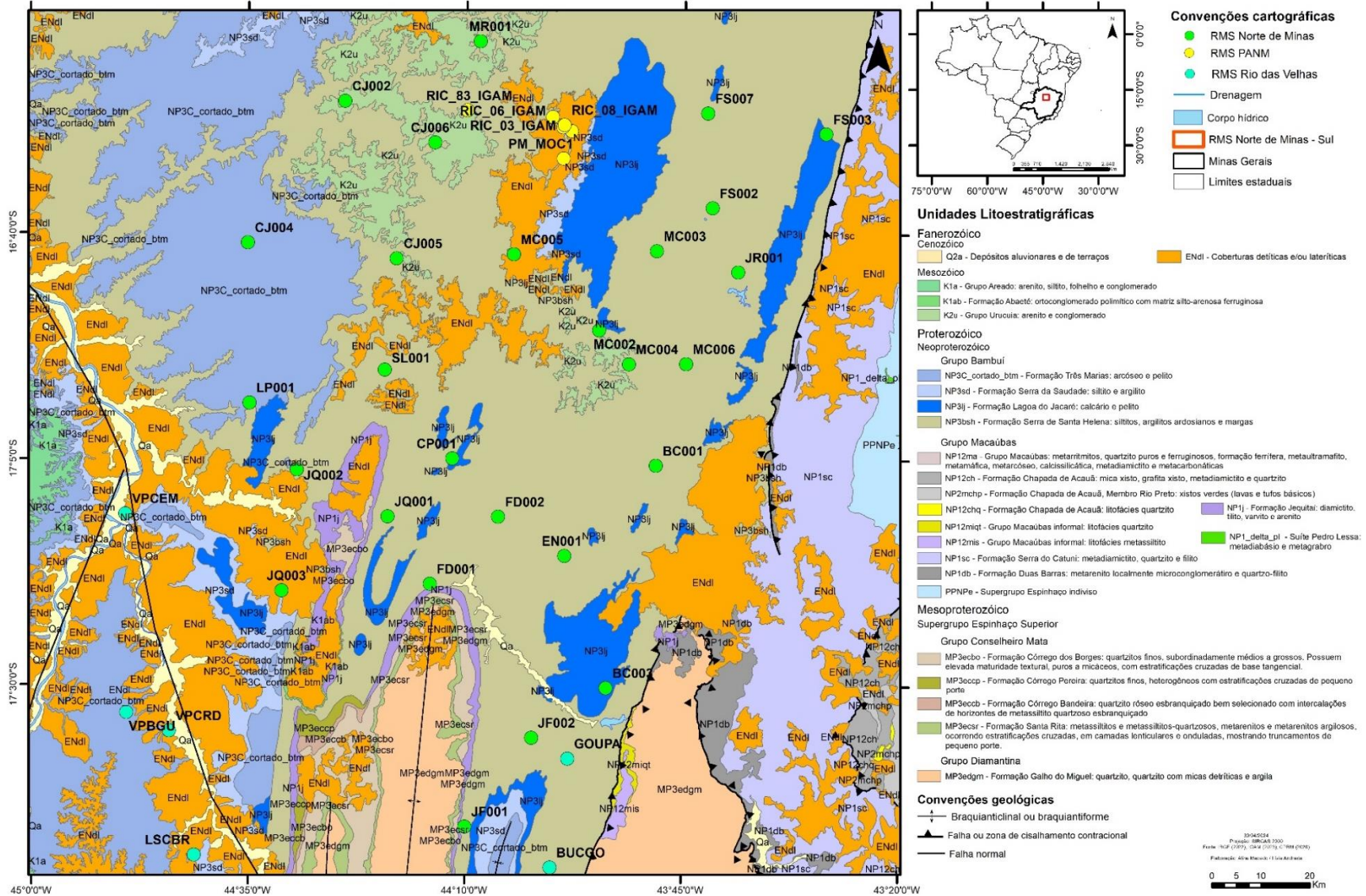


Figura 6 – Mapa geológico da rede de monitoramento PANM (porção leste)

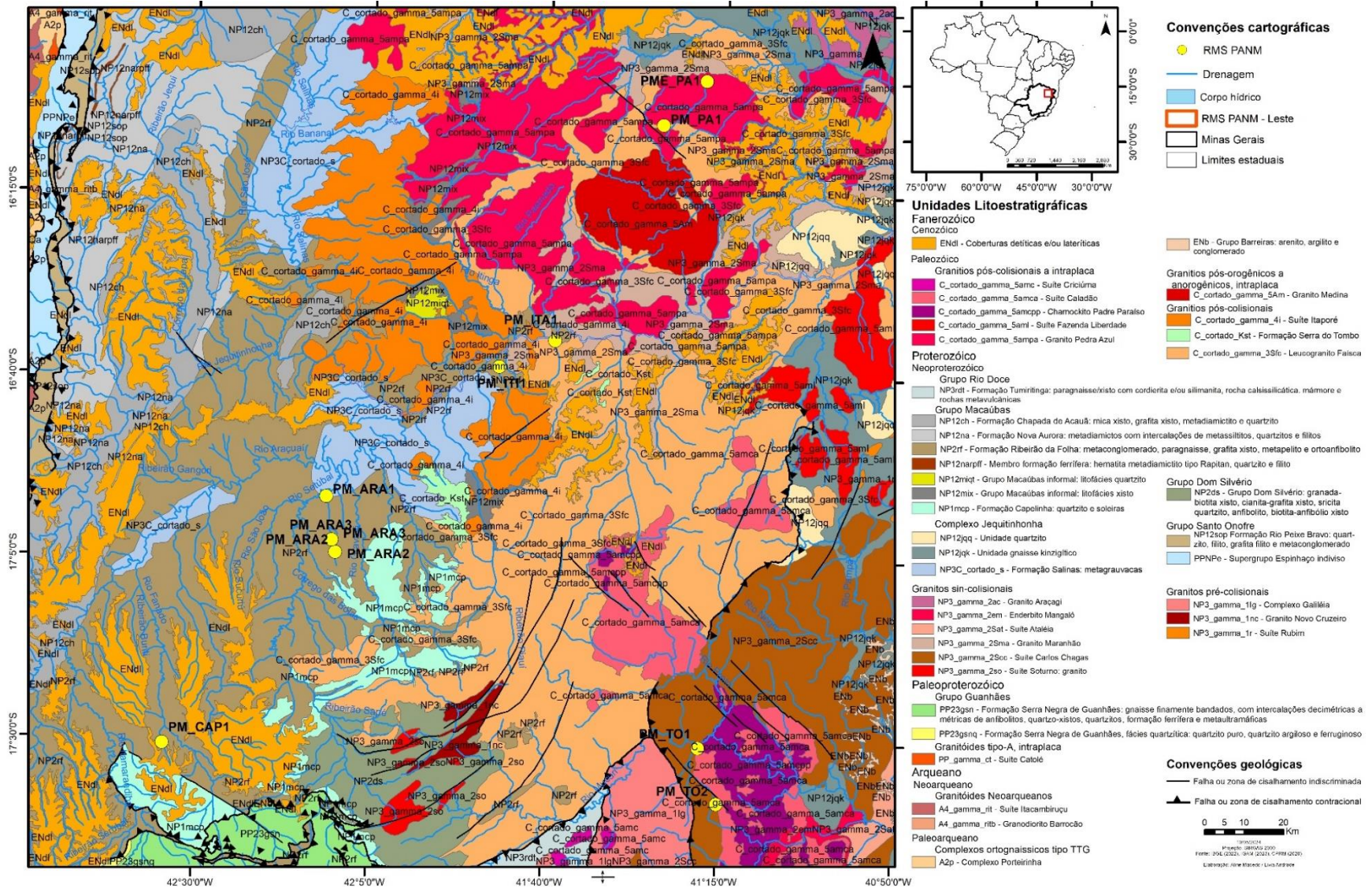
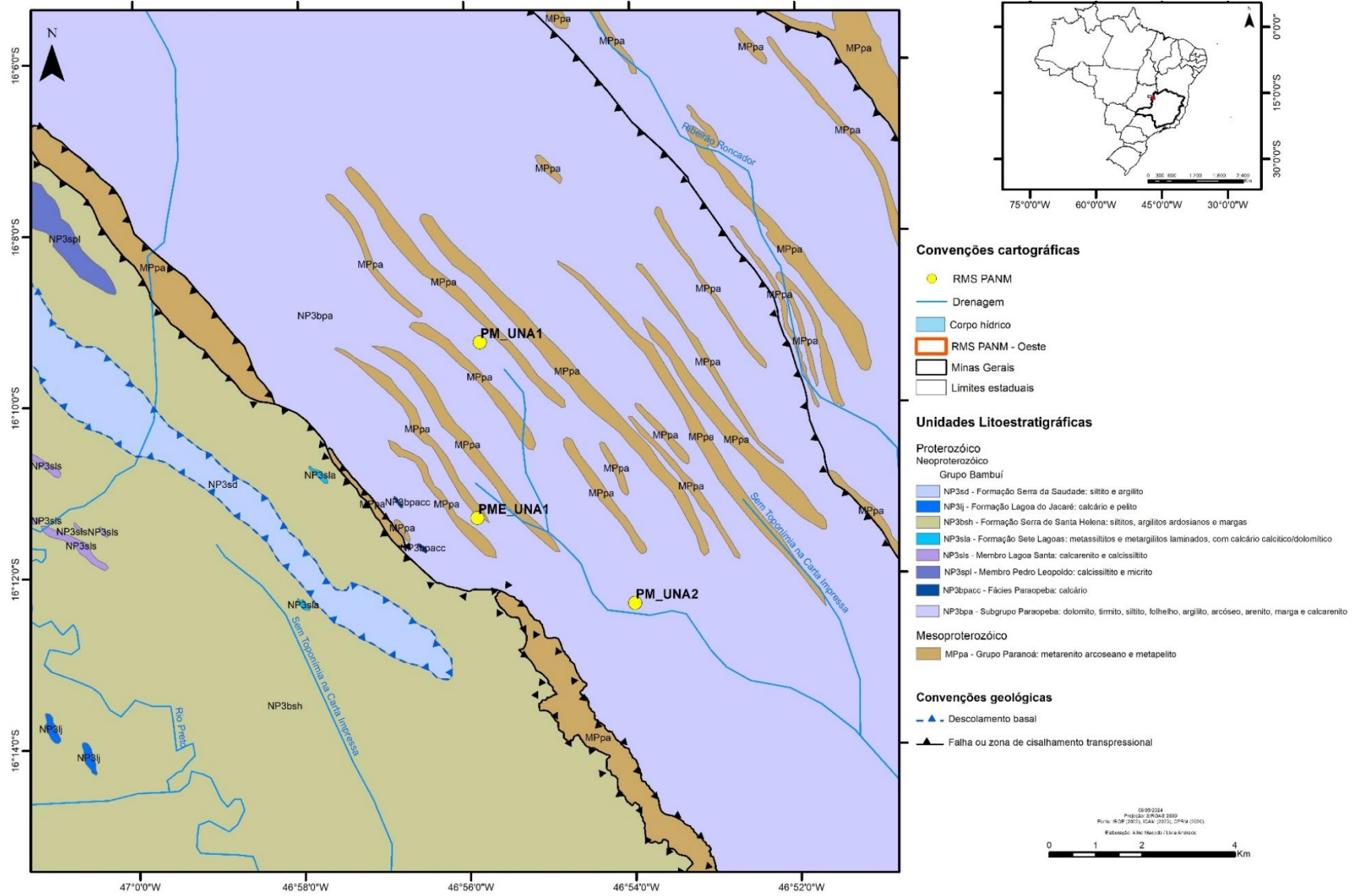


Figura 7 – Mapa geológico da rede de monitoramento PANM (porção oeste)



Fonte: Autora (2024).

Figura 8 – Mapa geológico da rede de monitoramento Bacia do Rio das Velhas (porção norte)

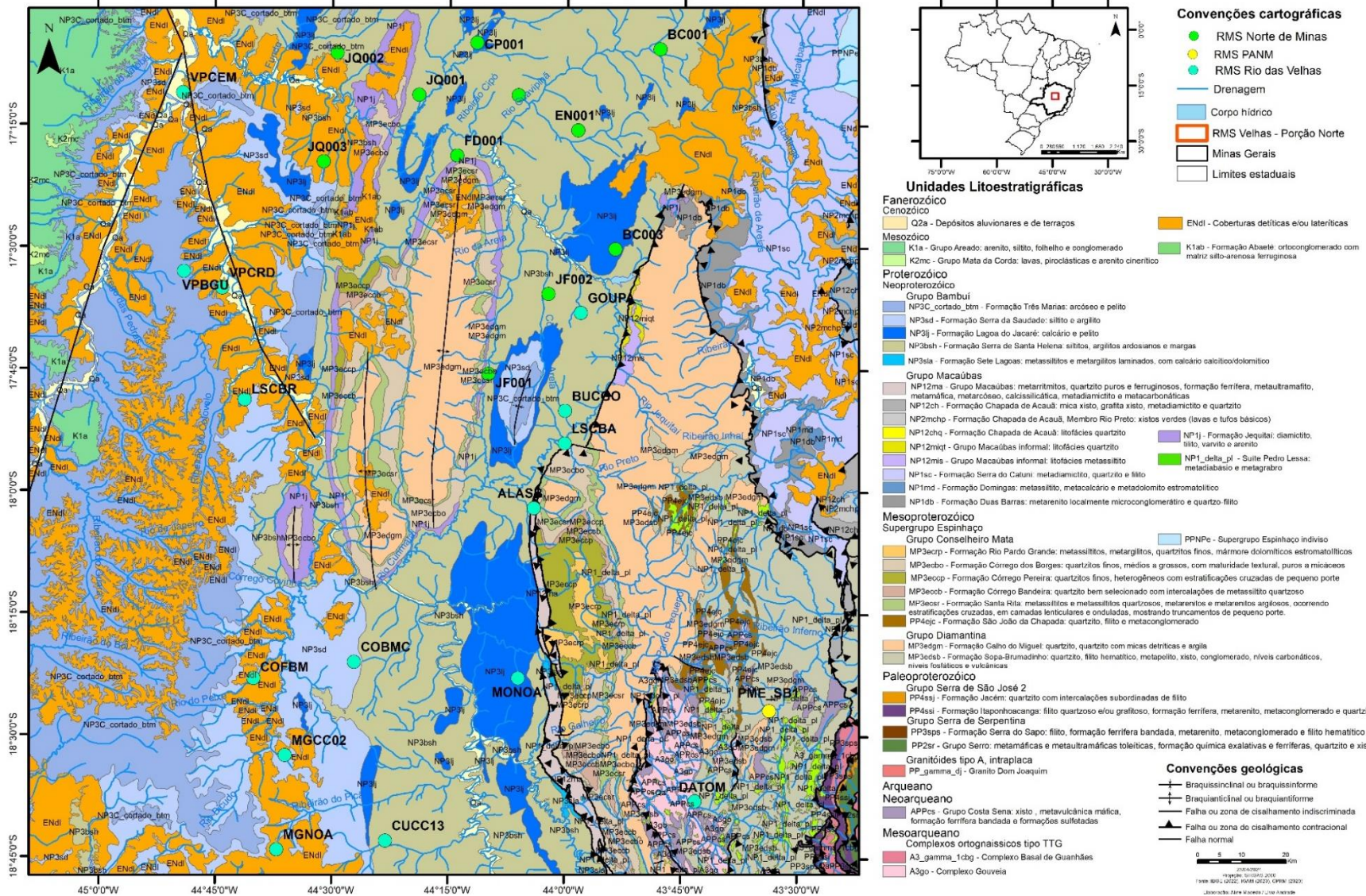


Figura 9 – Mapa geológico da rede de monitoramento Baía do Rio das Velhas (porção sul)

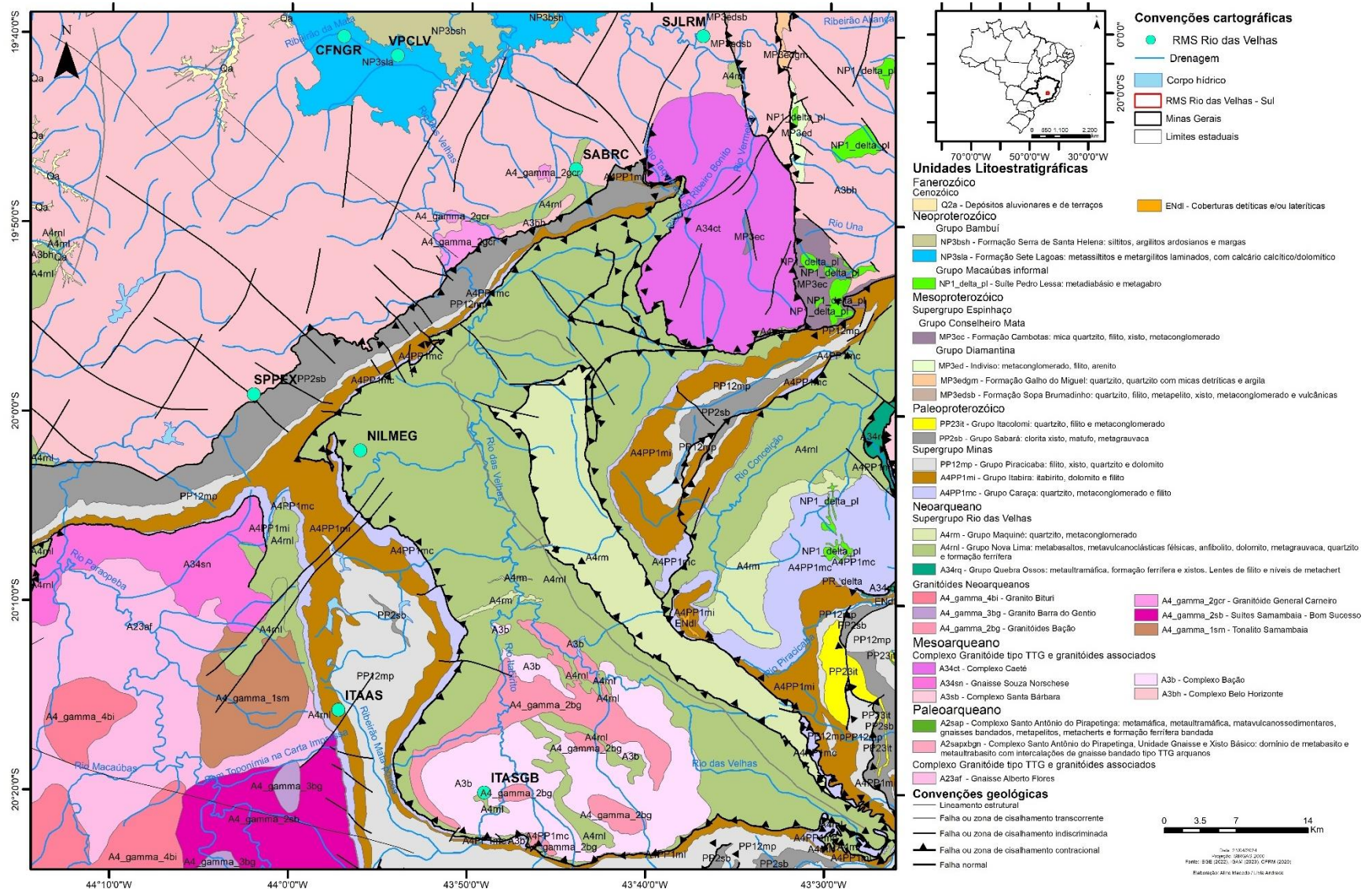
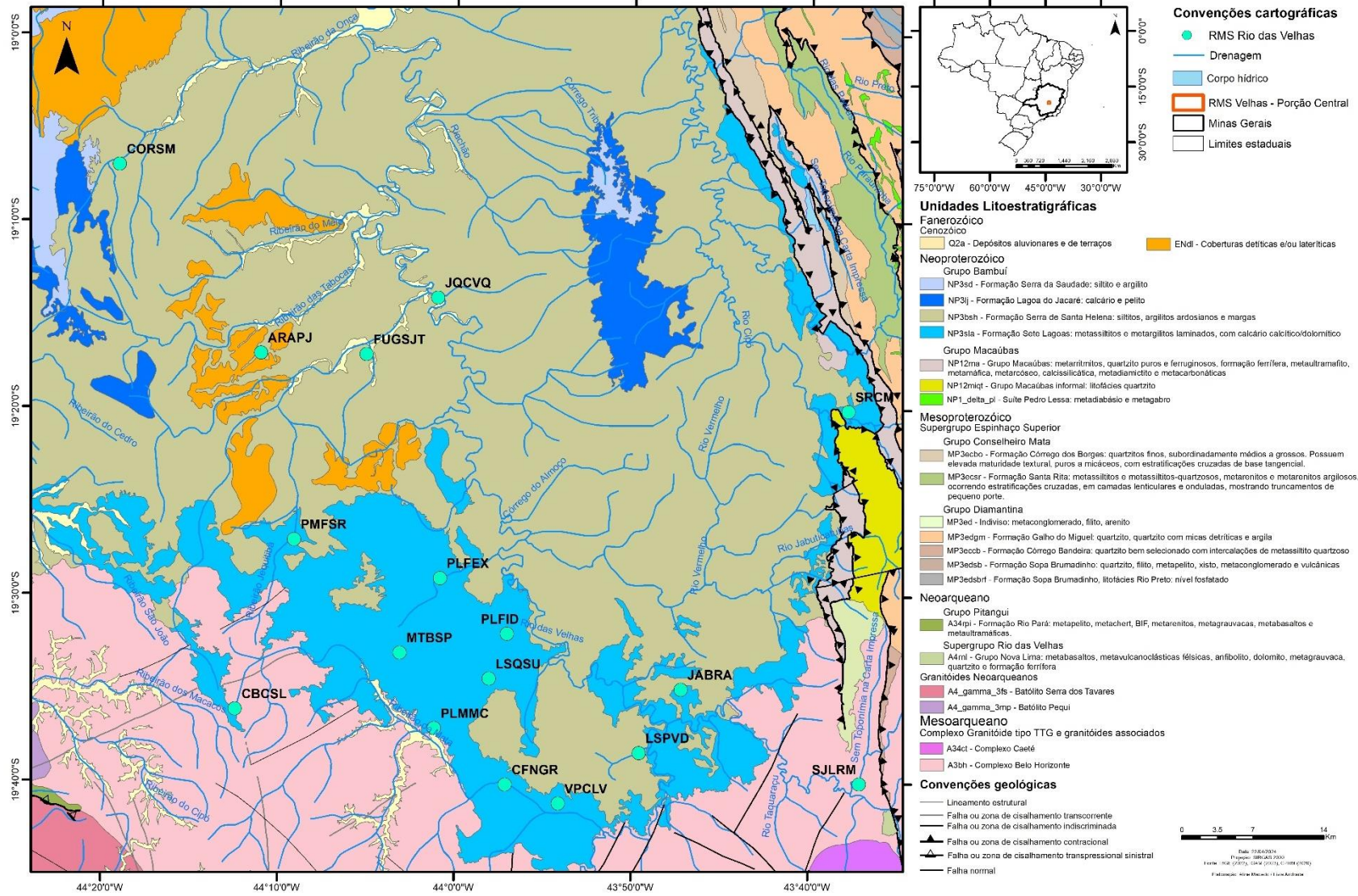


Figura 10 – Mapa geológico da rede de monitoramento Bacia do Rio das Velhas (porção central)



5.2 Avaliação da base de dados fornecida pelo IGAM e pré-seleção dos parâmetros

Considerando os registros do banco de dados do IGAM entre os anos de 2018 e 2022, observa-se que foram realizadas 795 amostragens nas Redes Guarani, Norte de Minas, PANM e Velhas, em um total de 124 poços, distribuídas conforme a Tabela 7.

A **Figura 11** apresenta o mapa com a localização dos poços das quatro redes no Estado de Minas Gerais.

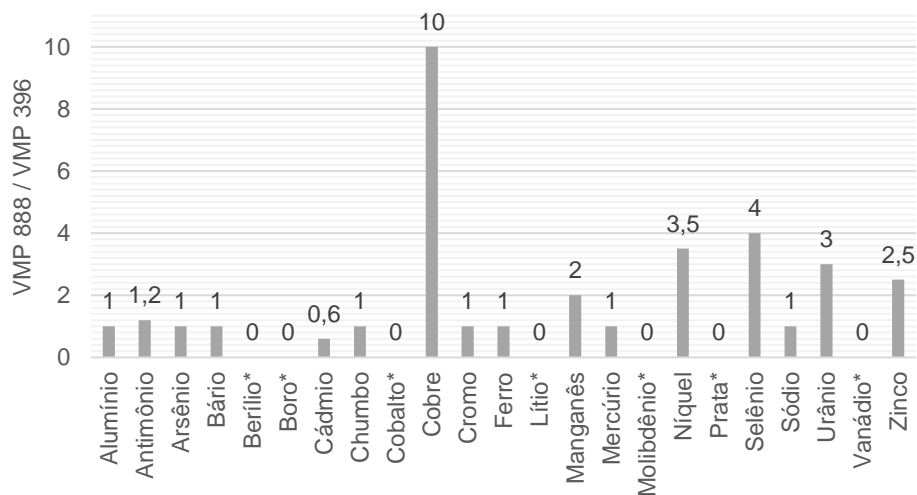
Tabela 7 – Distribuição dos dados do IGAM entre 2018 e 2022

Rede	Nº de poços	Nº de amostragens
Guarani	5	15
Norte de Minas	58	405
PANM	24	108
Velhas	37	267

Fonte: Autora (2024).

Analisando-se os VMPs dos metais e metais-traço da Portaria GM/MS nº 888/2021 e os VMPs da CONAMA nº 396/2008, observa-se que a CONAMA apresenta alguns limites mais restritivos para alguns deles, o que justifica a opção por utilizar os VMPs mais restritivos na construção do índice. O gráfico da Figura 12 apresenta a relação dos VMPs da Portaria GM/MS nº 888/2021 dividido pelo menor VMP da CONAMA nº 396/2008, considerando os usos Dessedentação de Animais, Irrigação e Consumo Humano. Nota-se que o VMP da CONAMA nº 396/2008 é mais restritivo para: antimônio, cobre, manganês, níquel, selênio, urânio e zinco. Para berílio, boro, cobalto, lítio, molibdênio, prata e vanádio a Portaria GM/MS nº 888/2021 não preconiza limites.

Figura 12 – Gráfico do VMP da Portaria GM/MS nº 888 / Menor VMP da CONAMA nº 396 (Dessedentação de Animais, Irrigação e Consumo Humano) para metais e metais traço



Fonte: Autora (2024).

A estatística descritiva das Redes de Monitoramento da Bacia do Rio das Velhas, Guarani, Norte de Minas e PANM estão apresentadas respectivamente na Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11. Os *box-plots* com a distribuição das análises de cada um dos parâmetros, selecionados para a construção dos índices, se encontram no APÊNDICE B.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA_{SUB} na Rede Bacia do Rio das Velhas, com destaque para as violações

	Arsênio mg/L	Chumbo mg/L	Dureza mg/L	Ferro mg/L	Manganês mg/L	Mercúrio µg/L	Nitrato mg/L	Turbidez uT	Zinco mg/L
VMP	0,010	0,010	300,0	0,30	0,050	1,00	10,00	1,0	2,00
LQ	0,001	0,005	5,0	0,03	0,003	0,02	0,02	0,5	0,02
Média	0,002	0,005	154,7	0,36	0,079	0,18	0,79	3,1	0,19
Mediana	0,001	0,005	164,0	0,05	0,003	0,20	0,38	0,5	0,02
Desvio padrão	0,006	0,000	81,3	1,27	0,254	0,06	1,44	8,0	0,45
Variância da amostra	4,14E-05	1,88E-08	6607,5	1,62	0,064	0,00	2,06	63,9	0,20
Mínimo	0,001	0,005	7,4	0,03	0,003	0,02	0,02	0,5	0,02
Máximo	0,100	0,007	393,8	15,21	1,720	0,20	15,20	65,5	2,92

Fonte: Autora (2024).

Tabela 9 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA_{SUB} na Rede Guarani, com destaque para as violações

	Arsênio mg/L	Chumbo mg/L	Dureza mg/L	Ferro mg/L	Manganês mg/L	Mercúrio µg/L	Nitrato mg/L	Turbidez uT	Zinco mg/L
VMP	0,010	0,010	300,0	0,30	0,050	1,00	10,00	1,0	2,00
LQ	0,001	0,005	5,0	0,03	0,003	0,02	0,02	0,5	0,02
Média	0,006	0,005	123,2	0,06	0,016	0,20	1,45	0,5	0,03
Mediana	0,001	0,005	44,6	0,04	0,003	0,20	0,34	0,5	0,02
Desvio padrão	0,009	0,000	195,0	0,04	0,028	2,87E-17	2,74	0,1	0,03
Variância da amostra	0,000	0,000	38016,4	0,00	0,001	0,00	7,49	0,0	0,00
Mínimo	0,001	0,005	2,2	0,03	0,003	0,20	0,02	0,5	0,02
Máximo	0,023	0,005	509,0	0,13	0,086	0,20	8,00	0,9	0,13

Fonte: Autora (2024).

Tabela 10 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA_{SUB} na Rede Norte de Minas, com destaque para as violações

	Arsênio mg/L	Chumbo mg/L	Dureza mg/L	Ferro mg/L	Manganês mg/L	Mercúrio µg/L	Nitrato mg/L	Turbidez uT	Zinco mg/L
VMP	0,010	0,010	300,0	0,30	0,050	1,00	10,00	1,0	2,00
LQ	0,001	0,005	5,0	0,03	0,003	0,02	0,02	0,5	0,02
Média	0,002	0,005	336,2	0,44	0,067	0,20	2,91	3,2	0,06
Mediana	0,001	0,005	308,0	0,06	0,011	0,20	1,22	0,5	0,02
Desvio padrão	0,002	0,001	213,2	1,98	0,202	1,50E-15	4,16	10,3	0,34
Variância da amostra	2,14E-06	1,27E-06	45471,2	3,90	0,041	2,25E-30	17,31	107,0	0,11
Mínimo	0,001	0,005	8,9	0,03	0,003	0,20	0,02	0,5	0,02
Máximo	0,010	0,017	1115,0	31,63	2,231	0,20	21,00	134,0	6,22

Fonte: Autora (2024).

Tabela 11 – Estatística descritiva dos parâmetros utilizados na construção do IQA_{SUB} na Rede PANM, com destaque para as violações

	Arsênio mg/L	Chumbo mg/L	Dureza mg/L	Ferro mg/L	Manganês mg/L	Mercúrio µg/L	Nitrato mg/L	Turbidez uT	Zinco mg/L
VMP	0,010	0,010	300,0	0,30	0,050	1,00	10,00	1,0	2,00
LQ	0,001	0,005	5,0	0,03	0,003	0,02	0,02	0,5	0,02
Média	0,002	0,011	179,8	3,94	0,221	0,21	0,82	34,8	0,08
Mediana	0,001	0,005	143,4	0,83	0,127	0,20	0,25	9,3	0,04
Desvio padrão	0,003	0,022	183,0	8,87	0,307	0,05	1,38	70,1	0,12
Variância da amostra	6,37E-06	0,001	33488,7	78,60	0,094	0,00	1,90	4919,9	0,01
Mínimo	0,001	0,005	5,6	0,03	0,003	0,20	0,02	0,5	0,02
Máximo	0,024	0,202	956,0	77,85	2,427	0,72	9,50	512,0	0,87

Fonte: Autora (2024).

Com relação ao **arsênio**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,002 mg/L) e a mediana (0,001 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP considerado (0,010 mg/L), conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021, entretanto, foram detectadas quatro violações de 267 amostragens (1,50%), sendo o máximo registrado de 0,100 mg/L;
- Na Rede Guarani, a média (0,006 mg/L) e a mediana (0,001) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas três violações no valor de 0,023 mg/L em um total de 15 amostragens (20%), tal valor corresponde ao máximo registrado;
- Na Rede Norte de Minas, a média (0,002 mg/L) e a mediana (0,001) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas quatro violações no valor de 0,010 mg/L em um total de 405 amostragens (0,99%), tal valor corresponde ao máximo registrado; e
- Na Rede PANM, a média (0,002 mg/L) e a mediana (0,001) se mantiveram abaixo do VMP e foi detectada uma violação pontual de 0,024 mg/L, correspondente ao máximo registrado, em um total de 108 amostragens (0,93%).

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes, exceto na Rede Guarani. Entretanto, eles não foram desconsiderados, pois, embora não representem o cenário de toda a rede de monitoramento, podem estar relacionados a características da geologia local dos pontos monitorados.

No que se refere à geologia dos 10 poços que apresentaram violações de arsênio: dois poços se situam na formação Sete Lagoas, composta por metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico; um na formação Três Marias, constituída por arenito arcoseano, arcóseo, siltito e argilito; um poço está localizado na formação Salinas, constituída de metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto; quatro estão situados na formação Serra de Santa Helena, composta por siltitos, argilitos ardosianos e margas; um se localiza na formação Lagoa do Jacaré, que possui calcário e pelito em sua composição. Estas formações citadas estão inseridas no grupo Bambuí. Segundo Santana Filho (2005), existem evidências da

presença de arsenopirita em amostras originárias desse grupo, o que evidencia a potencial contaminação por arsênio das águas subterrâneas inseridas nesse contexto.

Por fim, um poço se localiza no grupo Serra Geral, composto por basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio. De acordo com Gonçalves (2021), os basaltos do grupo Serra Geral apresentam metais-traços, incluindo o arsênio, em sua composição natural, ainda que em pequenas quantidades. Assim, a detecção de violações desse metal pode estar associada à essa formação geológica.

O máximo valor observado para arsênio nas redes de monitoramento foi de 0,100 mg/L no ponto MTBSP da Rede Bacia do Rio das Velhas para a amostragem realizada no dia 16/10/2020, acima do VMP. Nesta data, o poço também apresentou violações de ferro (15,210 mg/L), manganês (1,720 mg/L) e zinco (2,920 mg/L). Importante salientar que nas demais amostras deste ponto os valores registrados para arsênio se mantiveram abaixo do limite de quantificação (0,001 mg/L) e abaixo dos VMPs para ferro, manganês e zinco. Portanto, a violação de arsênio, assim como as demais para este ponto, pode estar relacionada a alguma condição específica ocorrida à época da amostragem. Nos achados de Uddin *et al.* (2017), a maior concentração de arsênio encontrada foi de 0,498 mg/L, aproximadamente cinco vezes maior que o valor registrado no presente estudo.

Quanto ao **chumbo**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,005 mg/L) e a mediana (0,005 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP considerado (0,010 mg/L), conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021, não tendo sido detectadas violações pontuais, sendo o máximo registrado de 0,007 mg/L;
 - Na Rede Guarani, a média (0,005 mg/L) e a mediana (0,005 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações pontuais, sendo o máximo registrado de 0,005 mg/L;
 - Na Rede Norte de Minas, a média (0,005 mg/L) e a mediana (0,005 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas seis violações pontuais em um total de 405 amostragens (1,48%), sendo o máximo registrado de 0,017 mg/L;
- e

- Na Rede PANM, a média (0,011 mg/L) excedeu o VMP, enquanto a mediana (0,005 mg/L) se manteve abaixo. Foram detectadas 18 violações em um total de 108 amostragens (16,67%), sendo o máximo registrado de 0,202 mg/L.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes, exceto na Rede Guarani. Entretanto, eles não foram desconsiderados, pois podem estar relacionados a características da geologia local dos pontos monitorados, embora não representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

No que tange à geologia dos 15 poços que apresentaram violações de chumbo: um está localizado no Granito Caladão, composto por sienogranito; um no granito Pedra Azul, constituído por granito, monzogranito e sienogranito; dois poços no Leucogranito Faísca, constituído por leucogranito; um se localiza na unidade geológica Suíte Carlos Chagas, composto por gnaiss granítico e por leucogranito. Estas unidades são compostas por corpos graníticos, que podem conter o elemento chumbo em sua composição mineral (ROSIÈRE e CHEMALE JR, 2000).

Outros seis poços se encontram na formação Serra de Santa Helena, composta por siltitos, argilitos ardosianos e margas; um está na formação Três Marias, com arenito arcoseano, arcóseo, silito e argilito em sua composição. Ambas as formações estão inseridas no Grupo Bambuí, onde a aparição de chumbo é esperada e associada a dois estágios de sua evolução isotópica, um ao Ciclo Transamazônico e outro ao Ciclo Brasileiro (COUTO, *et al.*, 1981).

Por fim, dois poços se localizam na formação Ribeirão da Folha, do Grupo Macaúbas, composta por metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas e formação ferrífera bandada; e um está localizado na formação Salinas, constituída de metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto. Segundo VIEIRA (2007), tanto o grupo Macaúbas quanto a formação Salinas apresentam chumbo em sua composição mineral, na forma de zircão.

O valor máximo registrado para chumbo nas redes de monitoramento foi de 0,202 mg/L no ponto PM_ITA1 da Rede PANM para a amostragem realizada no dia 04/10/2018, acima do VMP. Na ocasião, o poço também apresentou violações de ferro (4,46 mg/L), manganês (0,14 mg/L) e turbidez (52,70 uT). Tais violações foram

detectadas com recorrência neste poço, o que aponta para uma característica inerente a ele, com possíveis vínculos com a geologia local. Nos estudos de Uddin *et al.* (2017), a maior concentração detectada foi de 0,00244 mg/L, resultado 101 vezes menor que o máximo encontrado no presente estudo. De acordo com Swer e Singh (2004), as altas concentrações de metais-traço podem ser associadas à lixiviação de minas, pátios de pilhas de minério e lixões.

No que se refere à **dureza**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (154,7 mg/L) e a mediana (164,0 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP (300,0 mg/L), conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021, tendo sido detectadas 14 violações de 267 amostras (5,24%), sendo o máximo registrado de 393,8 mg/L;
- Na Rede Guarani, a média (123,2 mg/L) e a mediana (44,6 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas três violações em um total de 15 amostragens (20%), sendo o máximo registrado de 509,0 mg/L;
- A Rede Norte de Minas, apresentou média (336,2 mg/L) e mediana (308,0 mg/L) acima do VMP e foram detectadas 206 violações de 405 amostragens (50,86%), sendo o máximo registrado de 1115,0 mg/L. Tal cenário é explicado pelo domínio hidrogeológico Carbonatos-Metacarbonatos onde os pontos estão inseridos: nesse contexto hidrogeológico há a predominância de rochas calcárias, calcárias magnesianas e dolomíticas, em que ocorre a constante diluição química das rochas calcárias, formando cavernas, sumidouros, dolinas e como consequência, uma água naturalmente carbonatada e com dureza bastante elevada (BONFIM, 2010); e
- Na Rede PANM, a média (179,8 mg/L) e a mediana (143,4 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas 17 violações em um total de 108 amostragens (15,74%), sendo o máximo registrado de 956,0 mg/L. Da mesma forma que na Rede Norte de Minas, alguns poços estão inseridos do domínio hidrogeológico Carbonatos-Metacarbonatos, conforme abordado anteriormente, justificando os níveis de dureza detectados.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior nas quatro redes. Entretanto, mais uma vez, eles não foram desconsiderados, por estarem

relacionados a características dos domínios hidrogeológicos e da geologia local dos pontos monitorados, embora não representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

Quanto à geologia dos 44 poços que apresentaram violações de dureza: dois poços localizam-se no complexo Porteirinha, constituído por gnaisse, rochas metaultramáficas, migmatitos e anfibolitos; seis poços estão na formação Lagoa do Jacaré, composto por calcário e pelito; três poços se encontram na formação Ribeirão da Folha, com metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas e formação ferrífera bandada em sua constituição; um está na formação Salina, contendo metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto; 26 se encontram na formação Serra de Santa Helena, composta por siltitos, argilitos ardosianos e margas; um está na formação Três Marias, composta por arenito arcoseano, arcóseo, silito e argilito; um no grupo Serra Geral, contendo em sua composição basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio; um se localiza no subgrupo Paraopeba e é composto por dolomito, ritmito, silito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga e calcarenito; um poço está na unidade suíte Guanambi, com monzogabro, monzodiorito, granito, monzonito, quartzo monzonito e quartzo sienito em sua composição e dois na unidade suíte Paciência, composta por monzonito, quartzo e sienito. Pela análise dos contextos geológicos dos poços onde ocorreram as violações de dureza é possível verificar que as concentrações detectadas se devem à presença de rochas calcárias, calcárias magnesianas e dolomíticas.

O valor máximo registrado para dureza nas redes de monitoramento foi de 1115,0 mg/L, no ponto VD003 da Rede Norte de Minas para a amostragem realizada no dia 06/08/2018; importante ressaltar que o mínimo registrado para este poço foi de 426,5 mg/L, portanto, todas as amostragens apresentaram violação para tal parâmetro. Na ocasião, o poço não apresentou nenhuma outra violação, embora nas demais amostragens tenham ocorrido algumas violações de manganês, nitrato e turbidez. No trabalho de Kumar e Krishna (2021) a maior concentração detectada foi de 1013,3 mg/L, resultado próximo ao máximo registrado no presente estudo. Os autores ressaltam que o intemperismo dos minerais que contém cálcio é um processo natural e que acarreta a dureza na água, assim como causa incrustações nas estruturas de abastecimento de água.

Quanto ao **ferro**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,36 mg/L) excedeu o VMP de 0,30 mg/L e a mediana (0,05 mg/L) se manteve abaixo do VMP considerado, conforme preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021. Foram detectadas 44 violações de 267 amostragens (16,48%), sendo o máximo registrado de 15,21 mg/L. Tais concentrações podem estar vinculadas à geologia local de alguns dos pontos, visto que a parte do Alto Rio das Velhas está localizada no quadrilátero ferrífero;
- Na Rede Guarani, a média (0,06 mg/L) e a mediana (0,04 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações em 555 amostragens, sendo o máximo registrado de 0,13 mg/L;
- A Rede Norte de Minas, apresentou média (0,44 mg/L) acima do VMP, enquanto a mediana (0,06 mg/L) se manteve abaixo desse limite. Foram detectadas 62 violações de 405 amostragens (15,31%), sendo o máximo registrado de 31,63 mg/L; e
- Na Rede PANM, a média (3,94 mg/L) e a mediana (0,83 mg/L) ultrapassaram o VMP e foram detectadas 67 violações de 108 amostragens realizadas (62,04%), sendo o máximo registrado de 77,85 mg/L.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes, exceto na Rede Guarani. Entretanto, eles não foram desconsiderados, devido à relação com a da geologia local dos pontos monitorados, embora não necessariamente representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

Dos 63 poços que apresentaram violações de ferro, no que se refere à geologia: um se encontra no complexo Belo Horizonte, composto por complexo Granitóide tipo TTG e granitóides associados; dois estão no complexo Porteirinha, constituído por gnaisse, rochas metraultramáficas, migmatitos, anfíbolitos; um está no Granito Caladão, composto por sienogranito; um na unidade Suíte Guanambi, composto por monzogabro, monzodiorito, granito, monzonito, quartzo monzonito e quartzo sienito e um na Suíte Paciência, que contém monzonito, quartzo sienito e sienito em sua composição; dois estão na unidade Leucogranito Faísca, composto por Leucogranito; e um no Granito Pedra Azul que contém granito, monzogranito e sienogranito. Estas

unidades são compostas por corpos graníticos, que podem conter ferro em sua composição mineral (ROSIÈRE e CHEMALE JR, 2000).

Outros quatro poços estão na formação Ribeirão da Folha, composta por metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada; um no grupo Macaúbas com metarritmitos, quartzito puros e ferruginosos, formação ferrífera e metaultramafito, metamáfica, metarcóseo, calcissilicática, metadiamicrito e metacarbonáticas em sua composição; um na formação Salinas, composto por metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto; cinco estão na formação Serra da Saudade com siltito e argilito em sua composição; 30 se encontram na formação Serra de Santa Helena composta por siltitos, argilitos ardosianos e margas; cinco estão na formação Sete Lagoas, composta por metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico; dois na formação Três Marias, constituída por arenito arcoseano, arcóseo, siltito e argilito; um na formação Logoa do Jacaré, constituído por calcário e pelito. Estas formações estão inseridas no grupo Bambuí, onde é possível detectar matéria carbonosa e óxido de ferro associados (IGLESIAS e UHLEIN, 2009).

Dentre os poços que apresentaram violação de ferro, um está localizado no grupo Nova Lima, com metabasaltos, metavulcanoclásticas félsicas, anfíbolito, dolomito, metagrauvaca, quartzito e formação ferrífera e um está localizado no grupo Itabira, composto por itabirito, dolomito e filito, que compõem um conjunto de formações ferríferas metamórficas. Ambos os grupos estão localizados na região do Quadrilátero Ferrífero, uma das principais regiões produtoras de ferro do mundo (ROSIÈRE e CHEMALE JR, 2000).

Por fim, três poços estão localizados no subgrupo Paraopeba, constituído por dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga e calcarenito. De acordo com Fonseca e Vianna (2012), este subgrupo apresenta mineralizações lateríticas ferro-manganesíferas de forma predominantemente difundida em sedimentos transgressivos.

O máximo registrado para ferro nas redes de monitoramento foi de 77,85 mg/L, no ponto PME_PA1 da Rede PANM para a amostragem realizada no dia 20/05/2019, quase 260 vezes superior ao VMP. Importante ressaltar que o mínimo registrado para

este poço foi de 26,95 mg/L, portanto, todas as amostragens apresentaram violação para tal parâmetro, além de violações de chumbo, manganês e turbidez. A maior concentração detectada no trabalho de Kumar e Krishna (2021) foi de 2,70 mg/L enquanto a de Diop *et al.* (2023), foi de 3,1 mg/L. Resultados estes 28,8 e 25,1 vezes menores que o máximo detectado pelo presente trabalho, respectivamente. Diop *et al.* (2023) associaram os valores registrados às formações geológicas ricas em hidróxido de ferro e às atividades minerárias do entorno.

A respeito do **manganês**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,079 mg/L) excedeu o VMP de 0,0500 mg/L considerado e a mediana (0,003 mg/L) se manteve abaixo do VMP, preconizado pela CONAMA nº 396/2008 – Dessedentação de Animais. Foram detectadas 43 violações de 267 amostragens (16,10%), sendo o máximo registrado de 1,720 mg/L. Tais concentrações podem estar vinculadas à geologia local de alguns dos pontos, visto que a parte do Alto Rio das Velhas está localizada no quadrilátero ferrífero;
- Na Rede Guarani, a média (0,016 mg/L) e a mediana (0,003 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e foram detectadas três violações de quinze amostragens (20%), sendo o máximo registrado de 0,086 mg/L;
- A Rede Norte de Minas, apresentou média (0,067 mg/L) acima do VMP, enquanto a mediana (0,011 mg/L) se manteve abaixo desse limite. Foram detectadas 62 violações de 405 amostragens (25,19%), sendo o máximo registrado de 2,231 mg/L; e
- Na Rede PANM, a média (0,221 mg/L) e a mediana (0,127 mg/L) ultrapassaram o VMP. Foram detectadas 69 violações de 108 amostragens realizadas (63,89%), sendo o máximo registrado de 2,427 mg/L.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes. Entretanto, novamente, eles não foram desconsiderados, devido à relação com a da geologia local dos pontos monitorados, embora não necessariamente representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

Dos 58 poços que apresentaram violações de manganês, no que se refere à geologia: um está no complexo Belo Horizonte, constituído pelo complexo Granitóide tipo TTG e granitóides associados; dois estão no complexo Porteirinha, composto por gnaisse, rochas metraultramáficas, migmatitos e anfibolitos; um no Granito Caladão, composto por sienogranito; um no Granito Pedra Azul, que é composto por granito, monzogranito e sienogranito; um na unidade Suíte Guanambi, composta por monzogabro, monzodiorito, granito, monzonito, quartzo monzonito e quartzo sienito; dois poços situados no Leucogranito Faísca, composto por Leucogranito; e dois na Suíte Paciência, composta por monzonito, quartzo sienito e sienito. Estas unidades são compostas por corpos graníticos, que podem conter manganês em sua composição mineral (VILELA *et al.*, 2014).

Outros três poços estão inseridos na formação Logoa do Jacaré, que contém calcário e pelito; dois na formação Serra da Saudade, com siltito e argilito; 27 poços localizados na formação Serra de Santa Helena, que contém siltitos, argilitos ardosianos e margas; dois poços na formação Três Marias, composto por arenito arcoseano, arcóseo, siltito e argilito; e quatro na formação Sete Lagoas, contendo metassiltitos e metargilitos laminados e com calcário calcítico/dolomítico; três no subgrupo Paraopeba, que contém dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga e calcarenito. Estas formações fazem parte do grupo Bambuí, pertencente a área de ocorrência de crostas manganésíferas (FONSECA e VIANNA, 2012).

Dos poços que apresentaram violações de manganês, quatro se encontram na formação Ribeirão da Folha, contendo metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas e formação ferrífera bandada; um na formação Salinas, que contém em sua composição metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto. Tais formações fazem parte do Grupo Macaúbas que, de acordo com Vilela *et al.* (2014), apresenta depósitos de manganês.

No Grupo Diamantina foi detectado um poço com violação, localizado na formação Sopa-Brumadinho, com metaconglomerado, metapelito, quartzito, filito e xisto. Chaves e Benitez (2004) reportam que as cangas limoníticas geralmente ocorrem associadas a hidróxidos de alumínio e/ou manganês e no Grupo Diamantina se desenvolvem sobre os metaconglomerados da Formação Sopa-Brumadinho.

Por fim, um dos poços que apresentou violação de manganês está localizado no Grupo Serra Geral, contendo basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio. De acordo com Santos (2020), os aquíferos situados nesse grupo podem apresentar águas com altos teores de ferro e manganês, resultantes do intemperismo dos minerais dos basaltos.

O máximo registrado para manganês nas redes de monitoramento foi de 2,427 mg/L, no ponto PM_ARA1 da Rede PANM para a amostragem realizada no dia 22/05/2019, acima do VMP. Importante ressaltar que tal violação é frequente neste poço, assim como chumbo, dureza, ferro e turbidez. A maior concentração detectada no trabalho de Kumar e Krishna (2021) foi de 8,009 mg/L enquanto a de Diop *et al.* (2023), foi de 0,380 mg/L. Resultados estes 3,3 vezes maiores e 6,4 vezes menores que o máximo detectado pelo presente trabalho, respectivamente. Assim como para as concentrações de ferro, Diop *et al.* (2023) associaram os valores registrados às formações geológicas ricas em hidróxido de ferro e às atividades minerárias da região.

A respeito do **mercúrio**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,18 µg/L), a mediana (0,20 µg/L) e o máximo registrado (0,20 µg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 1,00 µg/L, preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021;
- Na Rede Guarani, a média (0,20 µg/L) e a mediana (0,20 µg/L) e o máximo registrado (0,20 µg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 1,0000 µg/L;
- Na Rede Norte de Minas, a média (0,20 µg/L) e a mediana (0,20 µg/L) e o máximo registrado (0,20 µg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 1,0 µg/L;
- Na Rede PANM, a média (0,21 µg/L), a mediana (0,20 µg/L) e o máximo registrado (0,72 µg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 1,0 µg/L;

Pela análise do *box-plot*, foi detectado um *outlier* acima do quartil superior na Rede PANM, no valor de 0,72 µg/L, próximo ao VMP de 1,00 µg/L. Também foram detectados *outliers* abaixo do quartil inferior para a Rede Bacia do Rio das Velhas com o valor de 0,02 µg/L. Tais resultados correspondem ao Limite de Quantificação do método das análises realizadas no ano de 2022 para esta rede.

Nenhum dos poços apresentaram violações de mercúrio e, no que se refere à geologia, o poço com maior concentração detectada se encontra na unidade geológica subgrupo Paraopeba, composta por dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga e calcarenito. Tal concentração não pode ser justificada pelo contexto geológico e necessita de uma investigação mais profunda nos arredores do poço, a fim de entender se existe correlação entre o resultado encontrado com alguma atividade antrópica da região.

Conforme citado, o máximo registrado para mercúrio foi 0,72 µg/L, no ponto PME_UNA1 da Rede PANM, para a amostragem realizada no dia 19/09/2018. As maiores concentrações detectadas no trabalho de Diop *et al.* (2023) foram de 0,31 e 0,32 µg/L, sendo o último 2,3 vezes menor que o máximo detectado pelo presente trabalho. Os demais registros apontaram para concentrações abaixo dos limites de detecção, assim como a maior densidade do conjunto amostral das quatro redes de monitoramento do IGAM. Os autores associaram a detecção de mercúrio à prática de mineração de ouro artesanal em pequena escala na região de Sabodala, visto que ele não é utilizado na mineração industrial, mas ainda é utilizado na extração de ouro pela população.

Com relação ao **nitrato**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,79 mg/L) e a mediana (0,38 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 10,00 mg/L, preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021. Foi detectada uma violação de 267 amostragens (0,37%), correspondente ao máximo registrado de 15,2000 mg/L.
- Na Rede Guarani, a média (1,45 mg/L) e a mediana (0,34 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações, sendo o máximo registrado de 8,00 mg/L;
- A Rede Norte de Minas, apresentou média (2,91 mg/L) e mediana (1,22 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP. Foram detectadas 31 violações de 405 amostragens (7,65%), sendo o máximo registrado de 21,00 mg/L; e
- Na Rede PANM, a média (0,82 mg/L) e a mediana (0,25 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações, sendo o máximo registrado de 9,50 mg/L.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes. Entretanto, eles não foram desconsiderados, pois, aqueles resultados podem ser um indicativo de contaminação dos aquíferos por águas residuárias, embora não necessariamente representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

Quanto à geologia dos 16 poços que apresentaram violações de nitrato: um está na formação Logoa do Jacaré, constituída por calcário e pelito; dez estão na formação Serra de Santa Helena, formada por siltitos, argilitos ardosianos e margas; um na formação Três Marias, constituída por arenito arcoseano, arcóseo, silito e argilito. Estas formações pertencem ao Grupo Bambuí e estão inseridas em aquíferos que possuem porosidade primária (Poroso/Fissural e formações Cenozóicas), ou seja, comportam-se como aquíferos porosos, com exceção de dois poços localizados na unidade hidrogeológica Carbonatos-Metacarbonatos.

Com relação aos demais poços, um está na unidade geológica Suíte Guanambi, que se constitui de monzogabro, monzodiorito, granito, monzonito, quartzo monzonito e quartzito sienito; um na Suíte Paciência, composta por monzonito, quartzo sienito e sienito e um no Complexo Porteirinha, composto por gnaisse, rochas metatramáficas, migmatitos e anfibolitos, inseridos no Cristalino e um no grupo Nova Lima, formado por metabasaltos, metavulcanoclásticas félsicas, anfibolito, dolomito, metagrauvaca, quartzito e formação ferrífera, inserido na unidade hidrogeológica Metassedimentos-metavulcânicas.

A contaminação dos aquíferos por nitrato pode estar associada às quantidades disponíveis no solo, à permeabilidade do meio, às condições climáticas, ao manejo da irrigação e à profundidade do lençol freático. De acordo com De Resende (2002), as principais fontes de contaminação da água por nitrato provêm de fertilizantes nitrogenados minerais e esterco manejados inadequadamente, podendo ainda estarem associadas à presença de matéria orgânica nitrogenada, originária do lançamento de esgotos. Nesse sentido, a consideração dos resultados de nitrato para a composição do presente índice funciona como um indicador de contaminações provenientes tanto de efluentes domésticos (relacionadas a *E. coli*, por exemplo), quanto do uso inadequado de outros insumos agrícolas, como os agrotóxicos.

O máximo registrado para nitrato nas redes de monitoramento foi de 21,00 mg/L no ponto CE001 da Rede Norte de Minas, para a amostragem realizada no dia 09/12/2019, acima do VMP. Importante ressaltar que tal violação foi detectada em mais uma amostragem do poço, não sendo uma violação recorrente. Outro parâmetro detectado acima do VMP para este poço foi dureza, o que ocorreu em todas as demais amostragens do CE001. A maior concentração detectada no trabalho de Kumar e Krishna (2021) foi de 53,04 mg/L, resultado 2,5 vezes maior que o máximo detectado pelo presente trabalho. Os autores associaram as altas concentrações registradas, principalmente pós-monção, às atividades de agricultura intensiva da região e ao uso indiscriminado de fertilizantes nitrogenados, lixiviados para as águas subterrâneas.

Para uma melhor definição das causas específicas das violações de nitrato detectadas nos poços de monitoramento do IGAM, seria importante uma análise aprofundada do uso e ocupação do solo nos entornos das locações. De toda forma, os indícios apontam para fontes de contaminação antrópicas, associadas às características geológicas e hidrogeológicas.

Quanto à **turbidez**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (3,1 uT) excedeu o VMP de 1 uT considerado e a mediana (0,5 uT) se manteve abaixo do VMP preconizado pela Portaria GM/MS nº888/2021. Foram detectadas 85 violações de 267 amostragens (31,84%), sendo o máximo registrado de 65,5 uT;
- Na Rede Guarani, a média (0,5 uT) e a mediana (0,5uT) se mantiveram abaixo do VMP não foram detectadas violações, sendo o máximo registrado de 0,9 uT;
- A Rede Norte de Minas apresentou média (3,2 uT) acima do VMP, enquanto a mediana (0,5 uT) se manteve abaixo desse limite. Foram detectadas 117 violações de 405 amostragens (28,89%), sendo o máximo registrado de 134 uT; e
- Na Rede PANM, a média (34,8 uT) e a mediana (9,3 uT) ultrapassaram o VMP. Foram detectadas 69 violações de 108 amostragens realizadas (75,00%), sendo o máximo registrado de 512 uT.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes, exceto na Rede Guarani. Entretanto, eles não foram desconsiderados, devido à relação com a da geologia local dos pontos monitorados, embora não necessariamente representem o cenário de toda a rede de monitoramento. Importante ressaltar que a violação de turbidez pode estar relacionada às violações de ferro e manganês, visto que esses metais em suas formas oxidadas precipitam e conferem cor e turbidez à água.

Dos 89 poços que apresentaram violações de turbidez, no que diz respeito à geologia: um poço está localizado no Complexo Bação, que se constitui de granito e granodiorito; dois estão no complexo Belo Horizonte, composto por complexo granitóide tipo TTG e granitóides associados; dois no Complexo Porteirinha, constituído por gnaiss, rochas metraultramáficas, migmatitos e anfibolitos; quatro estão na formação Lagoa do Jacaré, composta por calcário e pelito; quatro na formação Ribeirão da Folha, contendo metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada; um está na formação Salinas, com metagrauvaca, metaconglomerado e micaxisto; cinco estão na formação Serra da Saudade, contendo siltito e argilito; 46 localizados na formação Serra de Santa Helena, composta por siltitos, argilitos ardosianos e margas; seis estão na formação Sete Lagoas, formada por metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico; um na formação Sopa-Brumadinho, que contém metaconglomerado, metapelito, quartzito, filito e xisto; quatro localizados na formação Três Marias, contendo arenito arcoseano, arcóseo, siltito e argilito; um poço no Granito Caladão, formado por sienogranito; um no Granito Pedra Azul, que se constitui de granito, monzogranito e sienogranito; um pertence ao grupo Itabira, formado por itabirito, dolomito e filito; dois no grupo Nova Lima, que contém metabasaltos, metavulcanoclásticas félsicas, anfibolito, dolomito, metagrauvaca, quartzito e formação ferrífera; dois na unidade Leucogranito Faísca, composta por leucogranito; três no subgrupo Paraopeba Dolomito, que contém ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga e calcarenito; um na unidade Suíte Carlos Chagas, formada por gnaiss granítico e leucogranito e dois na Suíte Paciência, composta por monzonito, quartzó sienito e sienito.

O máximo registrado para turbidez nas redes de monitoramento foi de 512,0 uT no ponto PME_PA1 da Rede PANM, para a amostragem realizada no dia 20/05/2019. Importante ressaltar que tal violação foi detectada em todas as amostragens do poço, sendo o mínimo registrado de 211,0 uT. Também foram detectadas violações de chumbo, ferro e manganês com recorrência. A maior concentração detectada no trabalho de Kumar e Krishna (2021) foi de 122,5 uT, resultado 4,2 vezes menor que o máximo detectado pelo presente trabalho. Os autores encontraram uma forte correlação entre a turbidez e o ferro e o manganês nas águas subterrâneas, devido às atividades de mineração da região.

No presente trabalho, assim como no de Kumar e Krishna (2021), também foi verificada uma correspondência entre as violações de turbidez, ferro e manganês. Observa-se que os contextos geológicos dos poços que apresentaram maiores concentrações de ferro e manganês coincidem com aqueles poços que apresentaram violações de turbidez. Isso decorre do fato de que o ferro e o manganês na ausência de oxigênio se apresentam na água em suas formas dissolvidas (reduzidas), como é o caso das águas dos poços. Quando expostas ao ar atmosférico, essas formas reduzidas voltam a oxidar, retornando à forma insolúvel, o que pode conferir cor e turbidez à água como consequência.

A respeito do **zinco**, é possível observar que:

- Na Rede Bacia do Rio das Velhas, a média (0,19 mg/L) e a mediana (0,02 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP de 2,00 mg/L, preconizado pela CONAMA nº 396/2008 – Irrigação. Foi detectada uma violação em 267 amostragens (0,37%), sendo o máximo registrado de 2,92 mg/L;
- Na Rede Guarani, a média (0,03 mg/L) e a mediana (0,02 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações, sendo o máximo registrado de 0,13 mg/L;
- Na Rede Norte de Minas, a média (0,06 mg/L) e a mediana (0,02 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP. Foi detectada uma violação de 405 amostragens (0,25%), sendo o máximo registrado de 6,22 mg/L; e

- Na Rede PANM, a média (0,08 mg/L) e a mediana (0,04 mg/L) se mantiveram abaixo do VMP e não foram detectadas violações, sendo o máximo registrado de 0,87 mg/L.

Pela análise do *box-plot*, foram detectados *outliers* acima do quartil superior em todas as redes. Entretanto, uma vez mais, eles não foram desconsiderados, devido à possível relação com a da geologia local dos pontos monitorados, embora não necessariamente representem o cenário de toda a rede de monitoramento.

Quanto à geologia dos dois poços que apresentaram violações de zinco, um está localizado na formação Sete Lagoas, composta por Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico e um na formação Serra de Santa Helena, que contém siltitos, argilitos ardosianos e margas. Estas formações fazem parte do grupo Bambuí, onde é possível detectar mineralizações de zinco hospedadas e reconhecer as diversas litofácies aflorantes, através do levantamento de seções estratigráficas (IGLESIAS E UHLEIN, 2009).

O máximo registrado para zinco nas redes de monitoramento foi de 6,22 mg/L no ponto VD020 da Rede Norte de Minas, para a amostragem realizada no dia 28/11/2018. Importante ressaltar que tal violação foi detectada apenas nesta amostragem. Parâmetros detectados acima do VMP com recorrência para este poço foram dureza, ferro e turbidez. A maior concentração detectada no trabalho de Sahoo e Khaoash (2020) foi de 0,30 mg/L e no de Najeeb e Saeed (2022) foi de 0,71 mg/L, resultados 20,7 e 8,8 vezes menores que o máximo detectado pelo presente trabalho, respectivamente.

5.3 Resultados obtidos pelo IQA_{SUB} e pelo IQA_{CCME}

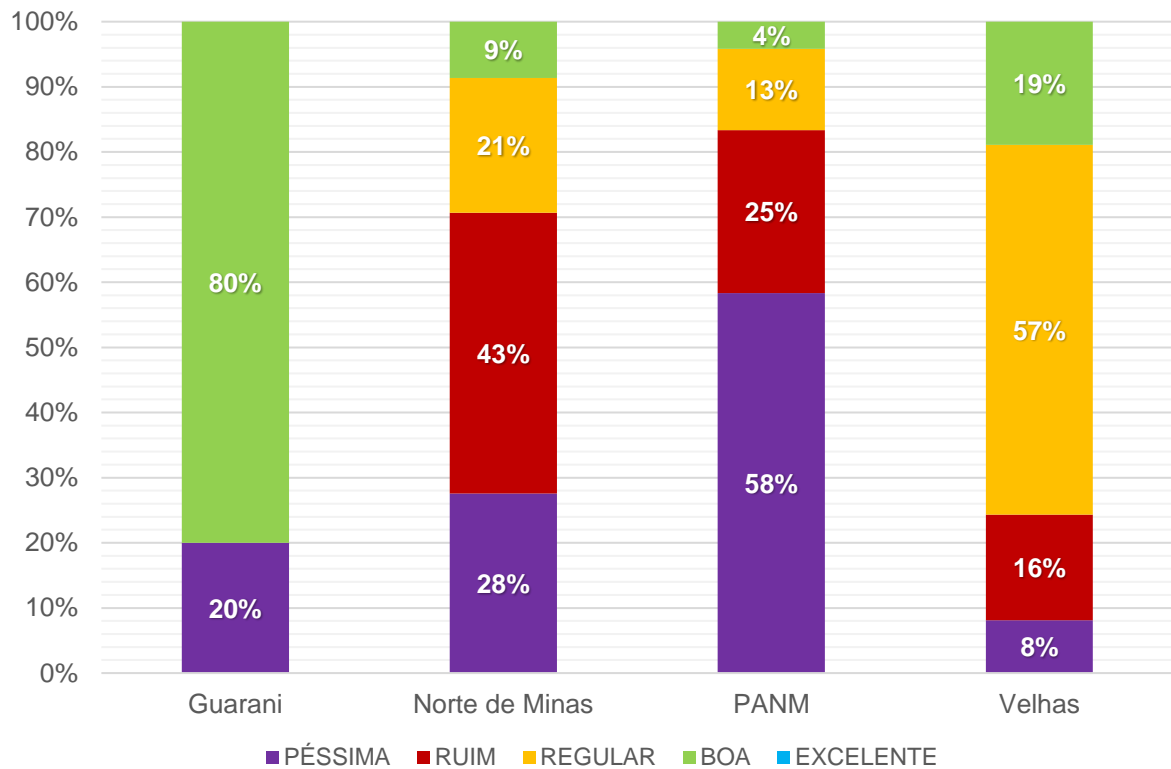
A partir do LI e LS estabelecidos e registrados na Tabela 6 foram desenvolvidas as curvas do IQA_{SUB} que estão compiladas no APÊNDICE C.

A fim de comparar o cálculo do IQA_{SUB} com o IQA_{CCME}, foi necessário realizar a média do IQA_{SUB} para cada poço, considerando o período de 2018 a 2022, visto que para o

cálculo do IQA_{CCME} é recomendado considerar quatro ou mais amostragens para a classificação de um único ponto.

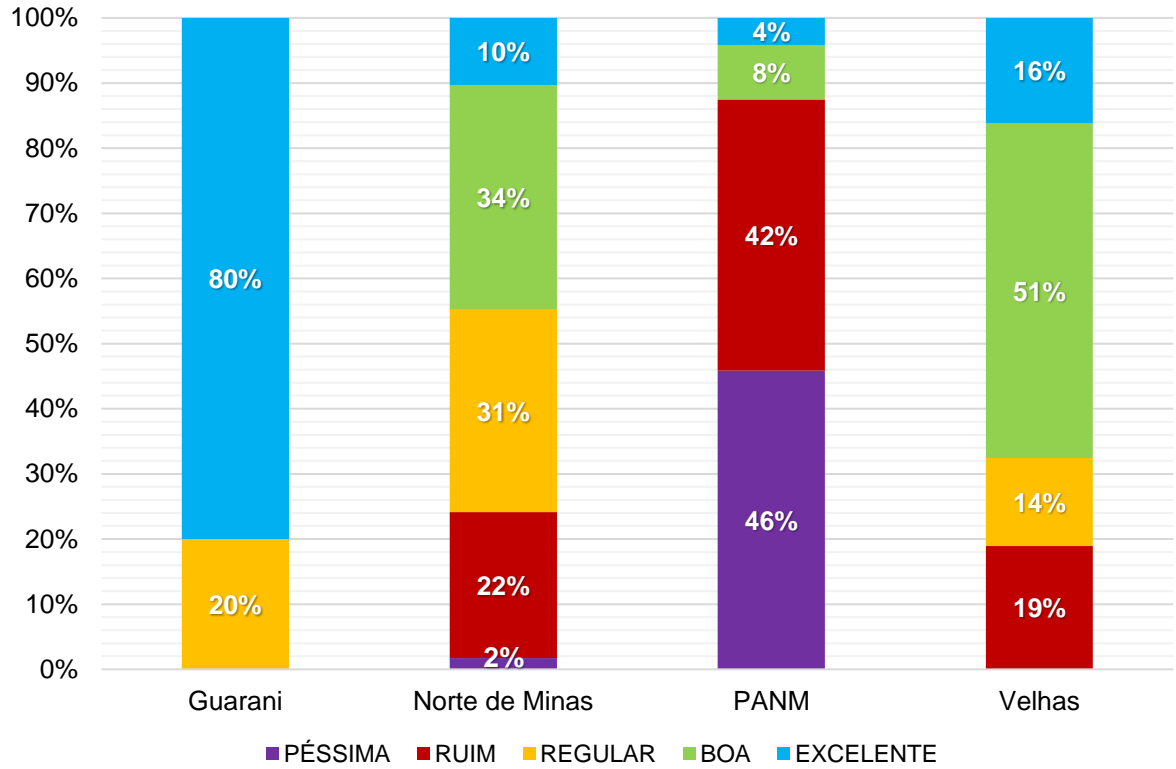
A Figura 13 apresenta o resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{SUB} e a Figura 14 o resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{CCME} por rede de monitoramento. Na Figura 15 e na Figura 16 constam os mapas com a classificação dos poços a partir do IQA_{SUB} e do IQA_{CCME} , respectivamente, e a Figura 17 apresenta o gráfico de dispersão do IQA_{CCME} versus IQA_{SUB} . Por fim, o APÊNDICE D consolida os resultados dos cálculos do IQA_{SUB} e do IQA_{CCME} de todos os pontos.

Figura 13 – Resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{SUB} por rede de monitoramento



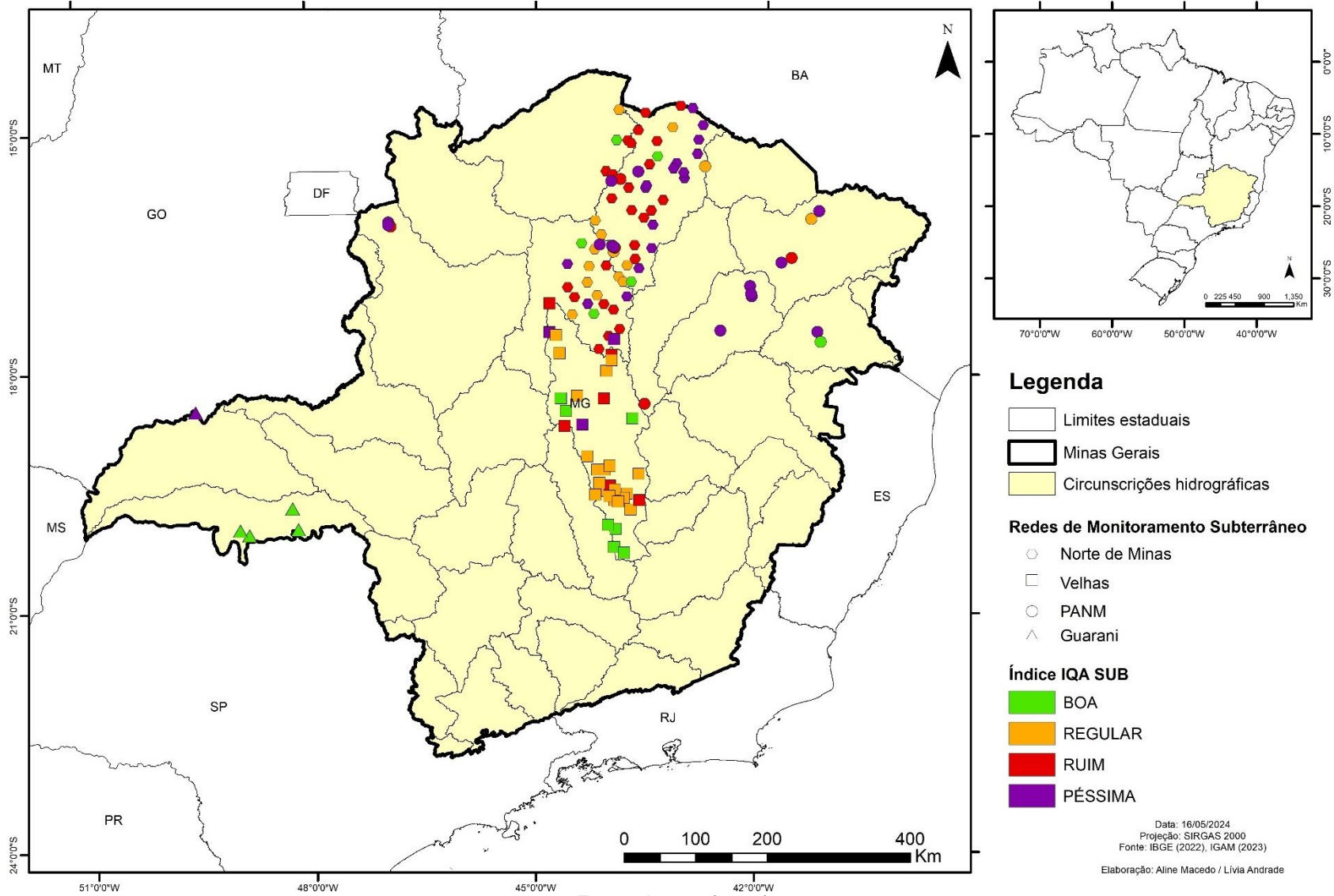
Fonte: Autora (2024).

Figura 14 – Resumo da classificação dos poços a partir do IQA_{CCME} por rede de monitoramento



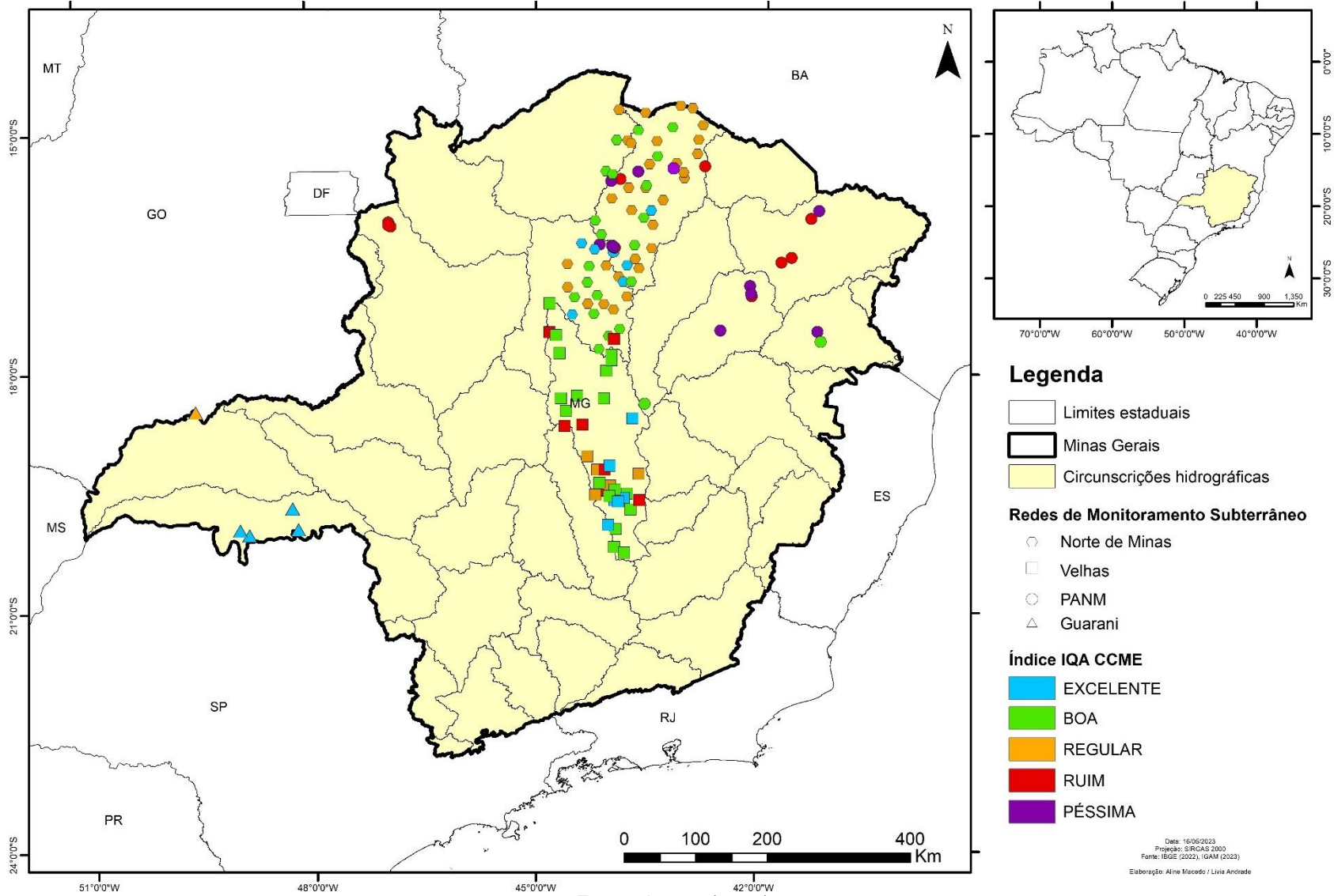
Fonte: Autora (2024).

Figura 15 – Mapa com a classificação pelo IQA_{SUB}



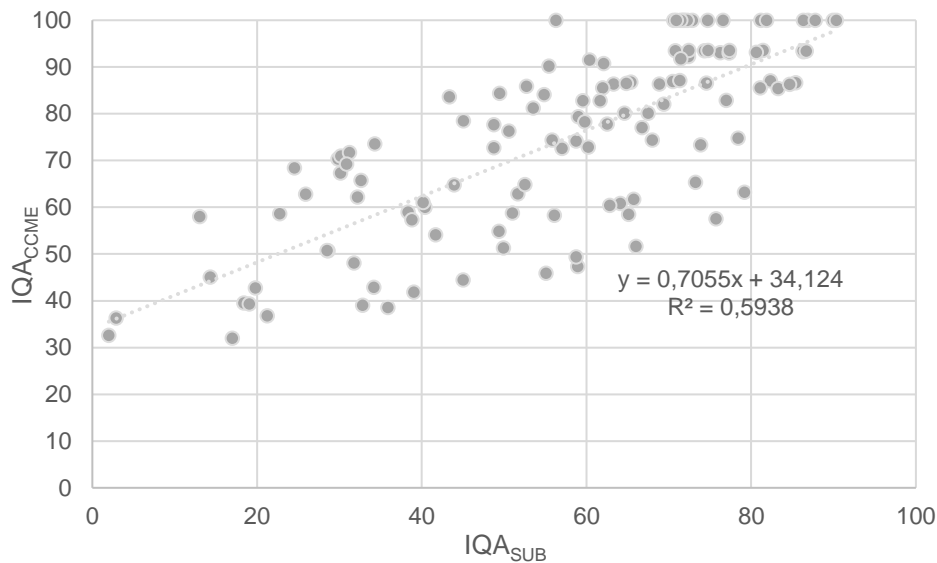
Fonte: Autora (2024).

Figura 16 – Mapa com a classificação pelo IQA_{CCME}



Fonte: Autora (2024).

Figura 17 – Gráfico de dispersão do IQA_{CCME} versus IQA_{SUB}



Fonte: Autora (2024).

Analisando os gráficos e o apêndice citados, observa-se que a ponderação dos parâmetros resultou em um índice mais restritivo em 88,71% dos casos. O que resultou em classificações mais restritivas para o IQA_{CCME} do que para o IQA_{SUB} para 11,29% dos resultados em 14 pontos (quatro da Rede Norte de Minas, cinco da Rede PANM e da Rede Bacia do Rio das Velhas) foram as violações médias detectadas nesses pontos para ferro, manganês e turbidez. Tais parâmetros possuem ponderação de 7%, 7% e 5%, respectivamente, ou seja, correspondem a três dos cinco parâmetros com os menores pesos devido à maior tratabilidade em estações de tratamento de água convencionais. Outras violações médias detectadas em três desses 14 pontos foram: arsênio (VMP=0,01 mg/L) no ponto MTBSP (0,013 mg/L) na Rede Bacia do Rio das Velhas e chumbo (VMP=0,01) nos pontos PM_ITA1 (0,048 mg/L) e PM_MV1 (0,012 mg/L) da Rede PANM. Apesar da ponderação destes parâmetros serem maiores (ambos com peso de 13%), os resultados encontrados ficaram próximos dos VMPs, o que contribuiu para uma classificação mais restritiva para o IQA_{CCME} do que para o IQA_{SUB}. As classificações desses pontos pelo IQA_{SUB} e pelo IQA_{CCME} foram, respectivamente: PM_ITA1 (55,1 – Ruim; 45,9 - Ruim), PM_MV1(66 – Regular; 51,7 - Ruim) e MTBSP (65,2 – Regular; 58,5 - Ruim). Vale ressaltar que a taxa de remoção média em estações de tratamento convencionais para o arsênio é de cerca de 75% (PAL *et al.*, 2007) e do chumbo de cerca 89% (NILSSON, 1971).

Quanto aos parâmetros que mais interferiram na classificação dos poços por rede de monitoramento, estes estão evidenciados pela Tabela 12, que apresenta as frequências absoluta simples e relativa simples para os parâmetros selecionados. A frequência absoluta foi realizada com a média dos resultados obtidos para cada poço. Na Tabela 12 não se apresentam os parâmetros urânio e zinco pela total ausência de violações médias.

Tabela 12 – Número de registros e frequências percentuais de violações absoluta simples e relativa simples para os parâmetros considerados no IQA_{SUB}

Parâmetro	Rede de Monitoramento								Σ Violações	
	Guarani		Norte de Minas		PANM		Rio das Velhas			
	nº	Percentual	nº	Percentual	nº	Percentual	nº	Percentual	nº	Percentual
Turbidez	0	0,0	27	6,7	21	19,4	13	4,9	61	7,7
Manganês	1	6,7	16	4,0	18	16,7	10	3,7	45	5,7
Ferro	0	0,0	14	3,5	18	16,7	9	3,4	41	5,2
Dureza	1	6,7	31	7,7	1	0,9	1	0,4	34	4,3
Chumbo	0	0,0	1	0,2	7	6,5	0	0,0	8	1,0
Nitrato	0	0,0	3	0,7	0	0,0	0	0,0	3	0,4
Arsênio	1	6,7	0	0,0	0	0,0	1	0,4	2	0,3
Mercúrio	0	0,0	0	0,0	0	0,01	0	0,0	0	0,0

Fonte: Autora (2024).

Com o auxílio do Excel, foi possível determinar que a correlação linear de *Pearson* entre o IQA_{SUB} e o IQA_{CCME} é de 0,7706. De acordo com a Tabela 13, como o valor de $|r|$ se encontra entre o intervalo 0,6 – 0,9, observa-se que a intensidade da correlação entre os dois índices é forte. Para um nível de significância de 1% $|t_{calc}| = 13,41 > t_{0,01;123} = 2,62$, rejeita-se H_0 , ou seja, existe uma associação significativa entre o IQA_{SUB} e o IQA_{CCME}. Vale ressaltar que, embora exista uma forte correlação entre os dois índices, o IQA_{SUB} tende a gerar classificações inferiores àquelas resultantes da aplicação do IQA_{CCME} e que a magnitude dessa diferença aumenta com a redução da qualidade da água.

Tabela 13 – Proposição de valores de r e respectiva intensidade da correlação

$ r $	Correlação
0,0	Nula
0,0 – 0,3	Fraca
0,3 – 0,6	Regular
0,6 – 0,9	Forte
0,9 – 1,0	Muito forte
1,0	Plena ou perfeita

Fonte: Adaptado de Callegari-Jacques (2005)

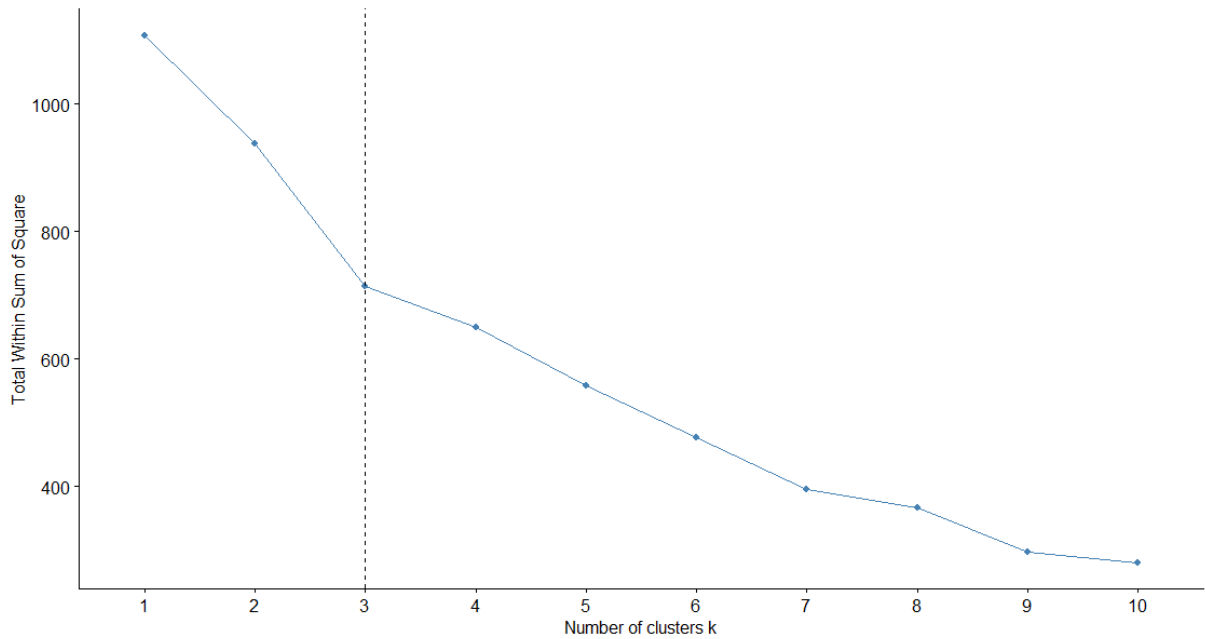
Para um mesmo nível de significância Mester *et al.* (2020) obtiveram as correlações de 0,552 entre C_d e o WQS e a correlação de 0,853 entre o IQA_{CCME} e o C_d . Os autores atribuíram as diferenças observadas e a menor correlação entre C_d e o WQS à ponderação do índice WQS, o que resultou em uma resposta mais sensível às violações, o que também pode ser inferido para o IQA_{SUB} proposto. Os parâmetros selecionados possuem pesos atribuídos de acordo com suas toxicidades, danos potenciais à saúde humana e taxas de remoção em estações de tratamento convencionais. Comparando os resultados de correlação do IQA_{CCME} com os índices ponderados WQS (MESTER *et al.*, 2020) e IQA_{SUB} proposto no presente trabalho, observa-se que o IQA_{SUB} obteve uma intensidade de correlação maior. Portanto, mostra-se como uma ferramenta eficaz para a classificação de águas subterrâneas em áreas de mineração, podendo auxiliar na gestão e tomadas de decisão dos órgãos competentes, assim como no repasse das informações para o público.

5.4 Análise de *clusters* e de componentes principais

Para a aplicação do algoritmo *k-means* foi necessário, inicialmente, realizar a padronização dos dados por meio do método *Zscores*, conforme apresentado no APÊNDICE E.

Com a base de dados normalizada, foi possível implementar o algoritmo *k-means* por meio do *software Rstudio* e o código utilizado está descrito no APÊNDICE F. Após o carregamento dos dados, a primeira etapa do algoritmo foi responsável por estabelecer o número ótimo de *clusters*, e está representado no gráfico da Figura 18.

Figura 18 – Gráfico do número ótimo de *clusters*, pelo método de *elbow*

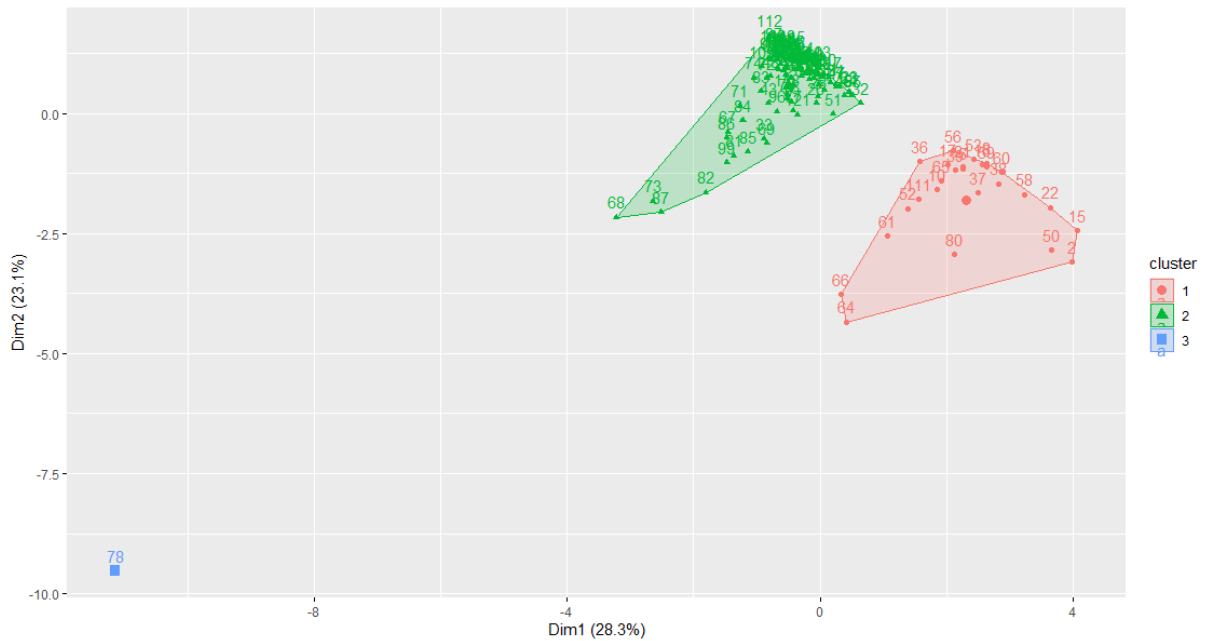


Fonte: Autora (2024).

Observa-se que $k = 3$ é o ponto correspondente ao número ótimo de *clusters*, pois é o local em que a soma dos quadrados reduziu drasticamente e que resultou no “cotovelo” da curva. Nazir *et al.* (2016) consideraram $k = 5$, Obeidat e Awawdeh, (2021) $k = 3$, Oukil, *et al.* (2021) $k = 4$ e Marín Celestino *et al.* (2019) $k = 2$.

A partir do número ótimo de *clusters* foi possível realizar a *clusterização k-means*, e os 124 poços ficaram agrupados conforme apresentado no gráfico da Figura 19.

Figura 19 – Gráfico da clusterização *k-means* de 124 poços das redes de monitoramento



O *cluster 1* agrupou 26 pontos (20,97%), o *cluster 2* foi composto por 97 (78,23%) e o *cluster 3* se constituiu de apenas um ponto (0,80%). Os estudos de Marín Celestino *et al.* (2019) agruparam 38% dos resultados no *cluster 1*, com águas caracterizadas pela alta salinidade e pela poluição agrícola e 62% no *cluster 2*, com águas de elevada dureza. A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam a estatística descritiva dos *clusters 1* e *2*, respectivamente, enquanto a Tabela 12 apresenta as concentrações dos parâmetros do *cluster 3* para o único poço que o formou. Ressalta-se que os resultados dos índices IQA_{SUB} e IQA_{CCME} foram inseridos em tais tabelas para fins de comparação, mas que não fizeram parte do processo de *clusterização* pelo *software Rstudio*.

Tabela 14 – Estatística descritiva das águas dos poços do *cluster 1*, com destaque para as violações

	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}	IQA _{CCME}
Média	0,004	0,006	513,0	1,03	0,184	0,206	6,00	5,9	0,16	34,99	64,57
Mediana	0,003	0,005	502,4	0,21	0,070	0,200	5,88	1,0	0,04	32,02	66,13
Desvio padrão	0,005	0,002	201,2	1,92	0,256	0,034	3,90	11,2	0,27	13,88	15,32
Variância da amostra	0,000	0,000	40470,0	3,67	0,066	0,001	15,22	126,2	0,07	192,59	234,68
Mínimo	0,001	0,005	101,0	0,03	0,003	0,178	0,52	0,5	0,02	2,89	32,02
Máximo	0,023	0,016	1056,8	7,12	0,896	0,373	14,42	47,3	1,27	65,15	100
Contagem	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26

Fonte: Autora (2024).

Tabela 15 – Estatística descritiva das águas dos poços do *cluster 2*, com destaque para as violações

	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}	IQA _{CCME}
Média	0,002	0,006	177,5	0,82	0,079	0,191	0,89	8,1	0,09	63,73	77,57
Mediana	0,001	0,005	175,7	0,12	0,011	0,200	0,57	1,0	0,04	66,76	82,87
Desvio padrão	0,001	0,005	112,7	1,81	0,150	0,012	0,87	17,8	0,08	17,59	18,99
Variância da amostra	0,000	0,000	12689,7	3,28	0,023	0,000	0,76	316,6	0,01	309,52	360,60
Mínimo	0,001	0,005	6,1	0,03	0,003	0,155	0,15	0,5	0,02	14,33	36,84
Máximo	0,007	0,048	521,4	11,44	0,897	0,200	5,06	101,2	0,35	90,35	100
Contagem	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97

Fonte: Autora (2024).

Tabela 16 – Resultados dos parâmetros do único ponto do *cluster 3*, com destaque para as violações

Ponto	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}	IQA _{CCME}
PME_PA1	0,002	0,031	70,8	44,39	0,421	0,200	0,70	345,0	0,08	2,00	32,67

Fonte: Autora (2024).

Pela análise das tabelas, observa-se que a qualidade da água do *cluster 1* concentrou poços que ficaram enquadrados nas categorias *péssima*, *ruim* e *regular*, com mínimo de 2,89, máximo de 65,15, média de 34,99 e mediana de 32,02 para o IQA_{SUB}. Para o IQA_{CCME}, foram registrados poços classificados desde a categoria *péssima* até a categoria *excelente*, com mínimo de 32,02, máximo de 100, média de 64,57 e mediana de 66,13. Quanto aos parâmetros considerados na análise de agrupamentos, observa-se que os mais críticos foram: arsênio (média de 0,004 mg/L e mediana de 0,003 mg/L), dureza (média de 513,0 mg/L e mediana de 502,4 mg/L), mercúrio (média de 0,206 µg/L e mediana de 0,200 µg/L), nitrato (média de 6,00 mg/L e mediana de 5,88 mg/L) e zinco (média de 0,16 mg/L e mediana de 0,04 mg/L).

Quanto ao *cluster 2*, os poços se enquadraram desde a categoria *péssima* até a categoria *boa* para o IQA_{SUB} e da categoria *péssima* até a categoria *excelente* para o IQA_{CCME}. Em tal agrupamento, o parâmetro crítico foi o chumbo (média de 0,006 mg/L e mediana de 0,005 mg/L).

Por fim, o *cluster 3* se caracteriza pelos índices IQA_{SUB} e IQA_{CCME} enquadrados na categoria *péssima*. Tal fato se deve, principalmente, à discrepância na qualidade encontrada para este poço quando comparado com os demais, com elevada turbidez (345 vezes maior que o VMP) e concentração de ferro (147,95 vezes maior que o VMP), bem como à concentração de manganês (8,42 vezes maior que o VMP).

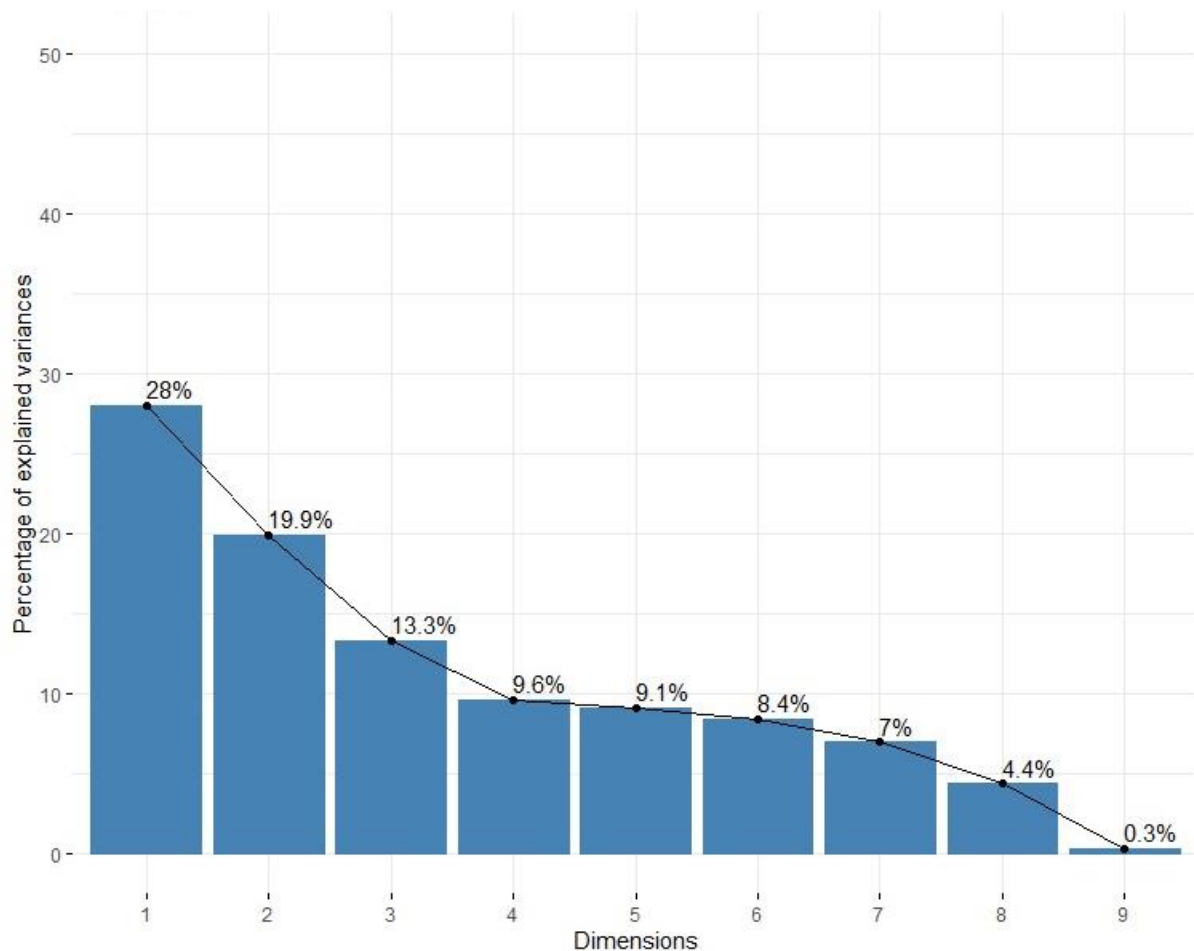
Marín Celestino *et al.* (2019) detectaram que o que definiu o *cluster 1* foram os parâmetros condutividade elétrica, SDT, Na⁺, SO₄²⁻, Cl⁻, K⁺ e NO₃⁻, enquanto para o *cluster 2* se caracterizou pelas elevadas concentrações de dureza total, Ca²⁺, K⁺ e pH. Oukil, *et al.* (2021) desenvolveram uma classificação a partir do método *k-means* e encontraram quatro *clusters*, classificados como: *cluster 1* – excelente, *cluster 2* – bom, *cluster 3* – permissível e *cluster 4* – inadequado. Nesse estudo a *clusterização* foi baseada apenas nos valores individuais dos parâmetros, sem associar as classificações a um índice pré-existente, que encapsula o resultado desses valores. Constitui-se, assim, de uma outra proposta de índice, com a classificação composta a partir dos *clusters* formados, diferente do índice proposto no presente estudo.

Quanto aos *clusters* definidos no presente trabalho, pode-se notar que a adequação dos agrupamentos à classificação realizada pelo IQA_{SUB} foi maior que a observada

para o IQA_{CCME} , corroborando a eficiência do índice desenvolvido neste estudo. Tal fato pode estar associado aos pesos atribuídos aos parâmetros. De toda forma, o IQA_{SUB} também apresentou restrições ao agrupar poços de classificações distintas no *cluster 2*.

No que tange à análise dos componentes principais (ACP), o código utilizado está descrito no APÊNDICE G. O gráfico da Figura 20 apresenta a visualização do percentual da variância total que cada componente principal explica, ou seja, o quanto da variação de dados é representada por cada componente. Observa-se que as duas primeiras componentes principais - F1 (Dim.1) e F2 (Dim.2) - são capazes de explicar 47,9% da variância total, o que não representa um percentual tão elevado.

Figura 20 – Gráfico da inércia explicada por cada componente principal

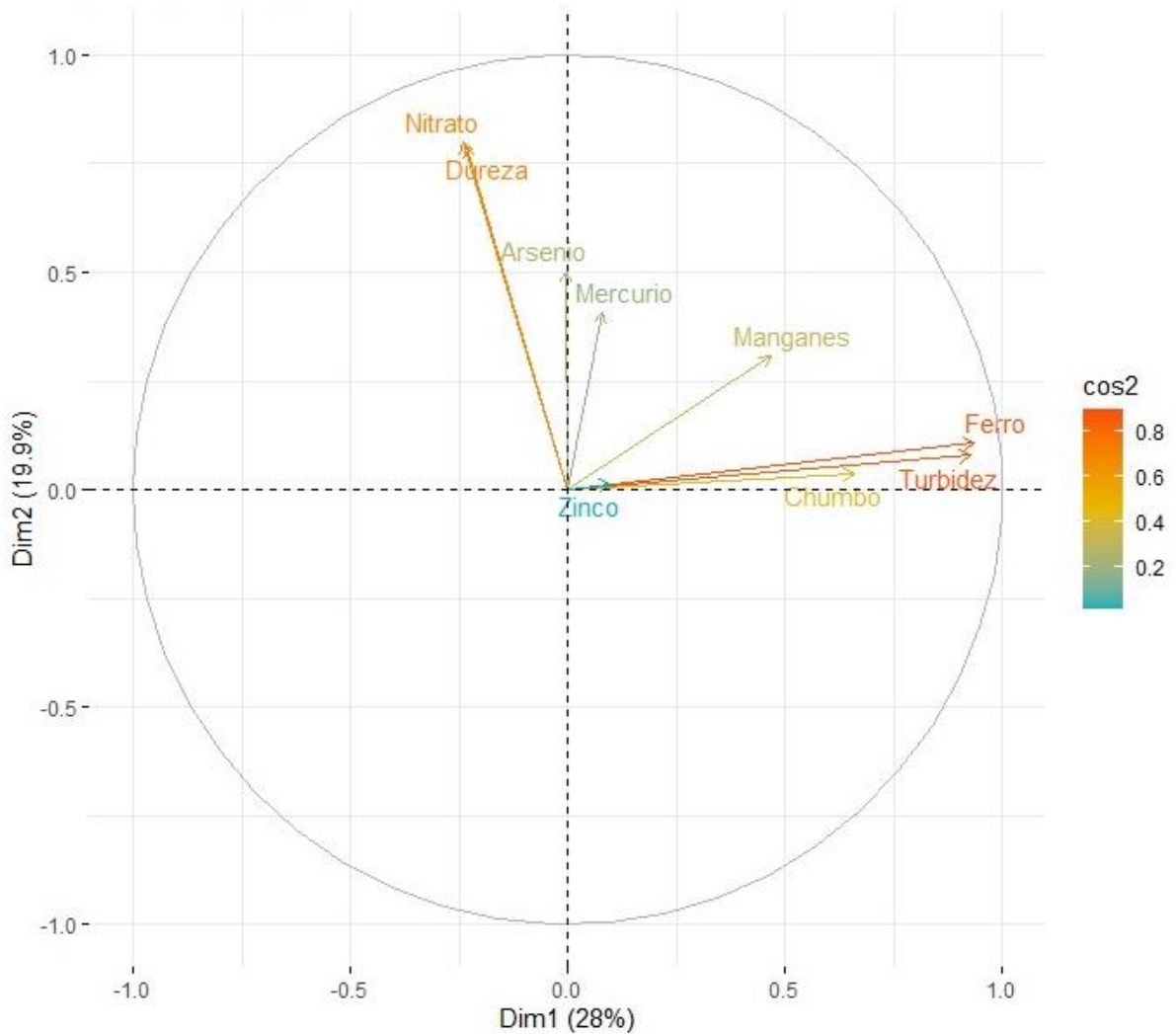


Fonte: Autora (2024).

Quanto à Figura 21, esta apresenta o gráfico da qualidade no mapa de fatores, por meio da visualização dos valores de \cos^2 , correspondente à proporção da variância

da variável original que é explicada pelo componente principal específico. Cada variável da análise é considerada um vetor, com propriedades de comprimento e direção e que têm suas correlações representadas em dimensões individuais. Portanto, no caso de nove variáveis, as correlações estão vinculadas a nove dimensões, uma para cada variável. Nesse sentido, este gráfico permite detectar a contribuição de cada variável para a formação dos dois componentes principais, representando essas variáveis em apenas duas dimensões, permitindo visualizar geometricamente a correlação entre as variáveis.

Figura 21 – Gráfico da qualidade no mapa de fatores – visualização por valores de \cos^2



Fonte: Autora (2024).

Quanto à Tabela 17, esta apresenta o resumo das variáveis e dos cinco primeiros componentes principais obtidos por meio da aplicação da ACP.

Tabela 17 – Coordenadas das variáveis nos cinco componentes principais com destaque para as maiores correlações

Parâmetros	F1 (Dim.1)	F2 (Dim.2)	F3 (Dim.3)	F4 (Dim.4)	F5 (Dim.5)
Arsênio	-0,004579911	0,5017363	0,512455554	0,3457485	-0,19844489
Chumbo	0,658777015	0,03810383	-0,036179967	-0,1140635	0,07488649
Dureza	-0,232216972	0,78873249	0,023403353	-0,2435339	-0,20655382
Ferro	0,937173865	0,10716548	-0,001148453	-0,1849225	-0,07472697
Manganês	0,468959625	0,30754184	0,054378342	0,6539219	-0,0851319
Mercúrio	0,079054598	0,40836055	-0,595989401	0,2517323	0,57806216
Nitrato	-0,239598488	0,7989945	-0,066916726	-0,3041923	0,07130802
Turbidez	0,926844496	0,07941118	-0,041150097	-0,2091608	-0,08468833
Zinco	0,101225333	0,01233823	0,754885513	-0,1196372	0,60881659

Fonte: Autora (2024).

Os cinco fatores principais são capazes de explicar 79,9% da variância total. Observa-se que a componente principal F1 (Dim.1) contribui com 28% e os parâmetros que possuem um papel dominante na formação do primeiro componente principal são: chumbo, ferro e turbidez. Tanto pela análise da tabela, quanto pela análise do gráfico da qualidade no mapa de fatores, é possível observar que o ferro e a turbidez estão altamente correlacionados. Tal fato pode indicar que as partículas suspensas, responsáveis pela turbidez detectada, estão associadas à formação de hidróxidos de ferro. Isso ocorre quando a água proveniente de poços com alta concentração de ferro em sua forma reduzida entra em contato com o gás oxigênio da atmosfera e assume sua forma oxidada, que é insolúvel. No que diz respeito à componente F2 (Dim.2), esta contribui com 19,9% da variância total e os parâmetros com papel dominante na sua formação são: dureza e nitrato. Quanto à componente F3 (Dim.3), esta contribui com 13,3% da variância e os parâmetros dominantes são arsênio e zinco. A componente F4 (Dim.4) contribui com 9,6% e é representada pelo manganês. Por fim, a componente F5 (Dim.5) é responsável por 9,1% da variância total e o parâmetro dominante é o mercúrio. Ressalta-se que as altas concentrações dos parâmetros que foram responsáveis pela maior contribuição na formação dos componentes principais possuem forte vinculação com as características geológicas e hidrogeológicas das regiões em que os poços estão inseridos. Além disso, os parâmetros podem estar vinculados a ações antrópicas, principalmente a eventuais atividades de mineração nas proximidades dos poços.

Nazir *et al.* (2016) consideraram três fatores como componentes principais, e que explicaram 83,30% da variância total. O primeiro componente (52,64% da variância

total) teve como parâmetros dominantes SDT, cálcio, magnésio e dureza, que os autores associaram a vestígios de poluição orgânica pontuais. O segundo componente (16% da variância total) teve como parâmetros principais SDT e cloreto, associados às atividades agrícolas, devido ao escoamento de fertilizantes, sedimentos e pesticidas. E o terceiro componente, com 14,66% da variância total, apresentou altas cargas de pH e nitrato, que foram associadas ao uso e ocupação do solo das áreas urbanas pelos autores.

6 CONCLUSÕES

A partir da revisão da literatura e dos resultados apresentados é possível concluir que:

- i) A qualidade das águas subterrâneas pode apresentar violações atreladas às características da geologia e domínio hidrogeológico locais, assim como por resultado de ações antrópicas;
- ii) As violações de enquadramento ou do padrão de potabilidade mostraram-se de pequena magnitude para os quatro metais-traço avaliados (As, Hg, Pb e Zn). Por outro lado, os metais ferro e manganês responderam por parcela significativa das não-conformidades, relacionadas principalmente à geologia local. As concentrações destes metais nas águas subterrâneas acabaram por favorecer também as não conformidades decorrentes da turbidez;
- iii) A comparação entre o IQA_{SUB} desenvolvido e o IQA_{CCME} permitiu observar que os resultados obtidos com o primeiro se apresentaram majoritariamente mais conservadores do que os obtidos com a aplicação do IQA_{CCME} (88,71% dos casos), fato associado à ponderação dos parâmetros. O que ocasionou a inversão na restritividade em 14 pontos, correspondentes a 11,29% dos resultados, foram as violações médias detectadas para ferro, manganês e turbidez, arsênio e chumbo. Apesar da ponderação destes dois metais-traço serem maiores (ambos com peso de 13%), os resultados ficaram próximos dos VMPs, o que contribuiu para a inversão na restritividade;
- iv) A análise de *clusters* resultou em três *clusters* que, quando comparados com a mediana do IQA_{SUB} desenvolvido, ficaram representados por: *cluster 1* – qualidade *péssima*, *cluster 2* – qualidade *regular* e *cluster 3* – qualidade

- péssima*, sendo o último *cluster* composto por um único ponto que apresentou *outliers* dos parâmetros chumbo, ferro, manganês e turbidez;
- v) A ACP considerou cinco componentes principais que foram capazes de explicar 79,9% da variância total;
- vi) Por fim, o índice desenvolvido se mostrou eficiente na classificação de poços de captação em áreas minerárias e pode auxiliar nas tomadas de decisão dos órgãos públicos, assim como na comunicação com a comunidade.

7 RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se a intensificação do monitoramento dos poços da rede do IGAM e a aplicação de análise discriminante ou de regressão logística multinomial, a fim de confirmar os agrupamentos estabelecidos pela análise de *cluster*.
- Recomenda-se a reelaboração das curvas daqueles parâmetros cujos dados apresentem limites de quantificação superiores aos considerados na construção das curvas, visto que o índice pode apresentar distorções nos resultados obtidos para os pontos analisados. Caso haja redução no VMP do parâmetro em questão, tendo em vista os avanços nos estudos de toxicidade, também é importante realizar essa adaptação.
- Importante salientar que a utilização de um índice de qualidade de água não isenta a obrigatoriedade de monitoramento completo, em atendimento às legislações vigentes, e que é importante uma análise crítica acerca da qualidade da água subterrânea e dos sistemas de tratamento necessários para a adequação da água aos padrões de potabilidade, independentemente da classificação obtida a partir da aplicação do índice. Caso sejam detectadas quaisquer violações de parâmetros que não foram considerados no presente índice, faz-se necessária uma análise crítica e especializada, principalmente no que tange às violações de orgânicos, agrotóxicos e metabólitos que representam risco à saúde humana, visto que esses elementos não são passíveis de elevada remoção em estações de tratamento convencionais.

REFERÊNCIAS

- ALEXAKIS, D. E. *et al.* Suitability of water quality indices for application in lakes in the Mediterranean. *Water Resources Management*, v. 30, p. 1621-1633, 2016.
- ALEXAKIS, D. E. Applying Factor Analysis and the CCME Water Quality Index for Assessing Groundwater Quality of an Aegean Island (Rhodes, Greece). *Geosciences*, v. 12, n. 10, p. 384, 2022.
- AL-HAMDANI, A. S. A. *et al.* Assessment of groundwater quality using CCME water quality index in Caracosh distract, Northeastern of Mosul city, Iraq. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. p. 012028.
- AL-JANABI, Z. Z. *et al.* Assessment of water quality of Tigris River by using water quality index (CCME WQI). *Al-Nahrain Journal of Science*, v. 15, n. 1, p. 119-126, 2012.
- AL-MASHHADANY, M.H.S. Application of the CCME water quality index to evaluate the groundwater quality of shouira village for drinking and domestic purposes in Nineveh governorate. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*. Brasília: ANA, 2022. 132p.
- BAEZA, A.; SALAS, A.; LEGARDA, F. Determining factors in the elimination of uranium and radium from groundwaters during a standard potabilization process. *Science of The Total Environment*, v. 406, n. 1-2, p. 24-34, 2008.
- BILGIN, A. Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 190, p. 1-11, 2018.
- BONFIM, L. F. C. *Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil em ambiente SIG: concepção e metodologia*. 2010.
- BORBA, R. P. *et al.* Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). *Rem: Revista Escola de Minas*, v. 57, p. 45-51, 2004.
- BOYACIOGLU, H. Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water Sa*, v. 33, n. 1, 2007.
- BOYACIOGLU, H. Utilization of the water quality index method as a classification tool. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 167, p. 115-124, 2010.
- BRASIL. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para

consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, n. 85, p. 127, 7 maio 2021.

BRASIL. Resolução nº 396 de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Diário Oficial da União, n. 66, p. 66, 7 abr. 2008.

CALLEGARI-JACQUES, S. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003, 255 p.

CAMARERO, P. L. Estudo integrado de geofísica e geologia estrutural na identificação de drenagem ácida em mina de urânio. 2021.

CASH, Kevin; WRIGHT, Ralph. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. CCME: Ottawa, ON, Canada, 2001.

CCME, CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life: CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual. Canadian Environmental Quality Guidelines, 2001.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Arsênio. São Paulo: CETESB, 2017A. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Arsenio.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Zinco. São Paulo: CETESB, 2017B. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Zinco.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB. Qualidade das águas subterrâneas no estado de São Paulo [recurso eletrônico]: boletim 2020/CETESB; Equipe técnica Rosângela Pacini Modesto...[et al]. – São Paulo: CETESB, 2021.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Chumbo e seus compostos. São Paulo: CETESB, 2022A. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/02/Chumbo.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Manganês. São Paulo: CETESB, 2022B. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/05/Mangane%CC%82s.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Nitrato e Nitrito. São Paulo: CETESB, 2022C. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2022/12/Nitrato-e-Nitrito.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB, Ficha de informação toxicológica: Mercúrio e seus compostos. São Paulo: CETESB, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2024/01/Mercurio.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

CETESB, Índice de Qualidade das Águas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wpcontent/uploads/sites/12/2017/11/Ap%C3%AAndice-D-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas.pdf>. Acesso em: out. 2022.

CHAVES, M. L. de S. C.; BENITEZ, L. Depósitos superficiais diamantíferos da região de diamantina, Serra do Espinhaço (Minas Gerais). *Geociências*, v. 23, p. 31-42, 2004.

CHONATTU, J. *et al.* Geospatial and statistical assessment of groundwater contamination due to landfill leachate—a case study. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 8, n. 2, p. 121-134, 2016.

COUTO, J.G P. *et al.* Considerações sobre a idade do grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 11, 1981.

CPRM, SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa de domínios/subdomínios hidrogeológicos do Brasil. 2007.

CPRM, SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Mapa geológico do estado de Minas Gerais. 2020.

CREDES. Programme Éco Santé OCDE. Paris, CREDES/OCDE, 1993.

DAVIES, J. M. Application and tests of the Canadian water quality index for assessing changes in water quality in lakes and rivers of central North America. *Lake and Reservoir Management*, v. 22, n. 4, p. 308-320, 2006.

DE ALMEIDA, G. S.; DE OLIVEIRA, I. B. Application of the index WQI-CCME with data aggregation per monitoring campaign and per section of the river: case study — Joanes River, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 190, n. 4, p. 195, 2018.

DE RESENDE, A. V. Agricultura e qualidade da água: contaminação da água por nitrato. *Embrapa Cerrados, Planaltina*, 29 p., 2002.

DE SOUZA, C. F. M. *et al.* Assessment of groundwater quality in a region of endemic fluorosis in the northeast of Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 185, n. 6, p. 4735-4743, 2013.

DIOP, M. *et al.* Development and application of water quality index (WQI) for the evaluation of the physico-chemical quality of groundwater in gold mining areas of Southeastern Senegal. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 15, n. 2, p. 33-50, 2023.

EPA. EPA Facts about uranium. U.S.E.P. Agency, Washington, DC 2002. Disponível em: <https://semspub.epa.gov/work/HQ/175267.pdf>. Acesso em: mai. 2024.

FÁVERO, L.P.; BELFIORE, P. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS® e Stata®. Elsevier Brasil, Rio de Janeiro, 1187 p., 2017.

FEAM. Inventário de áreas contaminadas do Estado de Minas Gerais: 2015 - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte, 2015

FONSECA, F. V. *et al.* Assessing water quality of Paraopeba River (Minas Gerais, Brazil) after the rupture of tailings dam. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 20, n. 7, p. 7749-7766, 2023.

FONSECA, A. C. R.; VIANNA, A. C. M. Morfologia e análise de elementos maiores das formações manganosíferas botrioidais (manganocretes) do subgrupo Paraopeba, município de Córrego D'Anta-MG. *Conexão Ciência (Online)*, v. 7, n. 1, p. 17-29, 2012.

GASTMANS, D. *et al.* Influência do arcabouço hidroestratigráfico nas ocorrências de arsênio em águas subterrâneas ao longo do corredor termal do rio Uruguai (Argentina-Brasil-Uruguai). *Geociências*, p. 105-120, 2010.

GARCÍA-ÁVILA, F. *et al.* The challenge of improving the efficiency of drinking water treatment systems in rural areas facing changes in the raw water quality. *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 37, p. 141-149, 2021.

GIKAS, G. D. *et al.* Comparative evaluation of river chemical status based on WFD methodology and CCME water quality index. *Science of the Total Environment*, v. 745, p. 140849, 2020.

GONÇALVES, S. S. Evolução do uso e cobertura da terra e presença de contaminantes nos canais fluviais na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 22, Pontal do Paranapanema. 2021.

GRISI, C.C de H.; BRITTO, R. P. Técnica de cenários e o método Delphi: uma aplicação para o ambiente brasileiro. *Seminários em Administração FEA-USP*, v. 6, 2003.

HAIDER, H. *et al.* Spatiotemporal water quality variations in smaller water supply systems: Using modified CCME WQI from groundwater source to distribution networks. *Water*, v. 11, n. 9, p. 1884, 2019.

HURLEY, T.; *et al.* Adaptation and evaluation of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for use as an effective tool to characterize drinking source water quality. *Water Research*, v. 46, n. 11, p. 3544-3552, 2012.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Gestão e situação das águas de Minas Gerais 2020 / Coordenação, Marcelo da Fonseca, organização Caroline Matos da Cruz Correia *et al.* Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, 2020. 230 p.: il.

IGAM. Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Nota de esclarecimento 9 – Desastre Barragem B1. 31 de Janeiro de 2019. Disponível em: <http://www.igam.mg.gov.br/banco-de-noticias/2041-nota-de-esclarecimento-9-desastre-barragem-b1> Acesso em: 12 de fevereiro de 2024.

IGLESIAS, M.; UHLEIN, A. Estratigrafia do Grupo Bambuí e coberturas fanerozóicas no vale do rio São Francisco, norte de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 39, n. 2, p. 256-266, 2009.

JHA, M. K. *et al.* Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. *Water Research*, v. 179, p. 115867, 2020.

KARANGODA, R. C.; NANAYAKKARA, K. G. N. Use of the water quality index and multivariate analysis to assess groundwater quality for drinking purpose in Ratnapura district, Sri Lanka. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 21, p. 100910, 2023.

KERAGA, A. S. *et al.* Evaluating water quality of Awash River using water quality index. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, v. 9, n. 11, p. 243-253, 2017.

KHALID, S. *et al.* An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 197, p. 14-26, 2019.

KHAN, A. A. *et al.* Modification and application of the Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) for the communication of drinking water quality data in Newfoundland and Labrador. *Water Quality Research Journal*, v. 39, n. 3, p. 285-293, 2004.

KHAN, A. A. *et al.* Application of CCME procedures for deriving site-specific water quality guidelines for the CCME Water Quality Index. *Water Quality Research Journal*, v. 40, n. 4, p. 448-456, 2005.

KHAN, F. *et al.* Water quality evaluation and trend analysis in selected watersheds of the Atlantic region of Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 88, p. 221-248, 2003.

KUMAR, A.; KRISHNA, A. P. Groundwater quality assessment using geospatial technique based water quality index (WQI) approach in a coal mining region of India. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 14, n. 12, p. 1126, 2021.

LERMONTOV, A. *et al.* Aplicação da lógica nebulosa na parametrização de um novo índice de qualidade das águas. *Engevista*, 2008.

LIMA, V. H. S. *et al.* Groundwater flow and transport of metals under deposits of mine tailings: A case study in Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, p. 100690, 2024.

- LIU, Z. *et al.* Groundwater quality evaluation of the Dawu water source area based on water quality index (WQI): Comparison between Delphi method and multivariate statistical analysis method. *Water*, v. 13, n. 8, p. 1127, 2021.
- LOBATO, L. M.; COSTA, M. A. Recursos Minerais no cenário geológico de Minas Gerais. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, p. 1750-1808, 2018.
- LUMB, A. *et al.* Application of CCME Water Quality Index to monitor water quality: A case study of the Mackenzie River basin, Canada. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 113, p. 411-429, 2006.
- MARÍN CELESTINO, A. E. *et al.* Identification of the hydrogeochemical processes and assessment of groundwater quality, using multivariate statistical approaches and water quality index in a wastewater irrigated region. *Water*, v. 11, n. 8, p. 1702, 2019.
- MANLY, B. F. J. *Multivariate statistical methods*. 2° ed. New York: Chapman & Hall, 1994, 214p.
- MEADOWS, D. (1998) *Indicators and information systems for sustainable development*. Hartland: The Sustainability Institute, 1998.
- MENEZES, J. M. *et al.* Índice de Qualidade de Água Subterrânea. In: XIX World Water Congress, Porto de Galinhas. <https://ainfo.cnpq.br/digital/bitstream/item/42893/1/PAP00-5061.pdf>. Accessed. 2018.
- MESTER, T. *et al.* Assessment of groundwater quality changes in the rural environment of the Hungarian great plain based on selected water quality indicators. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 231, p. 1-14, 2020.
- MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*, Ed. UFMG. 2017.
- MOHEBBI, M. R. *et al.* Assessment of water quality in groundwater resources of Iran using a modified drinking water quality index (DWQI). *Ecological indicators*, v. 30, p. 28-34, 2013.
- NAINGGOLAN, R. *et al.* Improved the performance of the K-means cluster using the sum of squared error (SSE) optimized by using the Elbow method. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2019. p. 012015.
- NAJEEB, R. R.; SAEED, I. O. Evaluating Groundwater Quality in Al-Hamdaniya District For Drinking Purpose Using the Canadian Water Quality Index Model (CCME WQI). *Egyptian Journal of Aquatic Biology and Fisheries*, v. 26, n. 6, p. 243-255, 2022.
- NAZIR, H. M. *et al.* Classification of drinking water quality index and identification of significant factors. *Water Resources Management*, v. 30, p. 4233-4246, 2016.
- NBR, ABNT. 12216/1992. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento, 1992.

NILSSON, R. Removal of metals by chemical treatment of municipal waste water. *Water Research*, v. 5, n. 2, p. 51-60, 1971.

NIKOO, M. R. *et al.* A probabilistic water quality index for river water quality assessment: a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 181, p. 465-478, 2011.

NRC, NATIONAL RESEARCH COUNCIL *et al.* *Drinking Water and Health: Volume 1*. 1977.

OBEIDAT, M.; AWAWDEH, M. Assessment of groundwater quality in the area surrounding Al-Zaatari Camp, Jordan, using cluster analysis and water quality index (WQI). *Jordan Journal of Earth & Environmental Sciences*, v. 12, n. 3, 2021.

OCAMPO-DUQUE, W. *et al.* Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study. *Environment International*, v. 32, n. 6, p. 733-742, 2006.

OLIVEIRA, M. D. *et al.* Nova abordagem do índice de qualidade de água bruta utilizando a lógica Fuzzy. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 19, p. 361-372, 2014.

OUKIL, A. *et al.* A Surrogate Water Quality Index to assess groundwater using a unified DEA-OWA framework. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 40, p. 56658-56685, 2021.

PAL, P. *et al.* Removal of Arsenic from Drinking Water by Chemical Precipitation– A Modeling and Simulation Study of the Physical-Chemical Processes. *Water Environment Research*, v. 79, n. 4, p. 357-366, 2007.

PEI-YUE, L. *et al.* Groundwater quality assessment based on improved water quality index in Pengyang County, Ningxia, Northwest China. *E-Journal of Chemistry*, v. 7, n. S1, p. S209-S216, 2010.

PEREIRA, A. A. Avaliação da qualidade da água: proposta de um novo índice alicerçado na lógica Fuzzy. 2010.

PIMENTEL, H. *et al.* Studies of water quality in the Ouro Preto region, Minas Gerais, Brazil: the release of arsenic to the hydrological system. *Environmental Geology*, v. 43, n. 6, p. 725-730, 2003.

PIRES, F. R. M. *Urânio no Brasil : geologia, jazidas e ocorrências*. *Vitrina Comunicação*. Eletrobrás Eletronuclear, Rio de Janeiro, 2013.

POPUGAEVA, D. *et al.* Statistical study of Khibiny Alkaline Massif (Kola Peninsula) groundwater quality with respect to elevated aluminum concentrations. *Environmental Technology*, v. 43, n. 19, p. 3014-3022, 2022.

PRATES, M. M. *et al.* Uso da água subterrânea no abastecimento da população rural dos municípios da bacia do rio são José dos Dourados. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], 2015. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28335>. Acesso em: 26 set. 2022.

PRASAD, B. *et al.* Groundwater quality assessment using the weighted arithmetic index method in the selected villages of Butchayyapeta Mandal, Visakhapatnam, Andhra Pradesh, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 193, p. 1-17, 2021.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR, F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. *Geonomos, Instituto de Geociências, UFMG*, 8(2), p.27-43, 2000.

SAHOO, S.; KHAOASH, S. Impact assessment of coal mining on groundwater chemistry and its quality from Brajrajnagar coal mining area using indexing models. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 215, p. 106559, 2020.

SALCEDO-SÁNCHEZ, E. R. *et al.* Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 188, p. 1-20, 2016.

SANTANA FILHO, S. Distribuição de arsênio e oxidação de materiais sulfetados de áreas de mineração de ouro no estado de Minas Gerais. 2005.

SANTOS, M. R. Mapas auto-organizáveis na exploração de padrões e controles hidrogeoquímicos do Sistema Aquífero Serra Geral no Rio Grande do Sul. 2020.

SICHE, R. *et al.* Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. *Ambiente & Sociedade*, v. 10, p. 137-148, 2007.

SILVA, M. L. T. Aplicação do Índice de Conformidade ao Enquadramento (ICE) de corpos d'água. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG, 98 p., 2017.

SOLTANI, A. A. *et al.* An integrated approach for assessing surface water quality: Case of Beni Haroun dam (Northeast Algeria). *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, p. 1-17, 2020.

SOUZA, M. E. T. A.; LIBÂNIO, M. Proposta de índice de Qualidade para Água Bruta afluente a estações convencionais de tratamento. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, p. 471-478, 2009.

SOUZA, M. C. F. B. Aspectos hidrodinâmicos e avaliação da qualidade das águas subterrâneas nas sub-bacias do rio Verde Grande, Jequitai e Pacuí-MG. 2013.

SPIER, C. A. *et al.* Geology and geochemistry of the Águas Claras and Pico Iron Mines, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Mineralium Deposita*, v. 38, p. 751-774, 2003.

TIWARI, N. K. *et al.* Water quality assessment in the ecologically stressed lower and estuarine stretches of river Ganga using multivariate statistical tool. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 194, n. 7, p. 469, 2022.

TOLEDO, L. G.; NICOLELLA, G. Índice de qualidade de água em microbacia sob uso agrícola e urbano. *Scientia Agricola*, v. 59, p. 181-186, 2002

UDDIN, M. G. *et al.* Evaluation of groundwater quality using CCME water quality index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna, Bangladesh. *American Journal of Environmental Protection*, v. 5, n. 2, p. 33-43, 2017.

UDDIN, M. G. *et al.* A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecological Indicators*, v. 122, p. 107218, 2021.

VADIATI, M. *et al.* A fuzzy-logic based decision-making approach for identification of groundwater quality based on groundwater quality indices. *Journal of Environmental Management*, v. 184, p. 255-270, 2016.

VASANTHAVIGAR, M. *et al.* Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 171, p. 595-609, 2010.

VIEIRA, V. S. Significado do grupo Rio Doce no contexto do Orógeno Araçuaí. 2007.

VILELA, F. T. *et al.* Metalogênese da Faixa Araçuaí: O Distrito Ferrífero Nova Aurora (Grupo Macaúbas, Norte de Minas Gerais) no contexto dos recursos minerais do Orógeno Araçuaí. *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, p. 415-430, 2014.

VON SPERLING, M. 2005. "Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos", v.1, 3a Ed., DESA, Ed. UFMG. 2005.

WANG, X. *et al.* Evaluation of spatial and temporal variation in stream water quality by multivariate statistical techniques: A case study of the Xiangxi River basin, China. *Quaternary International*, v. 282, p. 137-144, 2012.

WILLS, J. T.; BRIGGS, D. J. Developing indicators for environment and health. *World Health Statistics Quarterly* 1995; 48 (2): 155-163, 1995.

ZANDBERGEN, P.A.; HALL, K. J. Analysis of the British Columbia water quality index for watershed managers: a case study of two small watersheds. *Water Quality Research Journal*, v. 33, n. 4, p. 519-550, 1998.

APÊNDICE A – Localização e características geológicas e hidrogeológicas dos pontos monitorados pelo IGAM

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Guarani	CAL1	Conceição das Alagoas	-20,018689	-48,166099	Grupo Serra Geral	Basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio	Vulcânicas	Vulcânicas	GUARANI
Guarani	CD3	Cachoeira Dourada	-18,517565	-49,498624	Grupo Serra Geral	Basalto com intercalações de arenito e diques de diabásio	Vulcânicas	Vulcânicas	GUARANI
Guarani	FRT1	Frutal	-20,081460	-48,819438	Formação Vale do Rio do Peixe	Arenitos eólicos	Bacias sedimentares	Bacia do Paraná	GUARANI
Guarani	FRT2	Frutal	-20,019381	-48,942830	Formação Vale do Rio do Peixe	Arenitos eólicos	Bacias sedimentares	Bacia do Paraná	GUARANI
Guarani	UBR3	Uberaba	-19,754274	-48,239129	Formação Uberaba	Arenitos, vulcanoclásticas, conglomerados e pelitos	Bacias sedimentares	Bacia do Paraná	GUARANI
Norte de Minas	BC001	Bocaiuva	-17,094319	-43,802453	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	BC003	Bocaiuva	-17,504503	-43,896206	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	CE001	Capitão Enéias	-16,096842	-43,587267	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	CJ002	Coração de Jesus	-16,423911	-44,399625	Grupo Uruçuia	Conglomerado, pelito, arenito conglomerático, arenito	Bacias sedimentares	Bacia do Uruçuia	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	CJ004	Coração de Jesus	-16,685056	-44,585164	Formação Três Marias	Arenito arcoseano, arcóseo, siltito, argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	CJ005	Coração de Jesus	-16,714081	-44,300414	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	CJ006	Coração de Jesus	-16,499964	-44,227497	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	CP001	Claro dos Poções	-17,082411	-44,192744	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	EN001	Engenheiro Navarro	-17,261322	-43,976761	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	EP001	Espinosa	-14,921147	-42,821125	Suíte Guanambi	Monzogabro, monzodiorito, granito, monzonito, quartzo monzonito, quartz sienito	Cristalino	Cristalino	NORTE DE MINAS - NORTE

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Norte de Minas	EP004	Espinosa	-14,680222	-43,115747	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	EP006	Espinosa	-14,708172	-42,960717	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	FD001	Francisco Dumont	-17,313758	-44,234875	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	FD002	Francisco Dumont	-17,189689	-44,104200	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	FS002	Francisco Sá	-16,618953	-43,696564	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	FS003	Francisco Sá	-16,481475	-43,480503	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	FS004	Francisco Sá	-16,185772	-43,468036	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	FS007	Francisco Sá	-16,444444	-43,706117	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	GM001	Gameleiras	-14,950844	-43,217978	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JB003	Jaíba	-15,118542	-43,947183	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JB007	Jaíba	-15,118675	-43,801686	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JB008	Jaíba	-15,157606	-43,759542	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JB020	Jaíba	-15,126897	-43,421642	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JB021	Jaíba	-15,318394	-43,413856	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JF001	Joaquim Felício	-17,760886	-44,166400	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Norte de Minas	JF002	Joaquim Felício	-17,596772	-44,038792	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	JN001	Janaúba	-15,871800	-43,337458	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	JQ001	Jequitaiá	-17,189678	-44,316322	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	JQ002	Jequitaiá	-17,103761	-44,490394	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	JQ003	Jequitaiá	-17,326608	-44,519247	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	JR001	Juramento	-16,737164	-43,646867	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	LP001	Lagoa dos Patos	-16,980592	-44,581553	Formação Três Marias	Arenito arcoseano, arcóseo, siltito, argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MA001	Monte Azul	-15,284725	-42,892189	Complexo Porteirinha	Gnaisse, rochas metraultramáficas, migmatitos, anfíbolitos	Cristalino	Cristalino	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	MA003	Monte Azul	-15,104158	-42,879900	Complexo Porteirinha	Gnaisse, rochas metraultramáficas, migmatitos, anfíbolitos	Cristalino	Cristalino	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	MC002	Montes Claros	-16,845089	-43,912536	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MC003	Montes Claros	-16,698656	-43,802603	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MC004	Montes Claros	-16,907669	-43,854767	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MC005	Montes Claros	-16,705681	-44,076017	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MC006	Montes Claros	-16,906614	-43,745569	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	MR001	Mirabela	-16,313058	-44,141108	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	MR002	Mirabela	-16,134222	-44,222600	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Norte de Minas	MTC001	Matias Cardoso	-14,990558	-43,666392	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	MTC002	Matias Cardoso	-14,733336	-43,918886	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	MTC006	Matias Cardoso	-14,769069	-43,573892	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	PP001	Pai Pedro	-15,592278	-43,062044	Suíte Paciência	Monzonito, quartzo sienito, sienito	Cristalino	Cristalino	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	PP002	Pai Pedro	-15,406058	-43,163211	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	PP004	Pai Pedro	-15,523006	-43,070233	Suíte Paciência	Monzonito, quartzo sienito, sienito	Cristalino	Cristalino	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	RM001	Riacho dos Machados	-16,005717	-43,490003	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	SL001	São João da Lagoa	-16,919136	-44,322517	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - SUL
Norte de Minas	SP001	São João da Ponte	-16,919136	-44,322517	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	SP002	São João da Ponte	-16,004728	-43,747681	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VD001	Varzelândia	-15,719172	-43,786544	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VD003	Varzelândia	-15,717833	-43,565894	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VD013	Varzelândia	-15,421681	-43,516981	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VD014	Varzelândia	-15,689117	-43,554647	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Norte de Minas	VD020	Varzelândia	-15,471261	-43,204186	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VZ001	Varzelândia	-15,511303	-44,082572	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
Norte de Minas	VZ006	Varzelândia	-15,549183	-43,998689	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
PANM	PM_AR A1	Araçuaí	-16,947303	-42,187594	Formação Salinas	Metagrauvaca, metaconglomerado, micaxisto	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	PANM - LESTE
PANM	PM_AR A2	Araçuaí	-17,075074	-42,164597	Formação Ribeirão da Folha	Metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	PANM - LESTE
PANM	PM_AR A3	Araçuaí	-17,047473	-42,174513	Formação Ribeirão da Folha	Metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	PANM - LESTE
PANM	PM_CA P1	Capelinha	-17,514853	-42,571742	Formação Ribeirão da Folha	Metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	PANM - LESTE
PANM	PM_ITA 1	Itaobim	-16,584690	-41,649766	Leucogranito Faisca	Leucogranito	Cristalino	Cristalino	PANM - LESTE
PANM	PM_IT11	Itinga	-16,645969	-41,781495	Formação Ribeirão da Folha	Metaultramafito, metarcóseo, metamáfica, rochas calcissilicáticas, formação ferrífera bandada	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	PANM - LESTE
PANM	PM_MO C1	Coração de Jesus	-16,528866	-43,981967	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	PANM - LESTE
PANM	PM_MV 1	Mato Verde	-15,443622	-42,793692	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
PANM	PM_PA 1	Pedra Azul	-16,088568	-41,401165	Leucogranito Faisca	Leucogranito	Cristalino	Cristalino	PANM - LESTE
PANM	PM_TO 1	Teófilo Otoni	-17,510948	-41,294731	Granito Caladão	Sienogranito	Cristalino	Cristalino	PANM - LESTE
PANM	PM_TO 2	Teófilo Otoni	-17,638291	-41,248649	Suíte Carlos Chagas	Gnaiss granítico, leucogranito	Cristalino	Cristalino	PANM - LESTE
PANM	PM_UN A1	Unai	-16,154644	-46,930551	Subgrupo Paraopeba	Dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga, calcarenito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	PANM - OESTE
PANM	PM_UN A2	Unai	-16,205656	-46,899727	Subgrupo Paraopeba	Dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga, calcarenito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	PANM - OESTE
PANM	PM_VZ2	Varzelândia	-15,608736	-43,895876	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - NORTE
PANM	PME_P A1	Pedra Azul	-15,986138	-41,300355	Granito Pedra Azul	Granito, monzogranito, sienogranito	Cristalino	Cristalino	PANM - LESTE
PANM	PME_S B1	Serro	-18,447994	-43,561164	Formação Sopa- Brumadinho	Metaconglomerado, metapelito, quartzito, filito, xisto	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
PANM	PME_U NA1	Unai	-16,188827	-46,931364	Subgrupo Paraopeba	Dolomito, ritmito, siltito, folhelho, argilito, arcóseo, arenito, marga, calcarenito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	PANM - OESTE
PANM	PME_V Z1	Varzelândia	-15,636422	-44,016189	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
PANM	PME_V Z2	Verdelândia	-15,514679	-43,665546	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	NORTE DE MINAS - NORTE
PANM	RIC_01 _IGAM	Montes Claros	-16,478199	-43,966340	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL
PANM	RIC_03 _IGAM	Coração de Jesus	-16,471134	-43,983075	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL
PANM	RIC_06 _IGAM	Montes Claros	-16,452151	-44,002666	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
PANM	RIC_08_IGAM	Montes Claros	-16,467005	-43,980377	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	NORTE DE MINAS - SUL
PANM	RIC_83_IGAM	Coração de Jesus	-16,440630	-44,165530	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	NORTE DE MINAS - SUL
Velhas	ALASB	Auguto de Lima	-18,035278	-44,067778	Grupo Macaúbas	Metarritmitos, quartzito puros e ferruginosos, formação ferrífera, metaultramafito, metamáfica, metarcóseo, calcissilicática, metadiamicrito e metacarbonáticas	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimento s-metavulcânicas	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	ARAPJ	Araçai	-19,284722	-44,183611	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	BUCGO	Buenópolis	-17,835833	-44,002222	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	CBCSL	Capim Branco	-19,602500	-44,206944	Complexo Belo Horizonte	Complexo Granitóide tipo TTG e granitóides associados	Cristalino	Cristalino	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	CFNGR	Confins	-19,669167	-43,952222	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	COBMC	Corinto	-18,351389	-44,451944	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	COFBM	Corinto	-18,385278	-44,667500	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	CORSM	Cordisburgo	-19,116944	-44,317222	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	CUCC13	Curvelo	-18,717222	-44,384167	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	DATOM	Datas	-18,633889	-43,719167	Complexo Gouveia	Granitóide, gnaiss	Cristalino	Cristalino	RIO DAS VELHAS - NORTE

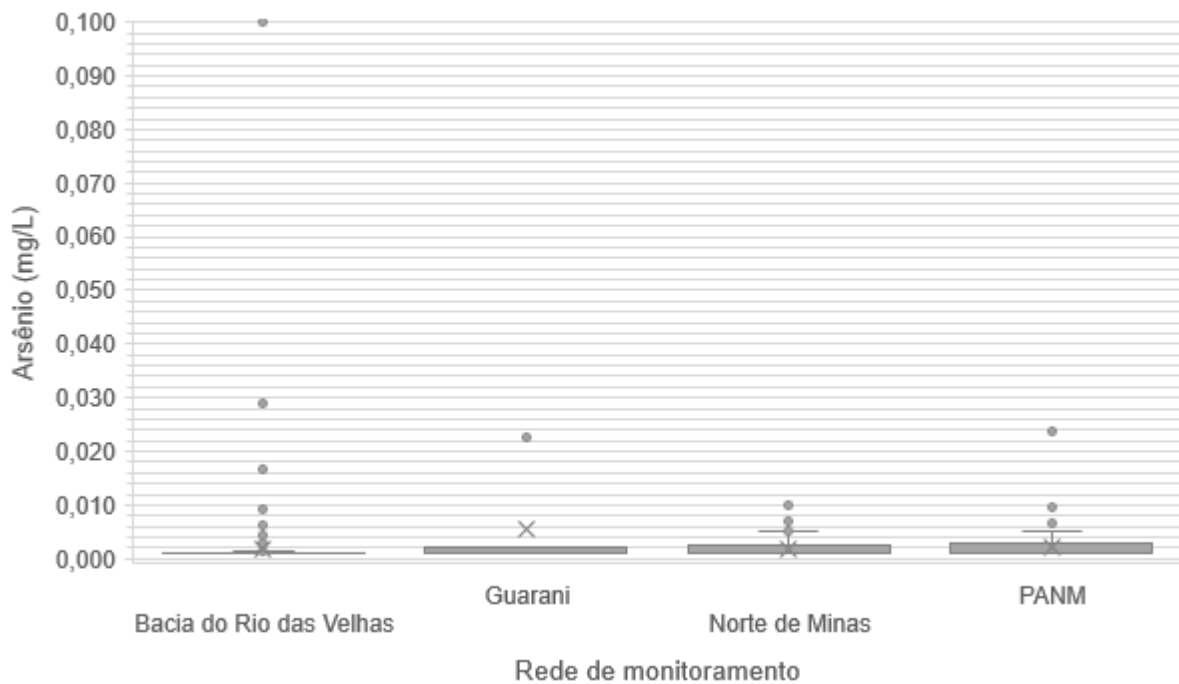
Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Velhas	FUGSJT	Funilândia	-19,285833	-44,084444	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	GOUPA	Gouveia	-18,637475	-43,968470	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	ITAAS	Itabirito	-20,262020	-43,953640	Grupo Itabira	Itabirito, dolomito e filito	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS SUL
Velhas	ITASGB	Itabirito	-20,333889	-43,817222	Complexo Bação	Granito, granodiorito	Cristalino	Cristalino	RIO DAS VELHAS SUL
Velhas	JABRA	Jabuticatubas	-19,583611	-43,787222	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	JQCVQ	Jequitiba	-19,235000	-44,017500	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	LSCBA	Lassance	-17,902500	-44,002500	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	LSCBR	Lassance	-17,814070	-44,686970	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	LSPVD	Lagoa Santa	-19,635833	-43,816444	Formação Serra de Santa Helena	Siltitos, argilitos ardosianos e margas	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	LSQSU	Lagoa Santa	-19,574722	-43,967778	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	MGCC02	Morro da Garça	-18,542650	-44,600060	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Poroso/Fissural	Poroso/Fissural	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	MGNOA	Morro da Garça	-18,735833	-44,617778	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	MONOA	Monjolo	-18,383889	-44,100278	Formação Logoa do Jacaré	Calcário e pelito	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	MTBSP	Matozinhos	-19,551944	-44,051944	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL

Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Velhas	NILMEG	Nova Lima	-20,033611	-43,934722	Grupo Nova Lima	Metabasaltos, metavulcanoclásticas félsicas, anfibolito, dolomito, metagrauvaca, quartzito e formação ferrífera	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimentos -metavulcânicas	RIO DAS VELHAS - SUL
Velhas	PLFEX	Pedro Leopoldo	-19,485278	-44,014444	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	PLFID	Pedro Leopoldo	-19,534722	-43,951111	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	PLMMC	Pedro Leopoldo	-19,619167	-44,019167	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	PMFSR	Prudente de Moraes	-19,451111	-44,151944	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	SABRC	Sabará	-19,784722	-43,735833	Grupo Nova Lima	Metabasaltos, metavulcanoclásticas félsicas, anfibolito, dolomito, metagrauvaca, quartzito e formação ferrífera	Metassedimentos -metavulcânicas	Metassedimentos -metavulcânicas	RIO DAS VELHAS - SUL
Velhas	SJLRM	São José da Lapa	-19,666944	-43,618611	Complexo Belo Horizonte	Complexo Granitóide tipo TTG e granitóides associados	Cristalino	Cristalino	RIO DAS VELHAS - SUL
Velhas	SPPEX	Santana do Pirapama	-19,984722	-44,034167	Complexo Belo Horizonte	Complexo Granitóide tipo TTG e granitóides associados	Cristalino	Cristalino	RIO DAS VELHAS - SUL
Velhas	SRCM	Santana do Riacho	-19,334683	-43,631208	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	VPBGU	Varzea Da Palma	-17,201944	-44,821722	Formação Três Marias	Arenito arcoseano, arcóseo, siltito, argilito	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	RIO DAS VELHAS - NORTE
Velhas	VPCEM	Varzea Da Palma	-17,585278	-44,735278	Formação Serra da Saudade	Siltito e argilito	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - NORTE

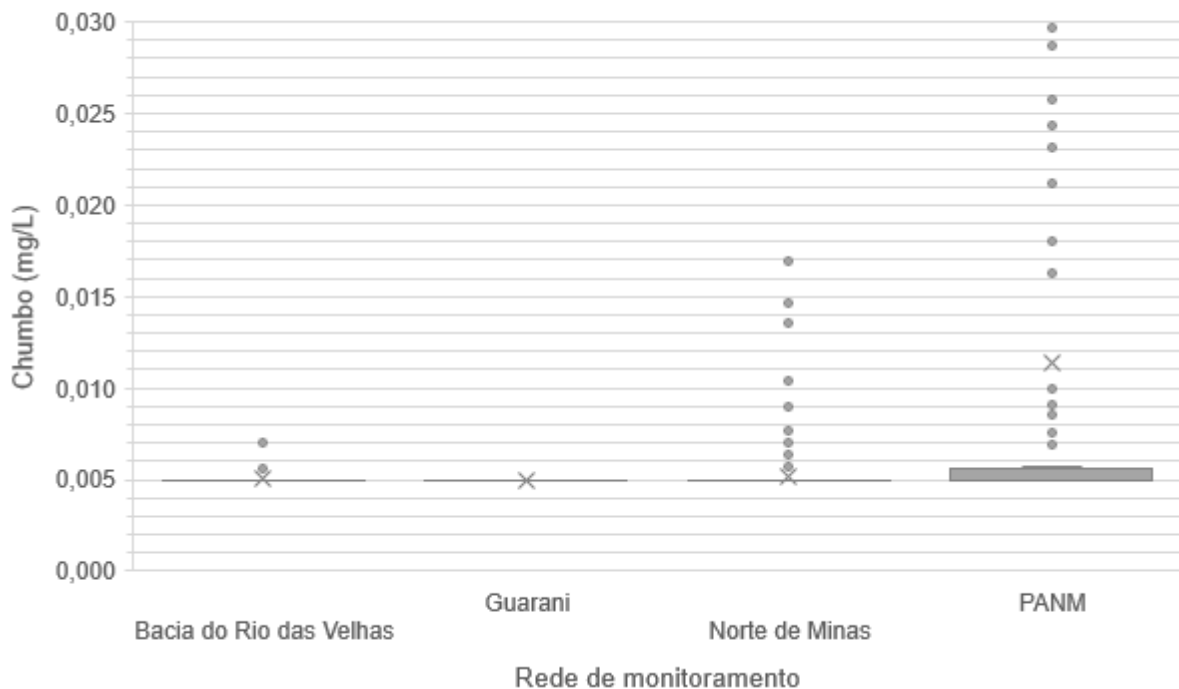
Rede	Ponto	Município	Latitude	Longitude	Unidade geológica	Descrição da unidade geológica	Domínio hidrogeológico	Subdomínio hidrogeológico	Mapa geológico
Velhas	VPCLV	Vespasiano	-19,685833	-43,902222	Formação Sete Lagoas	Metassiltitos e metargilitos laminados, com calcário calcítico/dolomítico	Carbonatos-metacarbonatos	Bacia tipo Rio do Peixe	RIO DAS VELHAS - CENTRAL
Velhas	VPCRD	Varzea Da Palma	-17,551389	-44,817222	Formação Três Marias	Arenito arcoseano, arcóseo, siltito, argilito	Formações cenozóicas	Formações cenozóicas indiferenciadas	RIO DAS VELHAS - NORTE

APÊNDICE B – Box-plots dos parâmetros considerados nos índices por rede

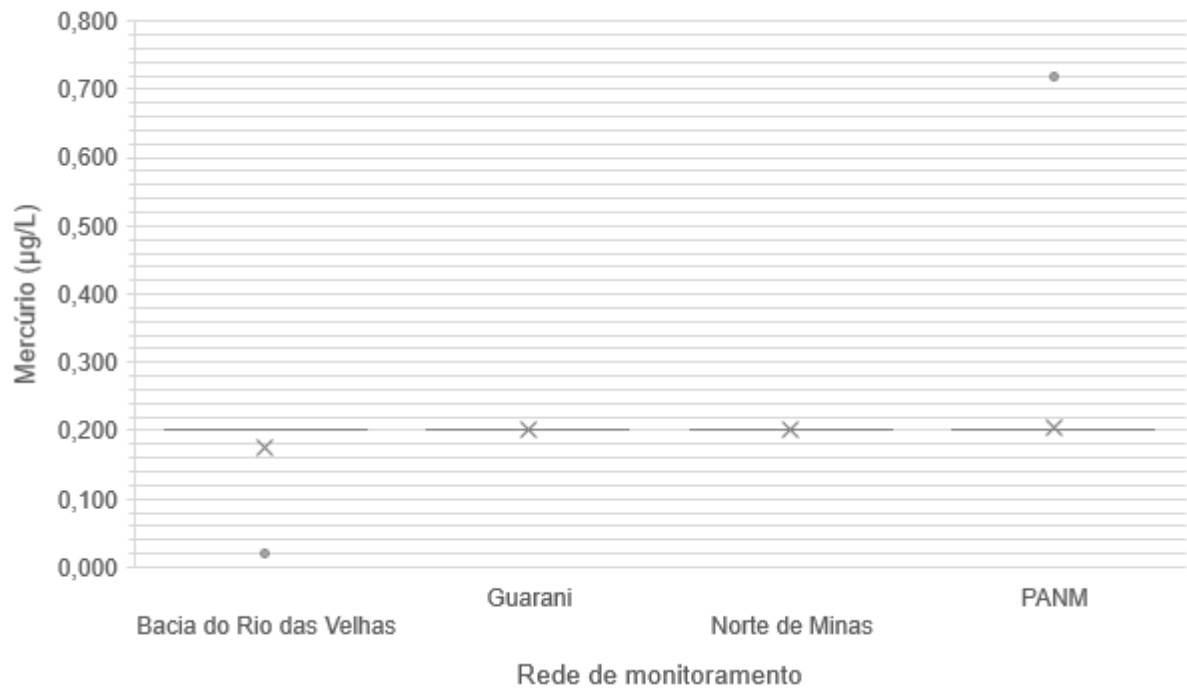
Arsênio



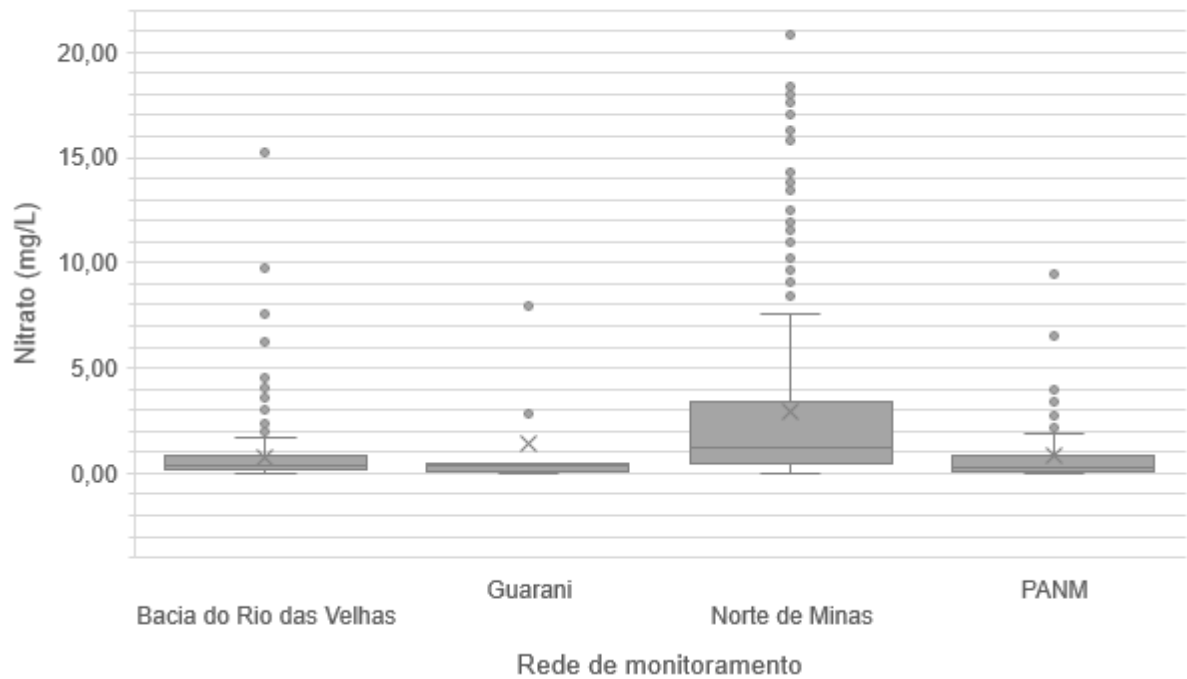
Chumbo

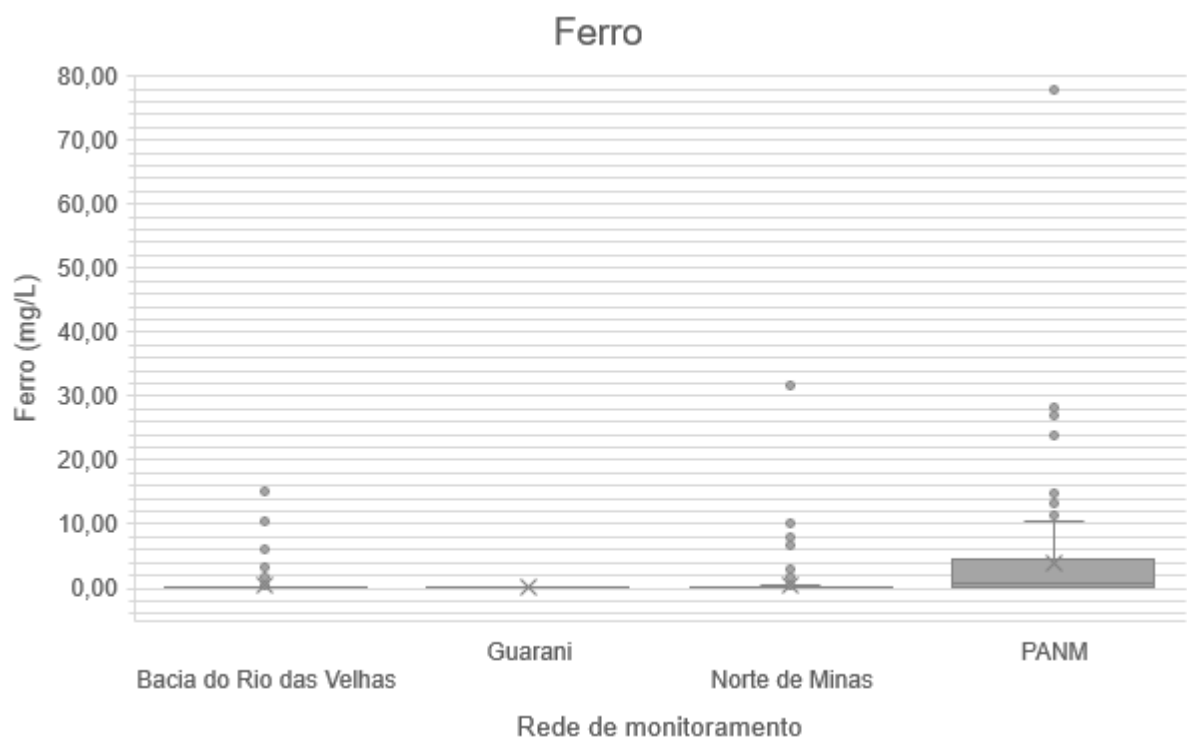
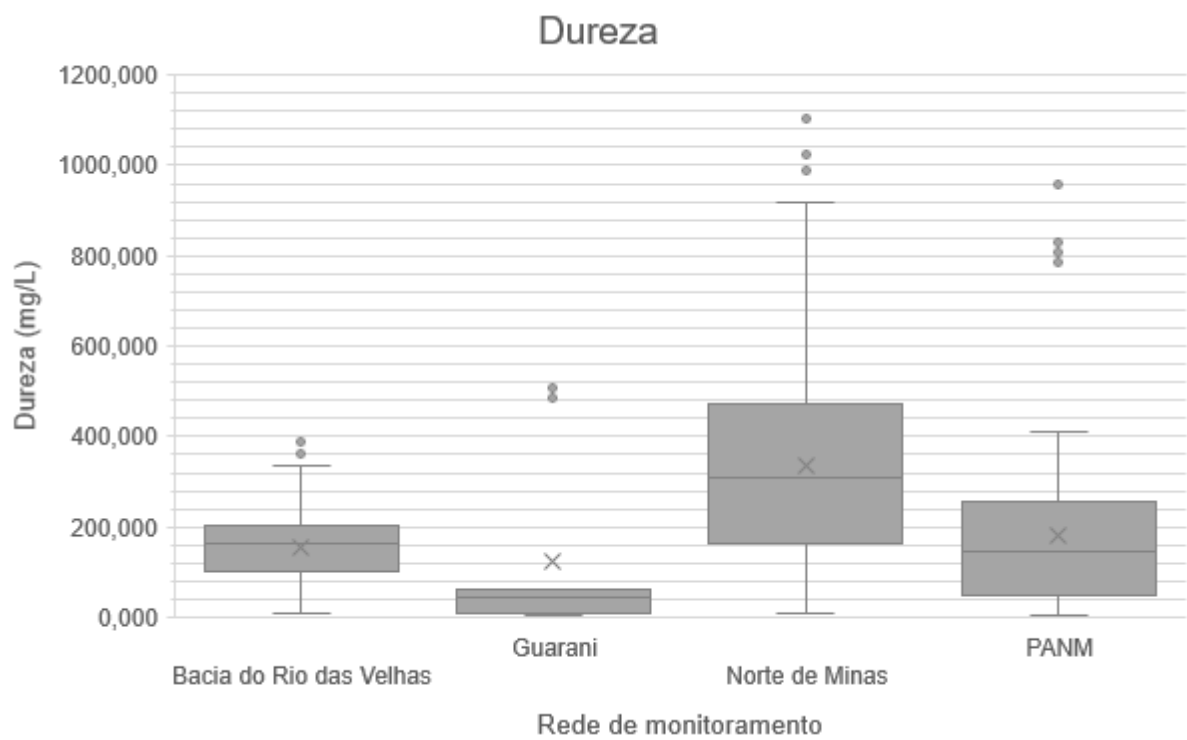


Mercúrio

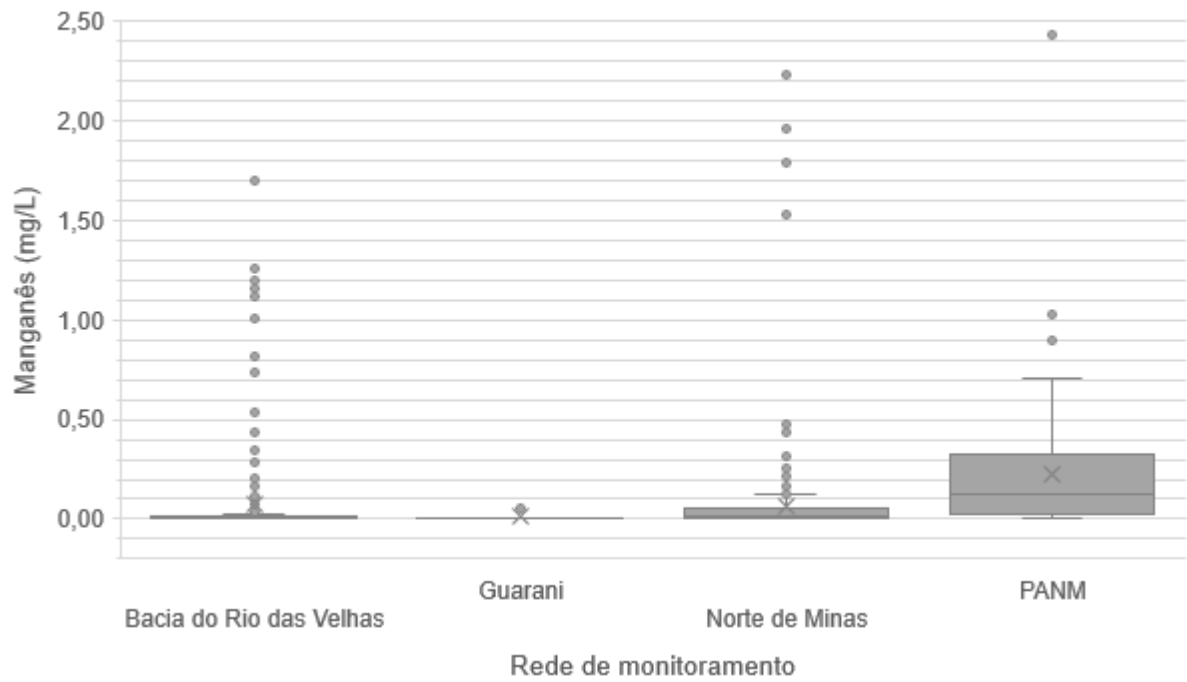


Nitrato

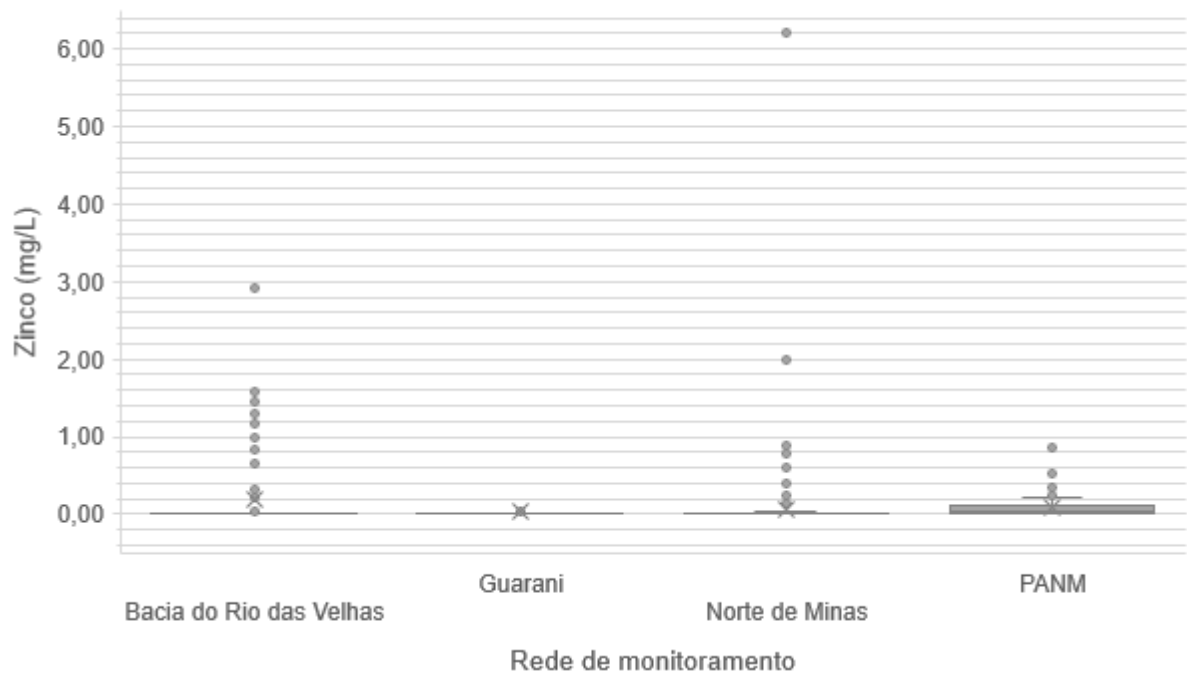


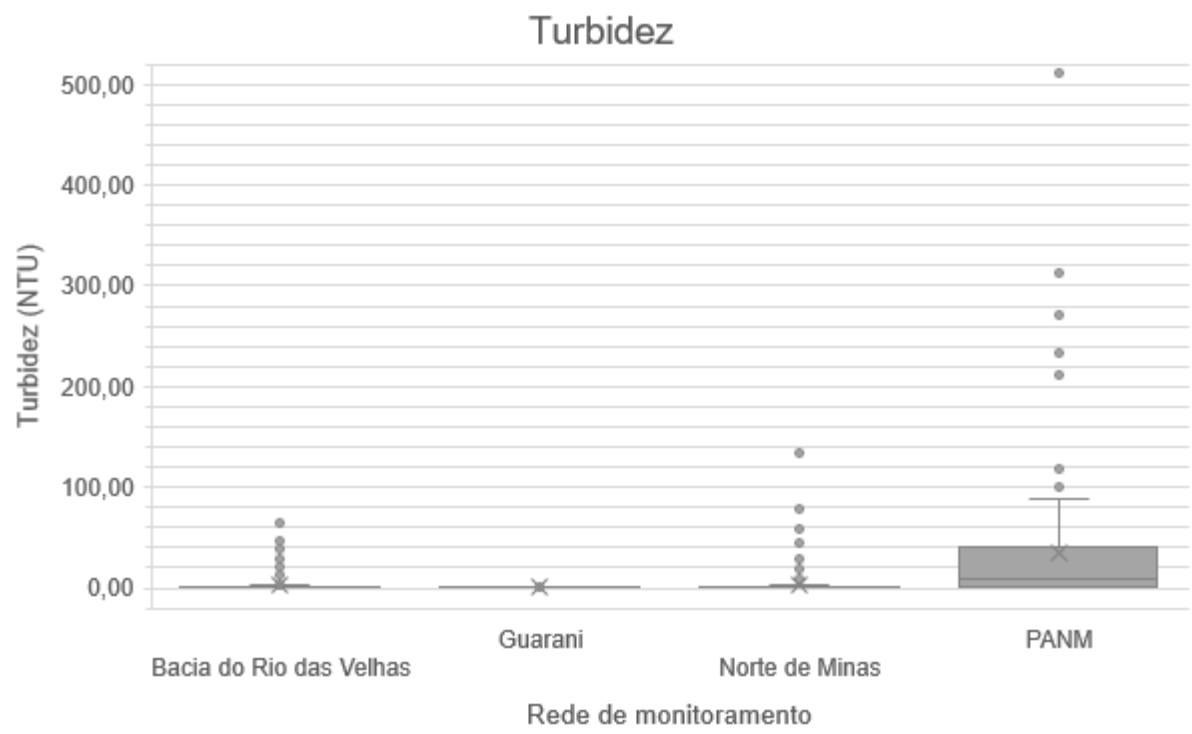


Manganês



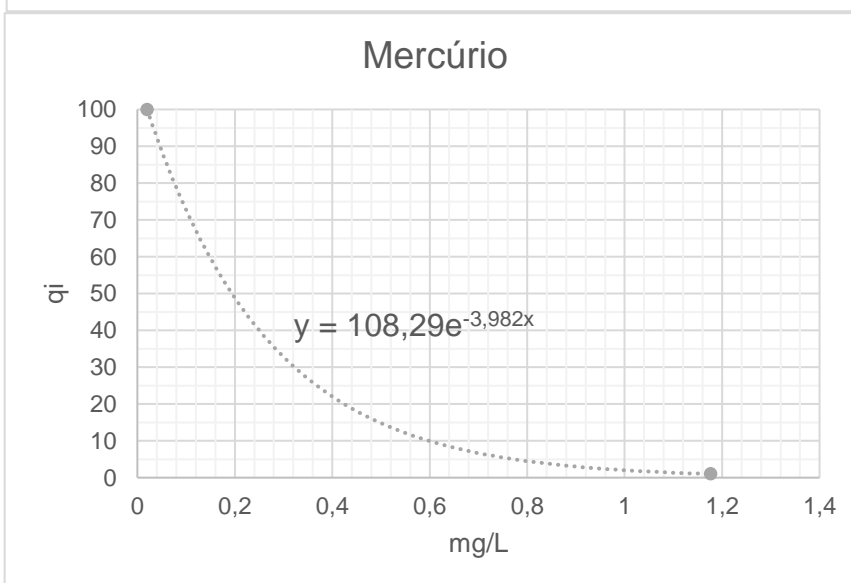
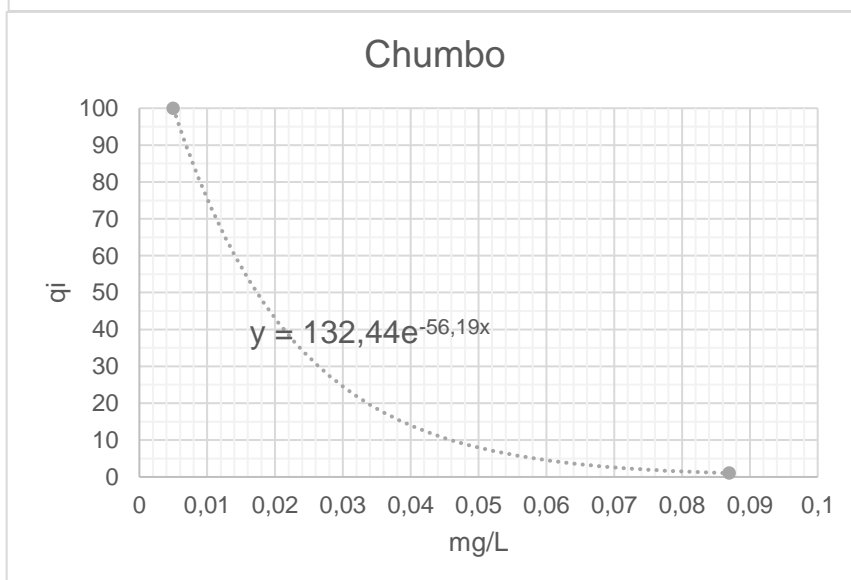
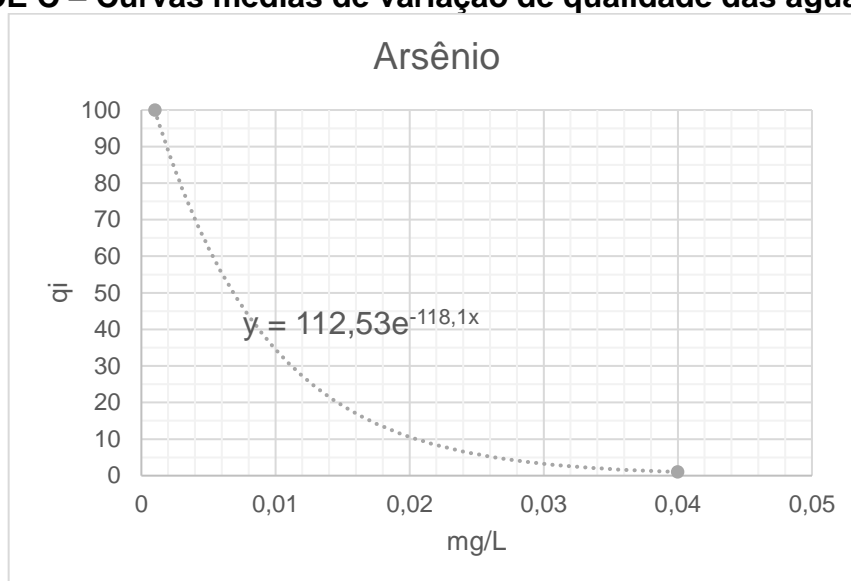
Zinco



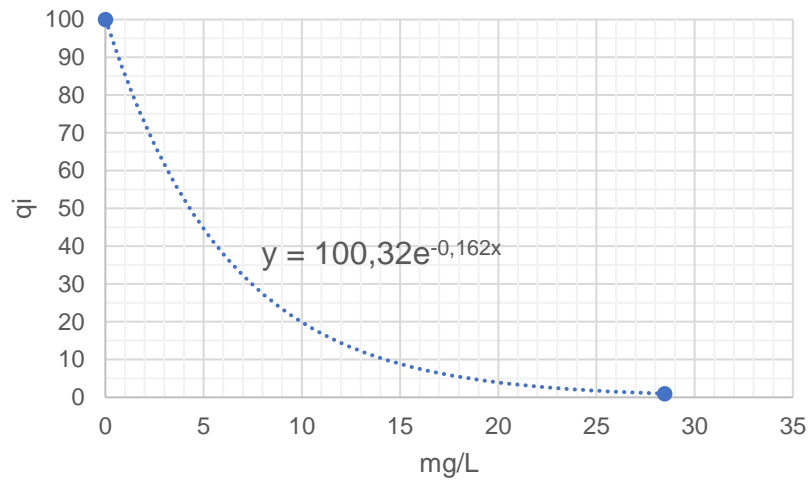


Fonte: Autora (2024).

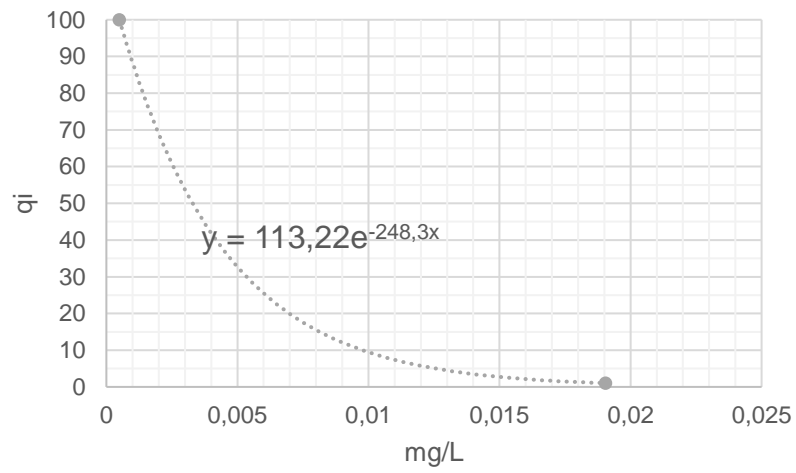
APÊNDICE C – Curvas médias de variação de qualidade das águas IQASUB



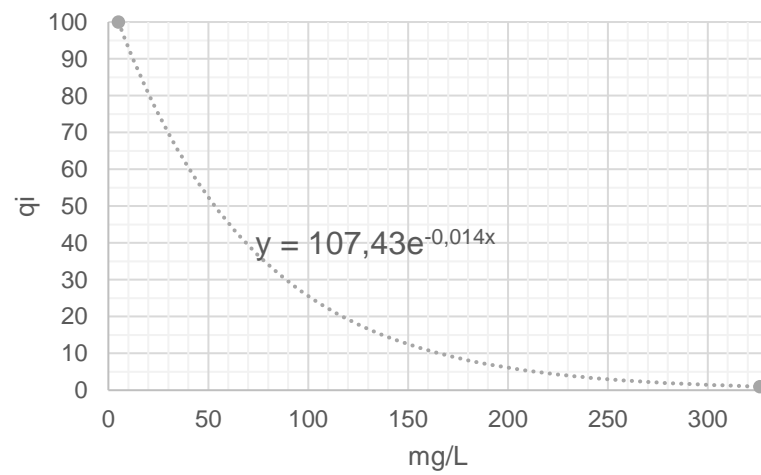
Nitrato

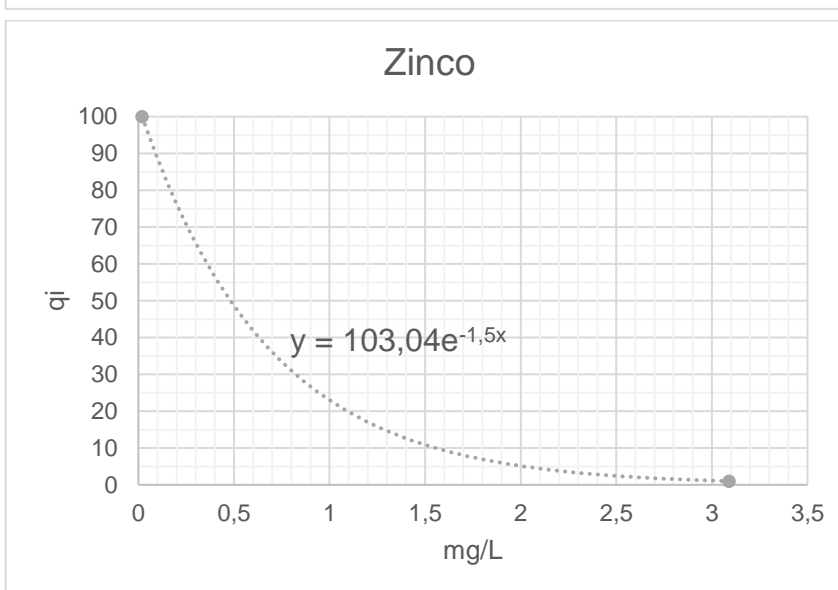
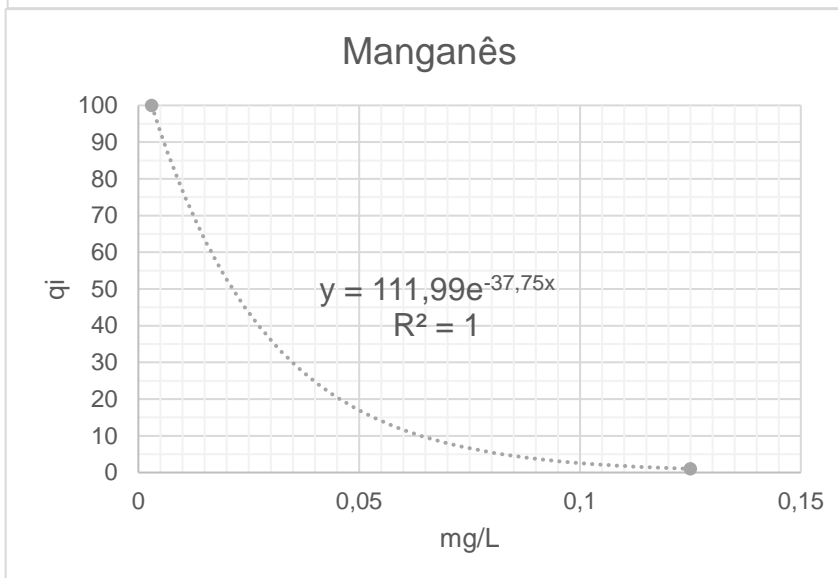
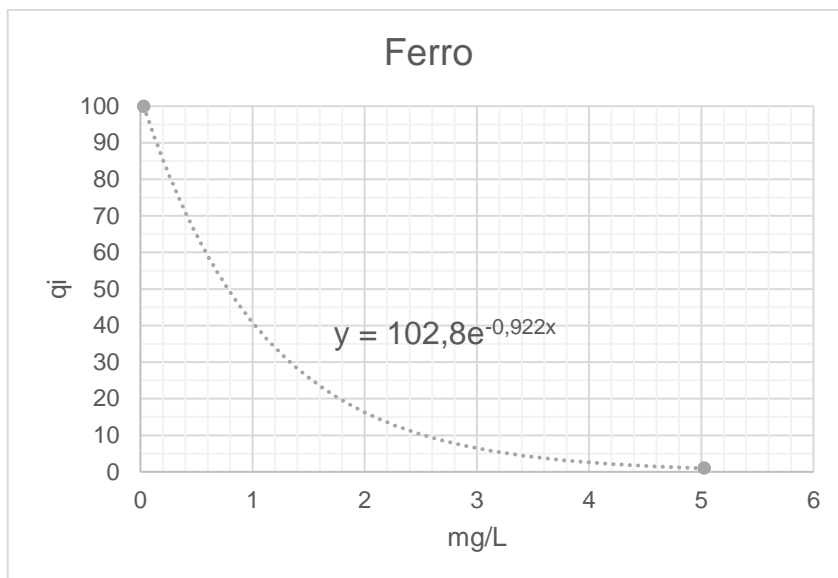


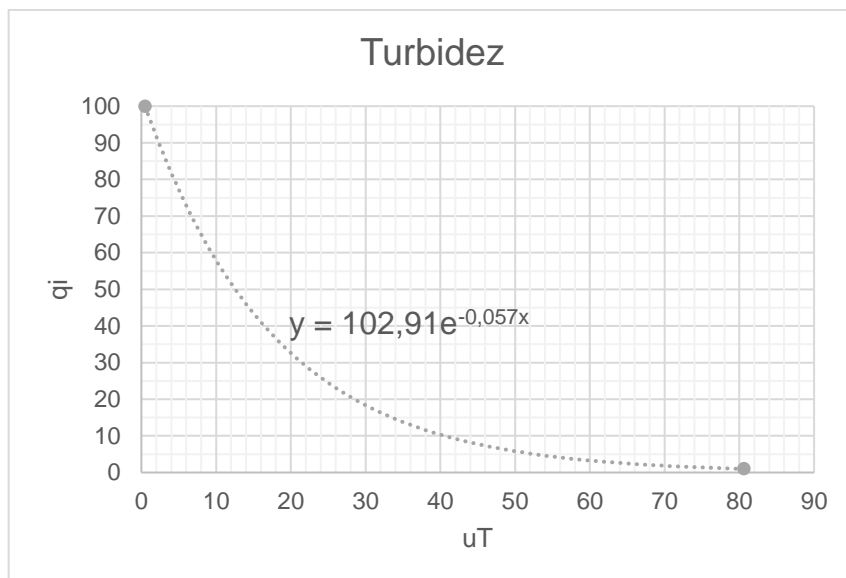
Urânio



Dureza







Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE D – Resultado do cálculo do IQASUB e do IQACCME de todos os pontos

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQASUB		IQACCME	
												Nota	Classificação	Nota	Classificação
Guarani	CAL1	Conceição das Alagoas	0,001000	0,005000	47,733333	0,051579	0,003000	0,200000	0,186667	0,500000	0,057339	86,9	BOA	100,0	EXCELENTE
Guarani	CD3	Cachoeira Dourada	0,022833	0,005000	497,333333	0,066360	0,067946	0,200000	6,266667	0,500000	0,023339	29,8	PÉSSIMA	70,4	REGULAR
Guarani	FRT1	Frutal	0,001431	0,005000	6,066667	0,062201	0,003000	0,200000	0,306667	0,663333	0,020673	90,0	BOA	100,0	EXCELENTE
Guarani	FRT2	Frutal	0,001252	0,005000	6,366667	0,044667	0,003000	0,200000	0,293333	0,500000	0,020673	90,3	BOA	100,0	EXCELENTE
Guarani	UBR3	Uberaba	0,001000	0,005000	58,300000	0,052066	0,003000	0,200000	0,180000	0,500000	0,020673	86,4	BOA	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	BC001	Bocaiuva	0,003306	0,005169	619,262500	0,594220	0,053935	0,200000	3,612500	3,475000	0,034614	38,3	PÉSSIMA	59,0	RUIM
Norte de Minas	BC003	Bocaiuva	0,001333	0,005000	315,966667	0,048474	0,003568	0,200000	2,670000	0,795000	0,020000	63,3	RUIM	86,4	BOA
Norte de Minas	CE001	Capitão Enéias	0,001284	0,005000	432,625000	0,033474	0,003000	0,200000	9,152500	0,513750	0,056192	49,5	RUIM	84,4	BOA
Norte de Minas	CJ002	Coração de Jesus	0,001250	0,005000	109,962500	0,034336	0,003000	0,200000	0,591250	0,528750	0,020000	81,2	BOA	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	CJ004	Coração de Jesus	0,001391	0,009046	430,100000	0,225538	0,183772	0,200000	5,770000	1,830000	0,402389	30,2	PÉSSIMA	70,9	REGULAR
Norte de Minas	CJ005	Coração de Jesus	0,001250	0,005194	202,875000	0,146022	0,004991	0,200000	0,898750	1,666250	0,020000	72,4	REGULAR	92,3	BOA
Norte de Minas	CJ006	Coração de Jesus	0,001250	0,005000	168,837500	0,033680	0,003415	0,200000	2,976250	0,562500	0,020000	72,9	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	CP001	Claro dos Poções	0,001250	0,005246	221,800000	0,145761	0,040369	0,200000	0,565000	0,501250	0,020000	65,4	REGULAR	86,8	BOA
Norte de Minas	EN001	Engenheiro Navarro	0,001000	0,005000	238,360000	0,455633	0,043420	0,200000	0,386000	3,836000	0,020000	62,6	RUIM	77,8	REGULAR
Norte de Minas	EP001	Espinosa	0,005630	0,005086	624,612500	0,225415	0,071703	0,200000	14,417500	0,538750	0,038625	30,1	PÉSSIMA	67,4	REGULAR
Norte de Minas	EP004	Espinosa	0,002029	0,005507	558,425000	0,084653	0,003052	0,200000	6,713750	0,642500	0,025562	45,1	RUIM	78,5	REGULAR
Norte de Minas	EP006	Espinosa	0,002681	0,005000	574,500000	0,045820	0,182628	0,200000	2,647500	0,507500	0,024789	31,2	PÉSSIMA	71,7	REGULAR
Norte de Minas	FD001	Francisco Dumont	0,001250	0,005360	12,300000	0,173578	0,014125	0,200000	0,173750	1,086250	0,020928	86,4	BOA	93,3	BOA
Norte de Minas	FD002	Francisco Dumont	0,002233	0,005000	110,212500	0,364259	0,114691	0,200000	0,413750	2,141250	0,020000	58,8	RUIM	74,2	REGULAR
Norte de Minas	FS002	Francisco Sá	0,001286	0,005000	237,542857	1,343473	0,003604	0,200000	0,570000	12,528571	0,055985	64,1	RUIM	60,8	RUIM

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}		IQA _{CCME}	
												Nota	Classificação	Nota	Classificação
Norte de Minas	FS003	Francisco Sá	0,002064	0,005000	592,400000	0,041695	0,136340	0,200000	4,258750	0,502500	0,020500	34,3	PÉSSIMA	73,6	REGULAR
Norte de Minas	FS004	Francisco Sá	0,002898	0,005000	1056,775000	0,118334	0,047672	0,200000	6,472500	1,112500	0,050867	24,6	PÉSSIMA	68,4	REGULAR
Norte de Minas	FS007	Francisco Sá	0,001089	0,005000	480,540000	0,041807	0,003000	0,200000	1,538000	0,500000	0,020000	55,5	RUIM	90,2	BOA
Norte de Minas	GM001	Gameleiras	0,002010	0,005000	202,012500	0,171096	0,026832	0,200000	1,260000	0,826250	0,029713	67,5	REGULAR	80,2	BOA
Norte de Minas	JB003	Jaíba	0,001250	0,005000	29,537500	0,108798	0,009246	0,200000	0,492500	0,500000	0,021766	86,3	BOA	93,5	BOA
Norte de Minas	JB007	Jaíba	0,001590	0,005000	389,342857	1,640227	0,028303	0,200000	0,995714	13,428571	0,023908	49,9	RUIM	51,3	RUIM
Norte de Minas	JB008	Jaíba	0,002784	0,005000	303,212500	0,196980	0,049141	0,200000	0,760000	1,810000	0,031553	57,0	RUIM	72,7	REGULAR
Norte de Minas	JB020	Jaíba	0,001340	0,005000	291,885714	0,485343	0,079875	0,200000	1,434286	5,292857	0,182004	51,7	RUIM	62,9	RUIM
Norte de Minas	JB021	Jaíba	0,001416	0,006230	53,542857	0,057809	0,008344	0,200000	0,961429	0,792857	0,085599	82,3	BOA	87,1	BOA
Norte de Minas	JF001	Joaquim Felício	0,001250	0,005000	134,475000	0,184897	0,153344	0,200000	0,591250	0,601250	0,020000	52,7	RUIM	85,9	BOA
Norte de Minas	JF002	Joaquim Felício	0,001286	0,005000	301,885714	0,101602	0,003887	0,200000	1,950000	0,911429	0,020000	64,9	RUIM	86,5	BOA
Norte de Minas	JN001	Janaúba	0,001339	0,005000	521,350000	0,208072	0,009948	0,200000	2,162500	1,736250	0,075757	50,6	RUIM	76,3	REGULAR
Norte de Minas	JQ001	Jequitaiá	0,001942	0,006095	113,425000	0,855035	0,668431	0,200000	0,277500	6,243750	0,040487	28,6	PÉSSIMA	50,7	RUIM
Norte de Minas	JQ002	Jequitaiá	0,001250	0,005000	351,937500	0,046345	0,005887	0,200000	1,763750	0,603750	0,020000	62,0	RUIM	85,6	BOA
Norte de Minas	JQ003	Jequitaiá	0,002448	0,005000	199,928571	0,074031	0,010715	0,200000	0,371429	0,510000	0,020000	71,7	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	JR001	Juramento	0,001286	0,005000	647,300000	0,938455	0,126781	0,200000	0,811429	15,218571	0,021060	31,8	PÉSSIMA	48,1	RUIM
Norte de Minas	LP001	Lagoa dos Patos	0,001250	0,007972	194,975000	0,190798	0,005126	0,200000	13,005000	5,595000	0,513369	52,6	RUIM	64,9	RUIM
Norte de Minas	MA001	Monte Azul	0,002436	0,005000	631,912500	0,238869	0,095979	0,200000	7,373750	0,976250	0,033790	32,2	PÉSSIMA	62,2	RUIM
Norte de Minas	MA003	Monte Azul	0,001587	0,005499	488,375000	1,359020	0,062318	0,200000	6,281250	4,125000	0,033500	40,4	PÉSSIMA	60,0	RUIM
Norte de Minas	MC002	Montes Claros	0,001250	0,005133	57,450000	1,119020	0,010586	0,200000	0,443750	3,096250	0,145716	78,4	REGULAR	74,8	REGULAR
Norte de Minas	MC003	Montes Claros	0,001275	0,005000	254,562500	0,030000	0,003000	0,200000	0,420000	0,508750	0,032758	70,6	REGULAR	100,0	EXCELENTE

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}		IQA _{CCME}	
												Valor	Qualidade	Valor	Qualidade
Norte de Minas	MC004	Montes Claros	0,001250	0,005000	211,325000	0,031942	0,003000	0,200000	1,657500	0,557500	0,020000	71,9	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	MC005	Montes Claros	0,002059	0,005818	188,457143	2,873443	0,027728	0,200000	0,371429	24,430000	0,020000	59,0	RUIM	47,4	RUIM
Norte de Minas	MC006	Montes Claros	0,001250	0,005000	99,850000	0,039924	0,003000	0,200000	0,878750	0,583750	0,020000	81,4	BOA	93,6	BOA
Norte de Minas	MR001	Mirabela	0,001250	0,005000	163,287500	0,102131	0,003795	0,200000	0,666250	1,250000	0,021638	76,3	REGULAR	93,1	BOA
Norte de Minas	MR002	Mirabela	0,002211	0,005000	134,537500	0,119842	0,015639	0,200000	0,860000	1,142500	0,020499	74,6	REGULAR	86,6	BOA
Norte de Minas	MTC001	Matias Cardoso	0,001333	0,005000	393,183333	0,041048	0,007408	0,200000	1,275000	1,850000	0,029167	59,6	RUIM	82,8	BOA
Norte de Minas	MTC002	Matias Cardoso	0,002346	0,005000	49,800000	0,634740	0,013922	0,200000	0,276667	19,306667	0,020000	75,7	REGULAR	57,6	RUIM
Norte de Minas	MTC006	Matias Cardoso	0,001286	0,005000	430,371429	0,124339	0,007275	0,200000	1,998571	5,444286	0,020000	55,8	RUIM	74,4	REGULAR
Norte de Minas	PP001	Pai Pedro	0,003346	0,005454	580,700000	0,043091	0,418261	0,200000	14,391667	0,656667	0,022671	13,1	PÉSSIMA	58,0	RUIM
Norte de Minas	PP002	Pai Pedro	0,002135	0,005215	327,962500	0,145396	0,245662	0,200000	2,191250	0,748750	0,038354	32,6	PÉSSIMA	65,8	REGULAR
Norte de Minas	PP004	Pai Pedro	0,001552	0,005326	441,485714	1,773117	0,627210	0,200000	3,522857	2,984286	0,043152	28,5	PÉSSIMA	50,8	RUIM
Norte de Minas	RM001	Riacho dos Machados	0,003000	0,005000	265,000000	0,087730	0,003000	0,200000	9,250000	0,500000	0,029329	56,3	RUIM	100,0	EXCELENTE
Norte de Minas	SL001	São João da Lagoa	0,002375	0,005000	131,700000	0,045213	0,022629	0,200000	0,453750	0,525000	0,020979	74,3	REGULAR	93,5	BOA
Norte de Minas	SP001	São João da Ponte	0,002375	0,005000	373,487500	0,031141	0,003125	0,200000	2,665000	0,601250	0,020000	59,0	RUIM	79,4	REGULAR
Norte de Minas	SP002	São João da Ponte	0,002750	0,005000	470,614286	0,063087	0,025728	0,200000	4,230000	0,617143	0,036520	48,8	RUIM	72,7	REGULAR
Norte de Minas	VD001	Varzelândia	0,002375	0,005000	344,762500	0,049000	0,003000	0,200000	3,022500	0,963750	0,020000	60,2	RUIM	72,9	REGULAR
Norte de Minas	VD003	Varzelândia	0,004038	0,005000	848,975000	0,094397	0,043096	0,200000	5,993750	0,917500	0,028248	30,9	PÉSSIMA	69,3	REGULAR
Norte de Minas	VD013	Varzelândia	0,002049	0,005000	427,925000	0,115487	0,003750	0,200000	8,982500	1,467500	0,063307	48,8	RUIM	77,7	REGULAR
Norte de Minas	VD014	Varzelândia	0,001715	0,005134	576,425000	0,045079	0,003000	0,200000	8,586250	0,501250	0,025114	43,4	PÉSSIMA	83,6	BOA
Norte de Minas	VD020	Varzelândia	0,003089	0,006880	507,487500	5,907979	0,013779	0,200000	2,252500	29,770000	1,267001	35,9	PÉSSIMA	38,6	PÉSSIMA
Norte de Minas	VZ001	Varzelândia	0,001000	0,005000	257,525000	0,042252	0,088580	0,200000	1,680000	1,265000	0,020000	54,9	RUIM	84,1	BOA

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}		IQA _{CCME}	
												Valor	Qualidade	Valor	Qualidade
Norte de Minas	VZ006	Varzelândia	0,001286	0,005000	342,100000	0,046414	0,007308	0,200000	3,300000	0,510000	0,030451	60,4	RUIM	91,5	BOA
PANM	PM_ARA1	Araçuaí	0,009161	0,016292	481,540000	4,794704	0,877050	0,200000	0,518000	24,160000	0,182455	17,0	PÉSSIMA	32,0	PÉSSIMA
PANM	PM_ARA2	Araçuaí	0,001885	0,005843	713,620000	0,249365	0,258169	0,200000	1,258000	3,578000	0,159797	22,8	PÉSSIMA	58,6	RUIM
PANM	PM_ARA3	Araçuaí	0,003000	0,005000	395,000000	7,123237	0,895613	0,200000	3,490000	47,300000	0,181036	2,9	PÉSSIMA	36,4	PÉSSIMA
PANM	PM_CAP1	Capelinha	0,001500	0,009525	53,125000	1,918620	0,222778	0,200000	1,007500	42,727500	0,083999	39,1	PÉSSIMA	41,9	PÉSSIMA
PANM	PM_ITA1	Itaobim	0,001842	0,047752	85,566667	1,155177	0,050748	0,200000	0,476667	25,053333	0,116304	55,1	RUIM	45,9	RUIM
PANM	PM_ITI1	Itinga	0,001688	0,018355	269,966667	0,252251	0,219931	0,200000	1,311667	3,520000	0,048228	38,8	PÉSSIMA	57,4	RUIM
PANM	PM_MOC1	Coração de Jesus	0,001400	0,005000	210,300000	0,061139	0,004464	0,200000	1,048000	0,580000	0,039411	72,2	REGULAR	100,0	EXCELENTE
PANM	PM_MV1	Mato Verde	0,003194	0,012000	16,900000	2,111300	0,031885	0,200000	0,152000	13,920000	0,078713	66,0	REGULAR	51,7	RUIM
PANM	PM_PA1	Pedra Azul	0,001400	0,007600	48,840000	0,502508	0,081889	0,200000	0,462000	5,950000	0,036460	65,8	REGULAR	61,8	RUIM
PANM	PM_TO1	Teófilo Otoni	0,001333	0,019162	48,116667	8,706105	0,442628	0,200000	0,208333	25,968333	0,099401	18,4	PÉSSIMA	39,5	PÉSSIMA
PANM	PM_TO2	Teófilo Otoni	0,001400	0,012187	19,460000	0,088656	0,006138	0,200000	0,392000	1,456000	0,044059	83,3	BOA	85,4	BOA
PANM	PM_UNA1	Unai	0,001598	0,005000	139,500000	0,444755	0,312978	0,200000	1,177500	3,132500	0,039697	44,0	PÉSSIMA	64,8	RUIM
PANM	PM_UNA2	Unai	0,001961	0,005000	152,520000	0,556962	0,278398	0,200000	0,446000	5,154000	0,025969	51,0	RUIM	58,8	RUIM
PANM	PM_VZ2	Varzelândia	0,002790	0,010915	260,100000	0,960011	0,055995	0,200000	0,847500	3,775000	0,040699	56,1	RUIM	58,3	RUIM
PANM	PME_PA1	Pedra Azul	0,001667	0,030582	70,833333	44,386582	0,420848	0,200000	0,696667	345,00000	0,077297	2,0	PÉSSIMA	32,7	PÉSSIMA
PANM	PME_SB1	Serro	0,001333	0,005000	9,150000	0,142577	0,131910	0,200000	1,636667	0,840000	0,072249	61,7	RUIM	82,8	BOA
PANM	PME_UNA1	Unai	0,001000	0,005000	100,966667	0,281600	0,365278	0,373267	5,360000	3,633333	0,147399	25,9	PÉSSIMA	62,9	RUIM
PANM	PME_VZ1	Varzelândia	0,001498	0,005000	228,400000	4,203724	0,183690	0,200000	0,246000	63,930000	0,344686	32,8	PÉSSIMA	39,0	PÉSSIMA
PANM	PME_VZ2	Verdelândia	0,001565	0,005000	264,200000	6,177154	0,237615	0,200000	1,105000	101,22500	0,099274	21,2	PÉSSIMA	36,8	PÉSSIMA
PANM	RIC_01_IGAM	Montes Claros	0,001500	0,005000	125,100000	2,687079	0,031988	0,200000	0,265000	23,367500	0,020000	58,8	RUIM	49,4	RUIM
PANM	RIC_03_IGAM	Coração de Jesus	0,001500	0,005000	187,750000	4,697653	0,045045	0,200000	0,310000	44,325000	0,031639	45,0	RUIM	44,5	PÉSSIMA
PANM	RIC_06_IGAM	Montes Claros	0,001540	0,005000	260,500000	4,564720	0,328794	0,200000	0,367500	42,300000	0,033216	19,8	PÉSSIMA	42,8	PÉSSIMA
PANM	RIC_08_IGAM	Montes Claros	0,001500	0,005000	172,250000	5,329286	0,146029	0,200000	0,275000	54,100000	0,025668	34,2	PÉSSIMA	42,9	PÉSSIMA
PANM	RIC_83_IGAM	Coração de Jesus	0,001724	0,005000	190,900000	11,441370	0,316550	0,200000	0,260000	95,400000	0,043156	19,1	PÉSSIMA	39,4	PÉSSIMA
Velhas	ALASB	Auguto de Lima	0,002101	0,005000	128,025000	0,208044	0,008665	0,177500	0,318750	0,532500	0,192284	77,3	REGULAR	93,1	BOA
Velhas	ARAPJ	Araçai	0,001979	0,005000	43,475000	0,375005	0,087607	0,177500	0,145000	2,357500	0,122128	73,9	REGULAR	73,4	REGULAR

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}		IQA _{CCME}	
												Índice	Qualidade	Índice	Qualidade
Velhas	BUCGO	Buenópolis	0,002164	0,005000	311,062500	0,078274	0,006292	0,177500	0,847500	0,683750	0,180943	64,6	RUIM	80,1	BOA
Velhas	CBCSL	Capim Branco	0,001000	0,005000	175,071429	0,100088	0,004243	0,174286	0,375714	13,792857	0,214089	73,3	REGULAR	65,4	REGULAR
Velhas	CFNGR	Confins	0,001000	0,005000	196,085714	0,054267	0,003157	0,174286	0,491429	0,504286	0,213496	74,7	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Velhas	COBMC	Corinto	0,001000	0,005000	198,271429	0,078619	0,003241	0,174286	2,812857	0,508571	0,219303	70,8	REGULAR	93,5	BOA
Velhas	COFBM	Corinto	0,001355	0,005000	76,250000	0,272306	0,010646	0,177500	0,185000	1,911250	0,187541	81,1	BOA	85,6	BOA
Velhas	CORSM	Cordisburgo	0,001000	0,005000	202,600000	0,495181	0,056879	0,177500	0,718750	0,656250	0,221084	66,8	REGULAR	77,1	REGULAR
Velhas	CUCC13	Curvelo	0,001053	0,005000	220,740000	0,066968	0,642742	0,164000	0,610000	0,774000	0,039040	40,2	PÉSSIMA	61,0	RUIM
Velhas	DATOM	Datas	0,001000	0,005000	21,137500	0,048429	0,006180	0,177500	0,678750	0,500000	0,192619	87,8	BOA	100,0	EXCELENTE
Velhas	FUGSJT	Funilândia	0,001000	0,005000	80,875000	0,355694	0,007112	0,177500	0,366250	12,893750	0,148632	79,2	REGULAR	63,2	RUIM
Velhas	GOUPA	Gouveia	0,001000	0,005000	94,275000	2,349999	0,897079	0,177500	0,311250	23,147500	0,199989	14,3	PÉSSIMA	45,1	RUIM
Velhas	ITAAS	Itabirito	0,001113	0,005252	45,300000	0,262894	0,003313	0,177500	0,382500	0,681250	0,185645	85,4	BOA	86,6	BOA
Velhas	ITASGB	Itabirito	0,001000	0,005000	16,633333	0,095079	0,007057	0,200000	0,288333	0,821667	0,223828	86,7	BOA	93,5	BOA
Velhas	JABRA	Jabuticatubas	0,003691	0,005000	196,625000	0,097845	0,008600	0,177500	0,288750	0,975000	0,226424	70,5	REGULAR	86,9	BOA
Velhas	JQCVQ	Jequitiba	0,001250	0,005000	206,937500	0,039079	0,003000	0,177500	2,828750	0,500000	0,024981	71,5	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Velhas	LSCBA	Lassance	0,001000	0,005000	224,962500	0,049065	0,003000	0,177500	0,675000	0,562500	0,188689	72,5	REGULAR	93,6	BOA
Velhas	LSCBR	Lassance	0,001000	0,005000	175,728571	0,094296	0,008374	0,174286	0,620000	0,747143	0,207189	74,8	REGULAR	93,6	BOA
Velhas	LSPVD	Lagoa Santa	0,001000	0,005000	175,914286	0,042762	0,003000	0,174286	0,417143	0,550000	0,185023	76,6	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Velhas	LSQSU	Lagoa Santa	0,005135	0,005000	179,125000	0,097241	0,014210	0,177500	0,330000	3,365000	0,174769	69,4	REGULAR	82,1	BOA
Velhas	MGCC02	Morro da Garça	0,001000	0,005104	110,287500	0,197618	0,003186	0,177500	0,426250	0,500000	0,187007	80,7	BOA	93,1	BOA
Velhas	MGNOA	Morro da Garça	0,001000	0,005000	59,362500	1,067556	0,093960	0,177500	0,242500	7,883750	0,184522	62,8	RUIM	60,4	RUIM
Velhas	MONOA	Monjolo	0,001000	0,005000	373,212500	0,048674	0,003978	0,177500	1,075000	0,510000	0,175110	62,1	RUIM	90,8	BOA
Velhas	MTBSP	Matozinhos	0,013371	0,005068	180,500000	1,937266	0,217675	0,177500	1,343750	0,508750	0,565685	65,2	REGULAR	58,5	RUIM
Velhas	NILMEG	Nova Lima	0,001101	0,005000	85,175000	0,280614	0,003000	0,155000	0,320000	1,405000	0,020000	84,7	BOA	86,3	BOA
Velhas	PLFEX	Pedro Leopoldo	0,001029	0,005000	209,980000	0,122786	0,210938	0,164000	0,660000	0,500000	0,020000	59,8	RUIM	78,3	REGULAR
Velhas	PLFID	Pedro Leopoldo	0,001316	0,005000	207,150000	0,034543	0,025234	0,177500	1,763750	1,015000	0,100837	68,9	REGULAR	86,4	BOA
Velhas	PLMMC	Pedro Leopoldo	0,001159	0,005000	207,560000	0,112927	0,019738	0,164000	0,716000	1,770000	0,024249	71,5	REGULAR	91,8	BOA
Velhas	PMFSR	Prudente de Moraes	0,001079	0,005000	138,012500	0,349232	0,006044	0,177500	0,305000	2,552500	0,172633	77,0	REGULAR	82,9	BOA
Velhas	SABRC	Sabarará	0,001000	0,005000	136,425000	0,052195	0,008447	0,177500	5,057500	0,638750	0,171133	71,4	REGULAR	87,1	BOA
Velhas	SJLRM	São José da Lapa	0,002170	0,005000	235,950000	1,720890	0,097590	0,177500	0,662500	12,991250	0,219192	49,4	RUIM	54,9	RUIM
Velhas	SPPEX	Santana do Pirapama	0,001000	0,005000	107,000000	0,039494	0,003057	0,174286	0,455714	0,500000	0,190286	81,9	BOA	100,0	EXCELENTE

Rede	Ponto	Município	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 uT)	Zinco (VMP 2 mg/L)	IQA _{SUB}		IQA _{CCME}	
												Valor	Qualidade	Valor	Qualidade
Velhas	SRCM	Santana do Riacho	0,001000	0,005000	167,762500	0,337880	0,141820	0,177500	0,241250	1,226250	0,178239	68,0	REGULAR	74,4	REGULAR
Velhas	VPBGU	Varzea Da Palma	0,007303	0,005000	117,757143	0,696638	0,214574	0,174286	0,314286	10,204286	0,316267	41,7	PÉSSIMA	54,2	RUIM
Velhas	VPCEM	Varzea Da Palma	0,001629	0,005000	108,171429	0,101890	0,166863	0,174286	0,181429	0,602857	0,213158	53,6	RUIM	81,3	BOA
Velhas	VPCLV	Vespasiano	0,001000	0,005000	235,000000	0,043900	0,003000	0,200000	1,120000	0,500000	0,062150	70,9	REGULAR	100,0	EXCELENTE
Velhas	VPCRD	Varzea Da Palma	0,001634	0,005000	132,525000	0,044111	0,010914	0,177500	0,323750	0,652500	0,205923	77,4	REGULAR	93,6	BOA

Fonte: Autora (2024).

APÊNDICE E – Padronização pelo método Zscores

Ponto	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)
CAL1	-0,434591	-0,246505	-1,033520	-0,268918	-0,551368	0,284364	-0,625464	-0,286001	-0,317528
CD3	8,502275	-0,246505	1,298903	-0,265490	-0,197070	0,284364	1,518007	-0,286001	-0,550938
FRT1	-0,258033	-0,246505	-1,249678	-0,266455	-0,551368	0,284364	-0,583158	-0,281269	-0,569245
FRT2	-0,331603	-0,246505	-1,248121	-0,270521	-0,551368	0,284364	-0,587859	-0,286001	-0,569245
UBR3	-0,434591	-0,246505	-0,978703	-0,268805	-0,551368	0,284364	-0,627814	-0,286001	-0,569245
BC001	0,509356	-0,212355	1,931444	-0,143073	-0,273502	0,284364	0,582295	-0,199812	-0,473534
BC003	-0,298148	-0,246505	0,358014	-0,269639	-0,548267	0,284364	0,250022	-0,277455	-0,573863
CE001	-0,318322	-0,246505	0,963211	-0,273117	-0,551368	0,284364	2,535391	-0,285603	-0,325402
CJ002	-0,332259	-0,246505	-0,710690	-0,272917	-0,551368	0,284364	-0,482830	-0,285168	-0,573863
CJ004	-0,274743	0,572607	0,950112	-0,228575	0,434795	0,284364	1,342910	-0,247470	2,051241
CJ005	-0,332259	-0,207245	-0,228680	-0,247016	-0,540508	0,284364	-0,374423	-0,252214	-0,573863
CJ006	-0,332259	-0,246505	-0,405259	-0,273069	-0,549104	0,284364	0,357988	-0,284190	-0,573863
CP001	-0,332259	-0,196628	-0,130502	-0,247076	-0,347506	0,284364	-0,492084	-0,285965	-0,573863
EN001	-0,434591	-0,246505	-0,044592	-0,175213	-0,330864	0,284364	-0,555190	-0,189354	-0,573863
EP001	1,460496	-0,229182	1,959199	-0,228604	-0,176571	0,284364	4,391538	-0,284879	-0,446003
EP004	-0,013351	-0,143907	1,615833	-0,261248	-0,551084	0,284364	1,675623	-0,281873	-0,535681
EP006	0,253623	-0,246505	1,699226	-0,270254	0,428555	0,284364	0,242089	-0,285784	-0,540988
FD001	-0,332259	-0,173671	-1,217341	-0,240625	-0,490679	0,284364	-0,630018	-0,269017	-0,567490
FD002	0,069984	-0,246505	-0,709393	-0,196404	0,057938	0,284364	-0,545407	-0,238452	-0,573863
FS002	-0,317640	-0,246505	-0,048831	0,030688	-0,548071	0,284364	-0,490322	0,062480	-0,326825
FS003	0,000754	-0,246505	1,792087	-0,271211	0,176042	0,284364	0,810127	-0,285929	-0,570430
FS004	0,342242	-0,246505	4,201160	-0,253437	-0,307669	0,284364	1,590572	-0,268256	-0,361964
FS007	-0,398317	-0,246505	1,211783	-0,271185	-0,551368	0,284364	-0,149059	-0,286001	-0,573863
GM001	-0,021121	-0,246505	-0,233155	-0,241201	-0,421358	0,284364	-0,247066	-0,276549	-0,507180
JB003	-0,332259	-0,246505	-1,127916	-0,255649	-0,517296	0,284364	-0,517644	-0,286001	-0,561739
JB007	-0,192901	-0,246505	0,738673	0,099509	-0,413334	0,284364	-0,340239	0,088553	-0,547033
JB008	0,295529	-0,246505	0,291848	-0,235198	-0,299657	0,284364	-0,423338	-0,248049	-0,494551
JB020	-0,295606	-0,246505	0,233087	-0,168323	-0,131993	0,284364	-0,185623	-0,147147	0,538295
JB021	-0,264290	0,002501	-1,003382	-0,267474	-0,522213	0,284364	-0,352326	-0,277517	-0,123521
JF001	-0,332259	-0,246505	-0,583524	-0,238000	0,268804	0,284364	-0,482830	-0,283068	-0,573863
JF002	-0,317640	-0,246505	0,284965	-0,257318	-0,546528	0,284364	-0,003810	-0,274082	-0,573863

Ponto	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)
JN001	-0,295855	-0,246505	1,423496	-0,232626	-0,513466	0,284364	0,071105	-0,250186	-0,191087
JQ001	-0,048949	-0,024781	-0,692727	-0,082587	3,078760	0,284364	-0,593441	-0,119599	-0,433219
JQ002	-0,332259	-0,246505	0,544622	-0,270132	-0,535620	0,284364	-0,069472	-0,282995	-0,573863
JQ003	0,157980	-0,246505	-0,243966	-0,263712	-0,509280	0,284364	-0,560327	-0,285711	-0,573863
JR001	-0,317640	-0,246505	2,076896	-0,063241	0,123895	0,284364	-0,405207	0,140412	-0,566582
LP001	-0,332259	0,355049	-0,269664	-0,236632	-0,539770	0,284364	3,893569	-0,138394	2,813120
MA001	0,153034	-0,246505	1,997069	-0,225483	-0,044139	0,284364	1,908303	-0,272204	-0,479192
MA003	-0,194328	-0,145562	1,252429	0,034294	-0,227769	0,284364	1,523148	-0,180981	-0,481186
MC002	-0,332259	-0,219592	-0,983113	-0,021365	-0,509984	0,284364	-0,534831	-0,210785	0,289179
MC003	-0,321864	-0,246505	0,039463	-0,273923	-0,551368	0,284364	-0,543203	-0,285748	-0,486280
MC004	-0,332259	-0,246505	-0,184844	-0,273472	-0,551368	0,284364	-0,106930	-0,284335	-0,573863
MC005	-0,001223	-0,080829	-0,303477	0,385508	-0,416471	0,284364	-0,560327	0,407277	-0,573863
MC006	-0,332259	-0,246505	-0,763151	-0,271621	-0,551368	0,284364	-0,381474	-0,283575	-0,573863
MR001	-0,332259	-0,246505	-0,434052	-0,257195	-0,547033	0,284364	-0,456389	-0,264273	-0,562620
MR002	0,061063	-0,246505	-0,583200	-0,253087	-0,482419	0,284364	-0,388084	-0,267387	-0,570436
MTC001	-0,298148	-0,246505	0,758596	-0,271361	-0,527318	0,284364	-0,241778	-0,246890	-0,510932
MTC002	0,116547	-0,246505	-1,022799	-0,133676	-0,491785	0,284364	-0,593735	0,258848	-0,573863
MTC006	-0,317640	-0,246505	0,951520	-0,252044	-0,528044	0,284364	0,013313	-0,142760	-0,573863
PP001	0,525811	-0,154672	1,731391	-0,270887	1,714006	0,284364	4,382431	-0,281462	-0,555524
PP002	0,030126	-0,203027	0,420245	-0,247161	0,772424	0,284364	0,081241	-0,278795	-0,447863
PP004	-0,208821	-0,180596	1,009178	0,130328	2,853882	0,284364	0,550692	-0,214029	-0,414924
RM001	0,384064	-0,246505	0,093610	-0,260534	-0,551368	0,284364	2,569764	-0,286001	-0,509816
SL001	0,128234	-0,246505	-0,597920	-0,270395	-0,444287	0,284364	-0,531305	-0,285277	-0,567145
SP001	0,128234	-0,246505	0,656419	-0,273658	-0,550686	0,284364	0,248259	-0,283068	-0,573863
SP002	0,281892	-0,246505	1,160291	-0,266250	-0,427380	0,284364	0,799991	-0,282607	-0,460455
VD001	0,128234	-0,246505	0,507400	-0,269516	-0,551368	0,284364	0,374294	-0,272566	-0,573863
VD003	0,808862	-0,246505	3,123141	-0,258988	-0,332631	0,284364	1,421791	-0,273906	-0,517239
VD013	-0,005119	-0,246505	0,938828	-0,254097	-0,547276	0,284364	2,475459	-0,257972	-0,276558
VD014	-0,142058	-0,219410	1,709213	-0,270426	-0,551368	0,284364	2,335763	-0,285965	-0,538752
VD020	0,420546	0,134049	1,351581	1,089256	-0,492565	0,284364	0,102834	0,561982	7,986813
VZ001	-0,434591	-0,246505	0,054831	-0,271081	-0,084505	0,284364	-0,098997	-0,263838	-0,573863
VZ006	-0,317640	-0,246505	0,493587	-0,270116	-0,527866	0,284364	0,472125	-0,285711	-0,502113
PM_ARA1	2,905977	2,039251	1,216971	0,831073	4,216835	0,284364	-0,508654	0,399455	0,541394
PM_ARA2	-0,072180	-0,075830	2,420950	-0,223049	0,840654	0,284364	-0,247771	-0,196828	0,385843

Ponto	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercurio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)
PM_ARA3	0,384064	-0,246505	0,768021	1,371089	4,318102	0,284364	0,539108	1,069845	0,531649
PM_CAP1	-0,229927	0,669474	-1,005550	0,164072	0,647589	0,284364	-0,336084	0,937375	-0,134510
PM_ITA1	-0,090139	8,407703	-0,837250	-0,012980	-0,290889	0,284364	-0,523226	0,425335	0,087263
PM_ITI1	-0,153119	2,456886	0,119376	-0,222380	0,632058	0,284364	-0,228851	-0,198509	-0,380076
PM_MOC1	-0,270860	-0,246505	-0,190161	-0,266701	-0,543384	0,284364	-0,321805	-0,283683	-0,440605
PM_MV1	0,463272	1,170479	-1,193477	0,208757	-0,393789	0,284364	-0,637685	0,102791	-0,170795
PM_PA1	-0,270860	0,279804	-1,027779	-0,164342	-0,121005	0,284364	-0,528397	-0,128109	-0,460862
PM_TO1	-0,298148	2,620353	-1,031532	1,738177	1,846934	0,284364	-0,617825	0,451844	-0,028774
PM_TO2	-0,270860	1,208312	-1,180196	-0,260320	-0,534251	0,284364	-0,553075	-0,258305	-0,408697
PM_UNA1	-0,190018	-0,246505	-0,557456	-0,177736	1,139654	0,284364	-0,276151	-0,209735	-0,438641
PM_UNA2	-0,041229	-0,246505	-0,489911	-0,151714	0,951009	0,284364	-0,534037	-0,151170	-0,532887
PM_VZ2	0,298292	0,950846	0,068190	-0,058241	-0,262264	0,284364	-0,392491	-0,191121	-0,431766
PME_PA1	-0,161706	4,932045	-0,913683	10,012936	1,728120	0,284364	-0,445666	9,694535	-0,180516
PME_SB1	-0,298148	-0,246505	-1,233682	-0,247815	0,151876	0,284364	-0,114274	-0,276151	-0,215172
PME_UNA1	-0,434591	-0,246505	-0,757358	-0,215574	1,424969	8,975750	1,198366	-0,195225	0,300731
PME_VZ1	-0,230746	-0,246505	-0,096263	0,694017	0,434351	0,284364	-0,604546	1,551634	1,655107
PME_VZ2	-0,203326	-0,246505	0,089460	1,151681	0,728529	0,284364	-0,301710	2,632111	-0,029649
RIC_01_IGAM	-0,229927	-0,246505	-0,632160	0,342288	-0,393231	0,284364	-0,597848	0,376495	-0,573863
RIC_03_IGAM	-0,229927	-0,246505	-0,307146	0,808565	-0,321997	0,284364	-0,581983	0,983656	-0,493959
RIC_06_IGAM	-0,213554	-0,246505	0,070265	0,777737	1,225933	0,284364	-0,561712	0,924990	-0,483133
RIC_08_IGAM	-0,229927	-0,246505	-0,387556	0,955049	0,228896	0,284364	-0,594322	1,266849	-0,534951
RIC_83_IGAM	-0,138238	-0,246505	-0,290804	2,372520	1,159141	0,284364	-0,599611	2,463354	-0,414897
ALASB	0,016054	-0,246505	-0,616985	-0,232632	-0,520465	-0,844278	-0,578899	-0,285060	0,608871
ARAPJ	-0,033968	-0,246505	-1,055612	-0,193912	-0,089810	-0,844278	-0,640153	-0,232187	0,127246
BUCGO	0,041812	-0,246505	0,332572	-0,262727	-0,533407	-0,844278	-0,392491	-0,280678	0,531011
CBCSL	-0,434591	-0,246505	-0,372919	-0,257669	-0,544587	-1,005513	-0,558816	0,099107	0,758562
CFNGR	-0,434591	-0,246505	-0,263902	-0,268295	-0,550510	-1,005513	-0,518022	-0,285877	0,754490
COBMC	-0,434591	-0,246505	-0,252563	-0,262648	-0,550052	-1,005513	0,300385	-0,285753	0,794354
COFBM	-0,289154	-0,246505	-0,885582	-0,217729	-0,509657	-0,844278	-0,626051	-0,245116	0,576306
CORSM	-0,434591	-0,246505	-0,230107	-0,166041	-0,257442	-0,844278	-0,437881	-0,281474	0,806578
CUCC13	-0,413038	-0,246505	-0,136001	-0,265350	2,938616	-1,521464	-0,476220	-0,278063	-0,443153
DATOM	-0,434591	-0,246505	-1,171494	-0,269649	-0,534020	-0,844278	-0,451983	-0,286001	0,611171
FUGSJT	-0,434591	-0,246505	-0,861589	-0,198390	-0,528933	-0,844278	-0,562153	0,073059	0,309196
GOUPA	-0,434591	-0,246505	-0,792073	0,264115	4,326100	-0,844278	-0,581543	0,370121	0,661766

Ponto	Arsênio (VMP 0,01mg/L)	Chumbo (VMP 0,01 mg/L)	Dureza (VMP 300 mg/L)	Ferro (VMP 0,3 mg/L)	Manganês (VMP 0,05 mg/L)	Mercúrio (VMP 1 µg/L)	Nitrato (VMP 10 mg/L)	Turbidez (VMP 1 NTU)	Zinco (VMP 2 mg/L)
ITAAS	-0,388439	-0,195551	-1,046144	-0,219912	-0,549663	-0,844278	-0,556424	-0,280750	0,563294
ITASGB	-0,434591	-0,246505	-1,194860	-0,258830	-0,529233	0,284364	-0,589622	-0,276682	0,825416
JABRA	0,666747	-0,246505	-0,261104	-0,258189	-0,520818	-0,844278	-0,589475	-0,272240	0,843243
JQCVQ	-0,332259	-0,246505	-0,207605	-0,271817	-0,551368	-0,844278	0,305988	-0,286001	-0,539668
LSCBA	-0,434591	-0,246505	-0,114096	-0,269502	-0,551368	-0,844278	-0,453305	-0,284190	0,584192
LSCBR	-0,434591	-0,246505	-0,369510	-0,259012	-0,522050	-1,005513	-0,472695	-0,278841	0,711189
LSPVD	-0,434591	-0,246505	-0,368547	-0,270963	-0,551368	-1,005513	-0,544211	-0,284553	0,559024
LSQSU	1,257809	-0,246505	-0,351890	-0,258329	-0,490213	-0,844278	-0,574932	-0,202999	0,488628
MGCC02	-0,434591	-0,225457	-0,709004	-0,235050	-0,550354	-0,844278	-0,541000	-0,286001	0,572642
MGNOA	-0,434591	-0,246505	-0,973191	-0,033300	-0,055156	-0,844278	-0,605780	-0,072086	0,555585
MONOA	-0,434591	-0,246505	0,654992	-0,269592	-0,546034	-0,844278	-0,312287	-0,285711	0,490966
MTBSP	4,629002	-0,232648	-0,344757	0,168396	0,619748	-0,844278	-0,217540	-0,285748	3,172268
NILMEG	-0,393318	-0,246505	-0,839282	-0,215802	-0,551368	-1,972921	-0,578458	-0,259782	-0,573863
PLFEX	-0,422881	-0,246505	-0,191821	-0,252405	0,582997	-1,521464	-0,458593	-0,286001	-0,573863
PLFID	-0,305408	-0,246505	-0,206503	-0,272869	-0,430073	-0,844278	-0,069472	-0,271081	-0,018915
PLMMC	-0,369648	-0,246505	-0,204376	-0,254691	-0,460054	-1,521464	-0,438850	-0,249208	-0,544691
PMFSR	-0,402453	-0,246505	-0,565173	-0,199889	-0,534763	-0,844278	-0,583746	-0,226538	0,473962
SABRC	-0,434591	-0,246505	-0,573408	-0,268776	-0,521650	-0,844278	1,091722	-0,281981	0,463665
SJLRM	0,044118	-0,246505	-0,057095	0,118216	-0,035349	-0,844278	-0,457711	0,075884	0,793590
SPPEX	-0,434591	-0,246505	-0,726058	-0,271721	-0,551056	-1,005513	-0,530613	-0,286001	0,595151
SRCM	-0,434591	-0,246505	-0,410836	-0,202521	0,205936	-0,844278	-0,606221	-0,264961	0,512447
VPBGU	2,145584	-0,246505	-0,670253	-0,119321	0,602834	-1,005513	-0,580472	-0,004858	1,460010
VPCEM	-0,177245	-0,246505	-0,719981	-0,257251	0,342556	-1,005513	-0,627310	-0,283021	0,752171
VPCLV	-0,434591	-0,246505	-0,062023	-0,270699	-0,551368	0,284364	-0,296422	-0,286001	-0,284502
VPCRD	-0,175007	-0,246505	-0,593640	-0,270650	-0,508196	-0,844278	-0,577136	-0,281583	0,702498

APÊNDICE F – Código utilizado no software RStudio – k-means

```
library(readxl)

### Carregamento dos dados
base_original <- read_xlsx("clustvalores.xlsx", sheet = 3)
base_clus <- read_xlsx("clustvalores.xlsx", sheet = 4)
base_clus <- as.data.frame(scale(base_clus[,-1]))
df=scale(base_clus)
head(df, n=3)

### Número ótimo de clusters
library(factoextra)
fviz_nbclust(base_clus, kmeans, method = "wss", k.max = 10)+ geom_vline(xintercept
= 3, linetype =2)

### Clusterização k-means
set.seed(123)
km.res = kmeans(df,3,iter.max=10,nstart = 25)
print(km.res)
aggregate(base_clus, by=list(cluster=km.res$cluster), mean)
base_clus2=cbind(base_clus, cluster=km.res$cluster)
head(base_clus2)
km.res$centers

### Plotagem dos Clusters
library(ggplot2)
library(factoextra)
fviz_cluster(km.res,data = base_clus2)
base_clus2=cbind(base_original, cluster=km.res$cluster)

###Exportação dos resultados
write.csv2(base_clus2, file = "cluster_valores.csv")
```

APÊNDICE G – Código utilizado no software RStudio - ACP

```
#Carregar pacotes
library(sidrar)
library(factoextra)
library(tidyverse)
library(readxl)
library(FactoMineR)
library(missMDA)
library("factoextra")

# Importar dados
df_acp <- read_excel("ACP.xlsx")

#Seleção das variáveis
dados<- df_acp %>% select(Arsenio, Chumbo, Dureza, Ferro, Manganes, Mercurio,
Nitrito, Turbidez, Zinco)

#Cálculo da ACP
acp <- PCA(dados, graph=F)

# Visualização por valores de cos2

fviz_pca_var(acp, col.var = "cos2",
             gradient.cols = c("#00AFBB", "#E7B800", "#FC4E07"),
             repel = TRUE)

#Comunalidade explicada por cada componente
fviz_eig(acp, addlabels=TRUE, ylim = c(0,50))

#Sumarização dos dados
facto_summarize(acp, "var", axes = 1:2)
```

ANEXO A – Parâmetros analisados pela CETESB no monitoramento subterrâneo

Tipo de Parâmetro	Parâmetros
Físicos	Temperatura da água e do ar, Sólidos Dissolvidos Totais
Microbiológicos	Escherichia coli, Bactérias Heterotróficas e Coliformes Totais
Químicos	pH, Alcalinidade Bicarbonato, Alcalinidade Carbonato, Alcalinidade Hidróxido, Condutividade Elétrica, Dureza Total, Nitrogênio Nitrato, Nitrogênio Nitrito, Nitrogênio Amoniacal Total, Nitrogênio Kjeldahl Total, Carbono Orgânico Dissolvido, Cloreto, Fluoreto, Sulfato e as concentrações totais de Alumínio, Antimônio, Arsênio, Bário, Berílio, Boro, Cádmio, Cálcio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Crômio, Crômio Hexavalente, Estanho, Estrôncio, Ferro, Lítio, Magnésio, Manganês, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Potássio, Prata, Selênio, Sódio, Titânio, Urânio, Vanádio e Zinco
Agrotóxicos determinados em 38 pontos da Rede de Qualidade (45 ensaios)	Alacloro, Aldrin, alfa-Hexaclorociclohexano (alfa-HCH), Ametrina, Atrazina, beta-Hexaclorociclohexano (beta-HCH), cis-Clordano, cis-Permetrina, Clorpirifós (Clorpirifós etílico), Clorpirifós-oxon, delta-Hexaclorociclohexano (delta-HCH), Demeton O, Demeton S, Dieldrin, Dodecacloro pentaciclodecano (Mirex), Endossulfan I, Endossulfan II, Endossulfan Sulfato, Endrin, Endrin Aldeído, Endrin Cetona, Etil Paration, Gution (Azinfos-metil), Heptacloro, Heptacloro Epóxido, Hexaclorobenzeno (HCB), Lindano (gama Hexaclorociclohexano/gama-HCH), Malation, Metil Paration, Metolacloro, Metoxicloro, Molinato, p,p'-DDD (TDE), p,p'-DDE, p,p'-DDT, Pendimetalina, Pentaclorobenzeno, Profenofós, Propanil, Simazina, Terbufós, Toxafeno 26, Toxafeno 50, Toxafeno 62, trans-Clordano, trans-Permetrina, Trifluralina
Substâncias Voláteis em 35 pontos da Rede de Qualidade (57 ensaios)	1,2-Dicloropropano, Clorobenzeno, 1,3,5-Triclorobenzeno, Hexaclorobutadieno, Bromoclorometano, 1,1-Dicloro-1-propeno, n-Propilbenzeno, Dibromofluorometano, 1,2,4-Triclorobenzeno, sec-Butilbenzeno, Bromodiclorometano, Estireno, Etilbenzeno, Tolueno, 1,1,1,2-Tetracloroetano, 1,2-Dibromoetano, 1,1-Dicloroetano, Tetracloroeto de Carbono, 1,2,3-Tricloropropano, m-Xileno + p-Xileno, Bromofórmio, n-Butilbenzeno, Isopropilbenzeno (Cumeno), 1,2,4-Trimetilbenzeno, 1,2-Diclorobenzeno, Tricloroetano, o-Xileno, Benzeno, Cis-1,2-Dicloroetano, terc-Butilbenzeno, 1,2-Dicloroetano, Cloreto de Metileno (Diclorometano), Bromobenzeno, Tetracloroetano, 1,1-Dicloroetano, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,2-Tricloroetano, 2-Clorotolueno, 1,3,5-Trimetilbenzeno, trans-1,2 Dicloroetano, Naftaleno, 1,4-Diclorobenzeno, 1,3-Dicloropropano, Cloreto de Vinila, Dibromoclorometano, 1,1,2,2-Tetracloroetano, Clorofórmio, 4-Clorotolueno, 2,2-Dicloropropano, 1,3-Diclorobenzeno, p-Isopropiltolueno, 4-bromofluorbenzeno, Dibromometano, 1,2,3-Triclorobenzeno
Fenóis por Cromatografia Gasosa em 33 pontos da Rede de Qualidade (39 ensaios)	Pentaclorofenol (PCP), 2,4-Diclorofenol, 2-Clorofenol, 3,4-Diclorofenol, 2,4,6-Triclorofenol, 2,3,4,6-Tetraclorofenol, 2,4,5-Triclorofenol, 2,3,4,5-Tetraclorofenol

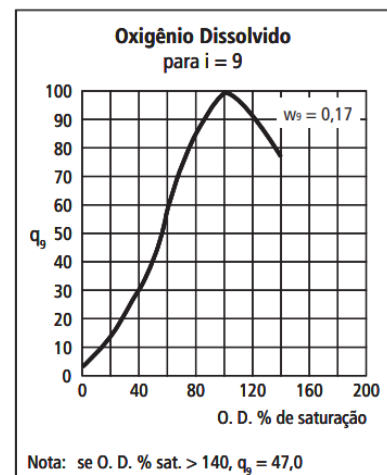
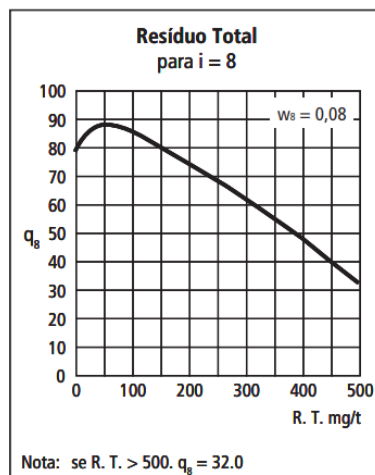
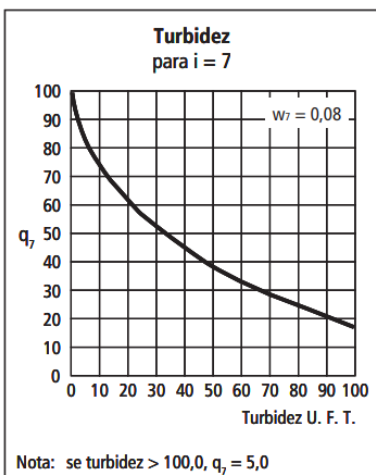
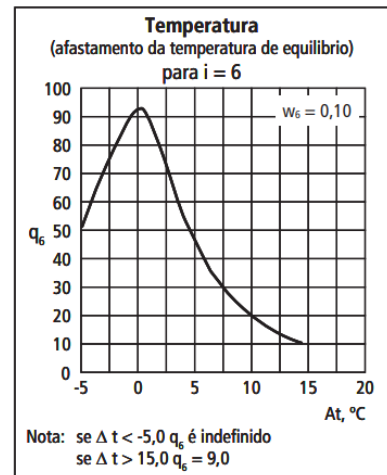
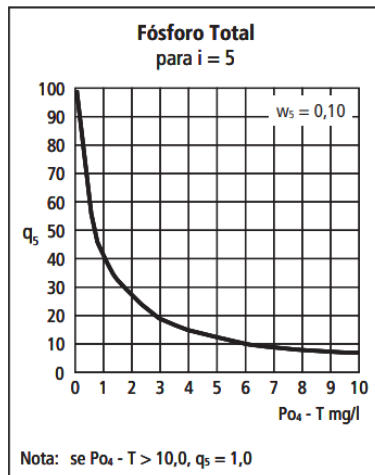
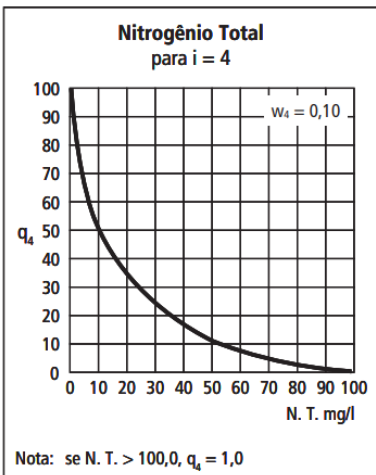
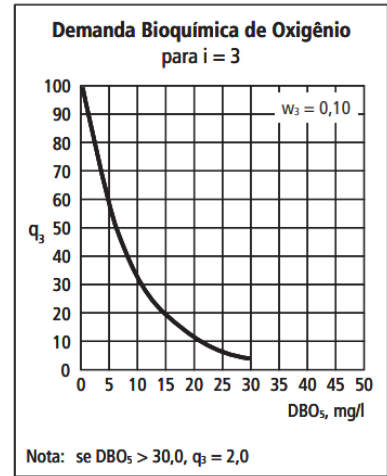
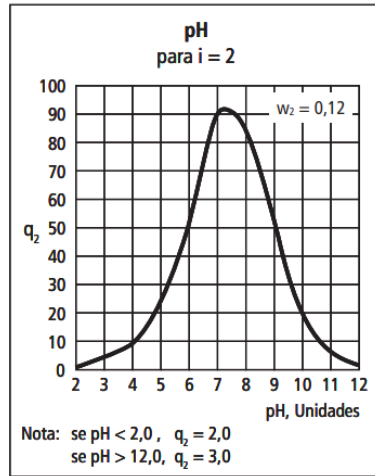
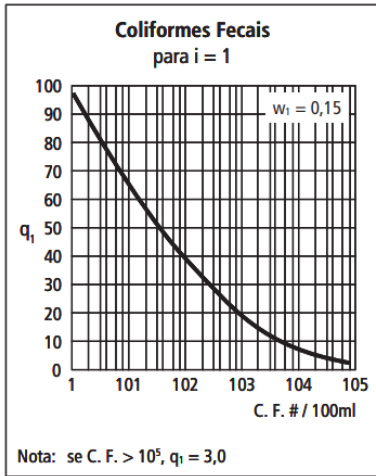
Fonte: Adaptado de CETESB (2021).

ANEXO B – Principais parâmetros analisados pelo IGAM

Tipo de Parâmetro	Parâmetros
Físicos	Turbidez, Sólidos Totais Dissolvidos, Cor, Condutividade elétrica, Nível estático
Microbiológicos	Escherichia coli
Químicos	pH, Dureza total, Alumínio, Ferro, Manganês, Zinco, Bário, Cádmio, Cromo, Cobre, Mercúrio, Níquel, Chumbo, Lítio, Sódio, Sulfato, Cloreto, Cálcio, Magnésio, Potássio, Carbonato, Nitrogênio amoniacal, Nitrato, Fósforo Total, Fenóis, Arsênio, Fluoreto, Selênio, Boro, Silício

Fonte: Adaptado de IGAM (2020).

ANEXO C – Curvas médias de variação de qualidade das águas



Fonte: CETESB (2022).