

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

Larissa Guarany Ramalho Elias

**Panorama da qualidade das águas superficiais do estado de Minas Gerais por meio da
Análise Exploratória de Dados Espaciais – AEDE**

Belo Horizonte
2024

Larissa Guarany Ramalho Elias

**Panorama da poluição das águas superficiais do estado de Minas Gerais por meio da
Análise Exploratória de Dados Espaciais – AEDE**

Dissertação/tese 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: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Caracterização, prevenção e controle da poluição

Orientador: Profa. Dra. Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Belo Horizonte
2024

E42p

Elias, Larissa Guarany Ramalho.

Panorama da poluição das águas superficiais do Estado de Minas Gerais por meio da Análise Exploratória de Dados Espaciais – AEDE [recurso eletrônico] / Larissa Guarany Ramalho Elias. – 2024.
1 recurso online (149 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira.

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

Bibliografia: f. 144-149.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Meio ambiente - Teses. 3. Água - Qualidade - Teses. 4. Poluição da água - Prevenção - Teses.
5. Estatística - Teses. I. Oliveira, Sílvia Maria Alves Corrêa.
I. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III.
Título.

CDU: 628(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Panorama da Poluição das Águas Superficiais do Estado de Minas Gerais Por Meio da Análise Exploratória de Dados Espaciais - Aede"

LARISSA GUARANY RAMALHO ELIAS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profa. Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira - Orientadora

Profa Miriam Cristina Santos Amaral Moravia

Profa Carolina Cristiane Pinto

Marília Carvalho de Melo

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura
Sílvia Maria Alves Corrêa Oliveira

Profa.

Coordenadora
Orientadora

Belo Horizonte, 29 de fevereiro de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Carolina Cristiane Pinto, Usuária Externa**, em 05/04/2024, às 12:17, 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 **Silvia Maria Alves Correa Oliveira, Professora do Magistério Superior**, em 05/04/2024, às 16:37, 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 **Marília Carvalho de Melo, Usuário Externo**, em 09/04/2024, às 10:39, 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 **Miriam Cristina Santos Amaral Moravia, Professora do Magistério Superior**, em 23/04/2024, às 14:23, 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 25/04/2024, às 09:27, 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 **3165767** e o código CRC **DD7714E0**.

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todas as mulheres na Ciência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos e a seu corpo docente, à orientação cuidadosa da Profa. Dra. Silvia Maria Correia de Oliveira e aos membros do Grupo de Estudos para Tratamento Estatístico de Dados Ambientais – GETEDA pelos ensinamentos e apoio.

Agradeço ainda ao meu querido pai, Rui, que sempre me apoiou nas minhas empreitadas e aos meus amigos, cujos nomes serão aqui representados pelos de Bruno Antônio.

Por fim, agradeço ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, à Universidade Federal de Minas Gerais, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

A água é um bem comum e um recurso natural limitado, cujo uso está intrinsecamente ligado à qualidade. Em Minas Gerais, o responsável pelo monitoramento de qualidade de águas superficiais é o Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, no escopo do Projeto “Águas de Minas”, com a instituição de redes de amostragem em todo o estado. Considerando a extensão territorial desta rede e o período de amostragem, há uma enorme quantidade de dados com os quais é preciso lidar de forma sistemática para obtenção de informações pertinentes à melhoria da gestão. Neste contexto, a pesquisa tem como objetivo geral analisar e mapear a poluição das águas superficiais nas Bacias Hidrográficas de Minas Gerais. O trabalho irá quantificar a magnitude dos parâmetros de qualidade das águas por estação de monitoramento e bacia hidrográfica, além de determinar os padrões espaciais para parâmetros estudados. Será possível, então, conhecer o problema da poluição hídrica no estado como um todo, de modo a dar subsídio para a alocação ótima de investimentos em monitoramento, visando garantir o alcance da ODS 6. A base de dados utilizada para esta pesquisa é a série histórica de monitoramento da qualidade das águas do IGAM, considerando os anos de 2000 a 2021. Os passos metodológicos consistiram na formatação do banco de dados e criação de duas planilhas *Excel* aptas a serem analisadas em *softwares* em linguagem de programação *R*, *QuantumGIS* e *ArcGIS*; criação de arquivo *shape* com todas as estações de monitoramento estudadas; execução da estatística descritiva; elaboração de mapas de distribuição das medianas dos parâmetros por estação, agrupados em cinco faixas de valores; e análise estatística espacial de autocorrelação global e local, através do índice *I* de Moran. Os resultados encontrados permitiram delimitar os locais de maior degradação da qualidade das águas no estado para cada um dos parâmetros estudados e, também, de forma integrada. Concluiu-se que a aplicação do *I* de Moran local é uma ferramenta de importante para análise de qualidade da água, já que permite delimitar os pontos focais em relação à degradação.

Palavras-chave: Estatística espacial; Água superficial; Poluição hídrica.

ABSTRACT

Water is a limited natural resource, and its use is intrinsically linked to quality. In Minas Gerais, the Institute for Water Management (IGAM) is responsible for monitoring the quality of surface water within the scope of the "Águas de Minas" Project, with the establishment of sampling networks throughout the entire state. Considering the territorial extension of this network and the sampling period, there is a huge amount of data that needs to be dealt with systematically to obtain relevant information that will help to improve water management. In this context, the goal with this research is to analyze and map surface water pollution in the river basins of Minas Gerais. This study will quantify the magnitude of water quality parameters by monitoring station and river basin, as well as determine spatial patterns for the parameters. It will then be possible to understand the problem of water pollution in the state as a whole and provide support for the optimum allocation of investments in monitoring to guarantee the achievement of GSD 6. The database used for this research is IGAM's historical water quality monitoring series, covering the years 2000 to 2021. The methodological steps consisted of creating a database in Excel spreadsheets format, suitable for input into R language software, QuantumGIS and ArcGIS, creating a shape with all the monitoring stations studied, performing descriptive statistics, drawing up distribution maps of the medians of the parameters per station grouped into five ranges of values and spatial statistical analysis of global and local autocorrelation, using Moran's I index. The results made it possible to delineate the sites of greatest degradation of water quality in the state for each of the parameters studied and integratively. In conclusion, the application of local Moran's I is a valuable tool for analyzing water quality since it allows to determinate focal points and areas where the is degradation.

Keywords: Spatial analysis; surface water; water pollution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama de espalhamento de Moran.	34
Figura 2 – Distribuição espacial dos artigos que compõem a revisão bibliográfica	36
Figura 3 – Distribuição anual dos artigos que compõem a revisão bibliográfica.....	36
Figura 4 - Apresentação dos diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos identificados nos artigos de revisão bibliográfica.....	37
Figura 5 – Metodologia aplicada para a revisão sistemática	42
Figura 6 - Fluxogramas dos métodos aplicadas ao banco de dados nas diferentes fases da pesquisa.	47
Figura 7 – Fluxograma da seleção de parâmetros, seus tratamentos e representações na presente pesquisa.	53
Figura 8 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores de Bário e Boro por Bacia Hidrográfica	55
Figura 9 - Gráficos <i>box-plot</i> dos valores de Cádmio e Mercúrio por Bacia Hidrográfica....	55
Figura 10 – Gráficos <i>box-plot</i> dos valores de Cianeto total e pH em laboratório por Bacia Hidrográfica	56
Figura 11 - Gráfico <i>box-plot</i> dos valores de Cobre por Bacia Hidrográfica	57
Figura 12 - Gráfico <i>box-plot</i> dos valores de Cromo hexavalente por Bacia Hidrográfica...58	
Figura 13 - Gráfico <i>box-plot</i> dos valores de Estreptococos por Bacia Hidrográfica	59
Figura 14 - Gráfico <i>box-plot</i> dos valores de Selênio por Bacia Hidrográfica.....	59
Figura 15 – Representação da medição dos parâmetros estudados no recorte temporal pesquisado.	61
Figura 16 – Ocorrência de estações considerando a maior faixa de valor observada por bacia hidrográfica para parâmetros sem limites legais.	63
Figura 17 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alcalinidade de bicarbonato	65
Figura 18 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alcalinidade total	66
Figura 19 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cálcio total	67

Figura 20 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Condutividade elétrica	69
Figura 21 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Coliformes totais.....	71
Figura 22 – Mapas de análise espacial das medianas Dureza total	74
Figura 23 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Dureza de Cálcio	75
Figura 24 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Dureza de Magnésio	76
Figura 25 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de DQO	78
Figura 26 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Feoftina a	79
Figura 27 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Magnésio total	81
Figura 28 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrogênio Orgânico .	83
Figura 29 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Potássio Dissolvido ..	84
Figura 30 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sódio Dissolvido.....	86
Figura 31 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sólidos totais	87
Figura 32 - Mapa de distribuição espacial das medianas históricas de Temperatura da água	88
Figura 33 - Ocorrência de estações considerando a maior faixa de valor observada por bacia hidrográfica para parâmetros com limites legais	89
Figura 34 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido ..	91
Figura 35 – Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido (Jequitinhonha)	92
Figura 36 - Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido (São Francisco).....	93
Figura 37 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Arsênio total	95
Figura 38 - Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Arsênio total (São Francisco).....	96
Figura 39 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Chumbo total.....	98
Figura 40 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cianeto livre	99

Figura 41 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cloreto total.....	101
Figura 42 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Ferro dissolvido	102
Figura 43 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Manganês total.....	104
Figura 44 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Níquel total	106
Figura 45 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Zinco total.....	108
Figura 46 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cor verdadeira	109
Figura 47 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Clorofila a	111
Figura 48 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Densidade de Cianobactérias.....	113
Figura 49 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de DBO	114
Figura 50 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Fósforo total	117
Figura 51 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrato.....	118
Figura 52 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrito	120
Figura 53 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrogênio Amoniacal total.....	121
Figura 54 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Indicador Fecal.....	123
Figura 55 – Mapa em detalhe da distribuição espacial das medianas do parâmetro Indicador Fecal (São Francisco).....	124
Figura 56 – Mapa em detalhe da análise estatística espacial das medianas do parâmetro Indicador Fecal (São Francisco)	125
Figura 57 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de OD.....	127
Figura 58 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de pH <i>in loco</i>	128
Figura 59 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de SST	130
Figura 60 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de SDT	131
Figura 61 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Turbidez	133
Figura 62 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sulfato total	134

Figura 63 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sulfeto total	136
Figura 64 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Fenóis totais	138
Figura 65 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Óleos e Graxas	139
Figura 66 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Substâncias tensoativas	141

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Importância ambiental dos parâmetros estudados	20
Quadro 2 - Pesquisas sobre a qualidade da água superficial de Minas Gerais que utilizaram dados de monitoramento efetuado pelo IGAM.	27
Quadro 3 – Resumo das pesquisas realizadas na Universidade Federal de Ouro Preto sobre a qualidade da água superficial de Minas Gerais	31
Quadro 4 - Pesquisas que empregaram a análise exploratória de dados espaciais para determinação de alterações ambientais.	39
Quadro 5 - Características principais das Bacias hidrográficas de rios de domínio da União em território mineiro.	44
Quadro 6 – Parâmetros selecionados para análise na presente pesquisa.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEDE	Análise Exploratória de Dados Espaciais
ANA	Agência Nacional de Águas
BH	Bacia hidrográfica
CH	Circunscrição hidrográfica
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COPAM/CERH	Conselho Estadual de Política Ambiental/Conselho Estadual de Recursos Hídricos de Minas Gerais
DN	Deliberação normativa
IGAM	Instituto Mineiro de Gestão de Águas
KW	Teste de Kruskal-Wallis
ODS 6	Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
Q1	Primeiro quartil
Q2	Segundo quartil
Q3	Terceiro quartil
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	17
2.	OBJETIVOS	19
2.1.	Objetivo Geral	19
2.2.	Objetivos Específicos	19
3.	REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1.	Qualidade da água superficial e poluição	19
3.2.	Qualidade da água superficial em Minas Gerais	23
3.3.	Análise exploratória de dados espaciais e autocorrelação espacial	32
4.	METODOLOGIA	42
4.1.	Revisão bibliográfica	42
4.2.	Área de estudo	42
4.3.	Banco de dados de qualidade das águas superficiais de Minas Gerais	45
4.4.	Pré-processamento dos dados	48
4.5.	Estatística descritiva e testes de hipóteses não paramétricos	48
4.6.	Análise exploratória de dados espaciais e autocorrelação espacial	49
4.7.	Mapas temáticos para representação espacial da qualidade das águas em Minas Gerais	51
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
5.1.	Estatística descritiva e testes de hipóteses não-paramétricos	54
5.2.	Mapas temáticos para representação espacial da qualidade das águas em Minas Gerais	62
5.2.1.	Parâmetros sem limites legais estabelecidos	62
5.2.2.	Parâmetros com limites legais estabelecidos	89
5.3.	Análise integrada	142

6.	CONCLUSÕES	144
7.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	145
	REFERÊNCIAS.....	146

1. INTRODUÇÃO

A água é um bem comum de domínio público e um recurso natural limitado. Seu uso está intrinsecamente ligado à sua qualidade, de modo que um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos - PNRH (Lei 9.433/1997, art. 2º) é assegurar água disponível em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997). A Organização das Nações Unidas – ONU, por sua vez, instituiu na Agenda 2030 o Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 6 – ODS 6, cujo escopo é “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos” (ONU, 2022).

Para cumprir o mencionado objetivo da PNRH, o Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA estabeleceu valores limites para vários parâmetros em corpos d’água superficiais por meio da Resolução 357/2005 e alterações (CONAMA, 2005). A Deliberação Normativa conjunta COPAM/CERH 08/2022 é a norma homóloga aplicada a Minas Gerais. A poluição ocorre quando um dos parâmetros de qualidade da água está em desacordo com o uso preconizado. Para a presente pesquisa, considerou-se o conceito proposto por Strokal et al. (2019), em que são consideradas poluentes as substâncias que não ocorrem naturalmente em sistemas aquáticos e as substâncias com concentrações que se desviam de sua faixa ideal.

A qualidade da água é determinada com base em suas características físicas, químicas e biológicas, apuradas pela medição de parâmetros. Estes são influenciados tanto por atributos naturais do local em que se insere o corpo hídrico, quanto por atividades antrópicas que o pressionam. Por conta desta característica, é importante, ao submeter os parâmetros de qualidade da água a análises estatísticas, aplicar ferramentas que considerem a localização geográfica do valor medido do parâmetro como uma das variáveis do cálculo estatístico.

Quando há heterogeneidade e relação espacial num conjunto de dados geolocalizado, é interessante executar uma análise exploratória de dados espaciais, cujos resultados são o ponto de partida para a realização de análises estatísticas mais complexas, como por exemplo, modelagens. A Análise Exploratória de Dados Espaciais – AEDE traz duas informações importantes sobre os dados: sua distribuição espacial e suas relações espaciais (agrupamentos ou comportamento atípico).

Minas Gerais efetua o monitoramento de qualidade de suas águas superficiais desde 1997 no escopo do Projeto Águas de Minas, com a instituição de redes de amostragem básica e dirigida e da medição de parâmetros físicos, químicos e biológicos por todo o território estadual (IGAM, 2022). Considerando a extensão territorial da rede de monitoramento mineira e o período de amostragem do Projeto Águas de Minas, há uma enorme quantidade de dados com os quais é preciso lidar de forma sistemática para obtenção de informações pertinentes à melhoria da gestão de recursos hídricos no estado.

Sabendo-se que muitos estudos relacionados aos cursos de água do estado de Minas Gerais já utilizaram os dados disponibilizados pelo IGAM com abordagens voltadas para bacias hidrográficas específicas (Dantas, 2020; Soares, 2017; Oliveira, 2020; Pinto, 2017), esta pesquisa buscou conhecer a qualidade hídrica no estado de forma global. O estudo permitiu, ainda, perceber a variabilidade espacial da qualidade das águas com um resultado visual da distribuição dos parâmetros por estação de monitoramento e ainda onde há formações de agrupamentos e valores anômalos. Com isso, foi possível comparar a poluição por Bacia hidrográfica de rio de domínio da União e por estação de monitoramento. Esta abordagem diferiu de outros trabalhos, que focam em circunscrições hidrográficas (denominadas, neste trabalho, pela sigla “CH”) específicas.

Além disso, justificou-se a pesquisa pela possibilidade de determinar a magnitude da poluição hídrica através da identificação e análise estatística das faixas de valores dos parâmetros estudados, que não demandam a exclusão de *outliers* e dados não pareados. Ademais, foi conduzida a análise estatística de dados espaciais, que possibilitou a determinação da correlação entre as estações e, conseqüentemente, entre as bacias hidrográficas estudadas.

Este trabalho está inserido no projeto de pesquisa do CNPq intitulado "Análise da qualidade das águas superficiais por meio de métodos de abordagem baseada em dados", e nas atividades do Grupo de Estudos para Tratamento Estatístico de Dados Ambientais – GETEDA (certificado no Diretório de Grupos de Pesquisa do CNPq desde 2010).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar e mapear a poluição das águas superficiais nas bacias hidrográficas (BH) do estado de Minas Gerais.

2.2. Objetivos Específicos

- Quantificar a magnitude dos parâmetros de qualidade das águas por estação de monitoramento e BH;
- Comparar a qualidade das águas superficiais por estação e por BH;
- Determinar padrões espaciais para poluentes e outros parâmetros de interesse através de Análise Estatística de Dados Espaciais – AEDE.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Qualidade da água superficial e poluição

A dinâmica de crescimento econômico gera o constante aumento de fontes de poluição hídrica em número e diversidade. No entanto, os estudos sobre a qualidade da água concentram-se frequentemente em poluentes individuais, deixando assim lacunas no conhecimento, o que conseqüentemente impede a formulação de soluções eficazes. Para isto, se faz necessária a abordagem integrada e multipolvente na modelagem da qualidade da água, incluindo a detecção de *hotspots*, o que auxilia na determinação das prioridades em programas nacionais de monitoramento e, ainda, apoia o cumprimento do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 (Strokal et al., 2019).

O ODS 6 está inserido na chamada Agenda 2030, junto de outros 16 objetivos definidos pelos Estados-membro da Organização das Nações Unidas (ONU) junto da sociedade civil, visando, entre outros, o desenvolvimento sustentável. O enunciado deste objetivo é “Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos”, avaliando disponibilidade, demandas e usos da água para as atividades humanas, além de ações de conservação dos ecossistemas aquáticos, redução de desperdícios e acesso ao abastecimento de água, esgotamento sanitário e tratamento dos esgotos. No Brasil, este objetivo é monitorado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA (ANA, 2022).

Para a medição do cumprimento do mencionado ODS, é necessário aferir, por meio de seus indicadores, o alcance das metas a ele associadas. A meta 6.3, por exemplo, busca melhorar a qualidade da água nos corpos hídricos até 2030, reduzindo a poluição; tem como um dos indicadores, o de n. 6.3.2, que mede a proporção de corpos hídricos com boa qualidade da água (ANA, 2022). Neste sentido, a produção de informação sobre qualidade da água superficial é imprescindível para o alcance do ODS 6.

Segundo a ANA, nitrogênio e fósforo são os parâmetros que apresentam maior desconformidade nos corpos hídricos do mundo, sendo a agricultura e as águas residuárias não-tratadas as duas maiores ameaças à qualidade de água. Em Minas Gerais, foram avaliados dezenas de parâmetros no ano de 2022 (IGAM, 2022), dentre os quais não constam substâncias importantes como pesticidas e/ou seus princípios ativos, mesmo já havendo limites legais para alguns destes na Deliberação Normativa Conjunto COPAM/CERH n. 08/22. Strokhal et al. (2019) destacam novos poluentes com potencial risco ambiental que têm contribuído para o declínio na disponibilidade de água limpa, como pesticidas e fármacos, e apontam que apenas uma variedade limitada de parâmetros de qualidade da água é considerada pelos programas nacionais de monitoramento. O Quadro 1 resume a importância ambiental dos parâmetros alvo desta pesquisa.

Quadro 1 – Importância ambiental dos parâmetros estudados

Parâmetro	Importância ambiental	Parâmetro	Importância ambiental
Alcalinidade de bicarbonato	Auxilia no controle de variação do pH	Feofitina a	Indicador de crescimento de algas e cianobactérias
Alcalinidade total		Ferro dissolvido	-
Alumínio dissolvido	Causa toxicidade aos organismos	Fósforo total	Corresponsável pelo processo de eutrofização
Arsênio total	Causa toxicidade aos organismos	Indicador fecal	Indicador da contaminação de água por fezes
Bário total	Causa toxicidade aos organismos	Magnésio	Compõe o teor de sais solúveis, logo, a condutividade elétrica
Boro total	Causa toxicidade aos organismos	Manganês total	Causam toxicidade aos organismos

Cádmio total	Causa toxicidade aos organismos	Mercúrio total	Causam toxicidade aos organismos
Cálcio total	Compõe o teor de sais solúveis, logo, a condutividade elétrica	Níquel total	Causam toxicidade aos organismos
Chumbo total	Causa toxicidade aos organismos	Nitrato	Corresponsáveis pelo processo de eutrofização. Ainda, o nitrato está associado à doença metahemoglobinemia
Cianeto Livre	Causam toxicidade aos organismos	Nitrito	
Cianeto total		Nitrogênio amoniacal total	
Cloreto total	Compõe o teor de sais solúveis, logo, a condutividade elétrica	Nitrogênio orgânico	
Clorofila a	Indicador de crescimento de algas e cianobactérias	Óleos e graxas	Indicador de aporte de efluentes, já que raramente são encontrados naturalmente na água e dificultam trocas gasosas, influenciado assim nos valores de OD, DBO e DQO.
Cobre dissolvido	Causa toxicidade aos organismos	Oxigênio dissolvido	Essencial para manutenção da vida aquática aeróbia
Cobre total	Causa toxicidade aos organismos	pH em laboratório	Influencia o grau de solubilidade de diversas substâncias, bem como a distribuição de suas formas livre e ionizada, definindo também o potencial de toxicidade de vários elementos
Coliformes totais	Indicador da contaminação de água por fezes	pH <i>in loco</i>	
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	Indica a presença de íons dissolvidos, em especial de origem inorgânica, como íons de ferro e manganês, K ⁺ , CF, Na ⁺ , Ca ⁺² e Mg ⁺²	Potássio dissolvido	Causa toxicidade aos organismos
Cor verdadeira	Indicador da concentração de matéria orgânica presente nas águas naturais e de formação de trihalometanos - THM	Selênio total	Causa toxicidade aos organismos

Cromo hexavalente total	Causa toxicidade aos organismos	Sódio dissolvido	Compõe o teor de sais solúveis, logo, a condutividade elétrica
Cromo total	Causam toxicidade aos organismos	Sólidos dissolvidos totais	Relaciona-se ao parâmetro CE e indica a quantidade de partículas dissolvidas na água
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Indica a presença de matéria orgânica carbonácea e sua biodegradabilidade	Sólidos em suspensão totais	Permite inferir a concentração de partículas suspensas na água, em que se aderem microrganismos, compostos orgânicos e alguns metais
Demanda Química de Oxigênio	Indica a quantidade de matéria orgânica total, ou seja, passível ou não de degradação pela ação bacteriana	Sólidos totais	Permite inferir a concentração de partículas totais na água, em que se aderem microrganismos, compostos orgânicos e alguns metais
Densidade de cianobactérias	Indicador da ocorrência de espécies potencialmente tóxicas, cuja ocorrência está ligada à mortandade de animais e a danos à saúde humana	Substâncias tensoativas	Podem exercer efeitos tóxicos sobre os ecossistemas aquáticos
Dureza de Cálcio	Indica a concentração de cátions multivalentes em solução na água, em especial de Ca^{+2} e magnésio Mg^{+2} , mas também de Al^{+3} , Fe^{+2} , Mn^{+2} e Sr^{+2} . Reflete a natureza geológica da bacia hidrográfica, sendo mais evidente nas regiões de formação calcária.	Sulfato total	Causa toxicidade aos organismos
Dureza de magnésio		Sulfeto	Causa toxicidade aos organismos
Dureza total		Temperatura da água	Interfere nos processos aquáticos químicos e biológicos

Estreptococos fecais	Indicador da contaminação de água por fezes	Turbidez	Permite inferir a concentração de partículas suspensas na água, em que se aderem microrganismos, compostos orgânicos e alguns metais
Fenóis totais	Indicador de aporte de efluente industrial. Causa toxicidade aos organismos	Zinco total	Causa toxicidade aos organismos

Fonte: Adaptado de Libânio (2010); Tavares (2006); CETESB (2016); De Araújo Neto et al. (2014).

3.2. Qualidade da água superficial em Minas Gerais

Minas Gerais efetua o monitoramento de qualidade de suas águas superficiais desde 1997 no escopo do Projeto Águas de Minas, com a instituição de redes de amostragem básica e dirigida e da medição de parâmetros físicos, químicos e biológicos (IGAM, 2022).

As estações que compõem a rede básica foram alocadas em locais considerados estratégicos para avaliar, entre outros, trechos com impactos potenciais e já conhecidos na qualidade das águas (IGAM, 2022). As estações da rede dirigida, por sua vez, têm local de instalação escolhido com base em objetivos específicos, como monitorar tipos especiais de pressão antrópica e subsidiar as propostas de enquadramento das bacias hidrográficas (IGAM, 2010).

A rede básica existe desde o início do Projeto Águas de Minas e teve sua área de abrangência aumentada anualmente. Já a dirigida surgiu em 2010 e, à medida que os objetivos do monitoramento dirigido foram atingidos, o número de estações desta rede diminuiu. A partir de 2015, o estado de Minas Gerais passou a integrar a Rede Nacional de Monitoramento da Qualidade das Águas – RNQA, no âmbito do Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas – PNQA, promovido pela Agência Nacional de Águas – ANA (IGAM, 2022).

Esta rede foi adequada ao longo da execução dos trabalhos do IGAM, adotando-se como referência a experiência desenvolvida pelos países membros da União Europeia. Assim sendo, estabeleceu-se como meta a razão de uma estação de monitoramento por 1.000 km², que é a densidade média adotada nos mencionados países (IGAM, 2010).

As campanhas de amostragem são trimestrais para a maioria das estações, exceto para aquelas instaladas nas calhas do Rios das Velhas, do Rio Doce e do Rio Paraopeba, em que são mensais (IGAM, 2022). Nem todos os parâmetros medidos atualmente e historicamente possuem limites legais.

O relatório de qualidade da água publicado pelo IGAM referente aos dados do ano de 2021 traz, com base no IQA, as bacias hidrográficas nas quais a qualidade da água está mais degradada, sendo elas as bacias dos rios Itaúnas, Itapemirim, Itabapoana e Peruípe. Ainda que houvesse o entendimento de que a BH do Rio Jequitinhonha apresentava uma das melhores condições de qualidade da água, ressaltou-se neste relatório que o maior registro de IQA Muito Ruim ocorreu nesta bacia, com 1,1% de ocorrência. O relatório também destaca os seguintes parâmetros como responsáveis pelos altos índices da contaminação por tóxicos: nitrogênio amoniacal total, arsênio total, chumbo total, cádmio total, nitrito, cianeto total e fenóis totais (IGAM, 2021).

As atividades do Grupo de Estudos para Tratamento Estatístico de Dados Ambientais – GETEDA, que faz parte do Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, são focadas em estudar a qualidade das águas no estado de Minas Gerais.

Neste grupo, foram realizadas ao todo 20 dissertações de mestrado abordando dados de qualidade das águas das Bacias hidrográficas de rios de domínio da União do Rio São Francisco, do Rio Piracicaba, do Rio Paraíba do Sul, do Rio Doce; e estaduais, do Rio Paraopeba, do Rio das Velhas, do Rio Verde e do Rio Paracatu. Estes dados foram analisados sob diferentes abordagens estatísticas convencionais, com predominância do emprego de metodologias do tipo não-paramétricas e multivariadas. No entanto, não foi detectada a aplicação de metodologias de estatística espacial – ou seja, o conjunto de metodologias em que a localização geográfica é uma variável considerada no cálculo estatístico – para análise de qualidade da água superficial.

Um resultado importante obtido nestas pesquisas, considerando a condição do banco de dados disponibilizado pelo IGAM no âmbito do Projeto Águas de Minas, é que a aplicação da análise multivariada se torna limitada, uma vez que seus resultados são fortemente influenciados pela quantidade de dados faltantes na amostra, exigindo a seleção de parâmetros com a menor quantidade possível de dados faltantes (Almeida, 2013; Barbosa, 2015; Calazans, 2015; Lima, 2016; Gonçalves, 2016).

Trindade (2013), ao estudar a qualidade da água na BH do Rio São Francisco, ressaltou a dificuldade em associar os resultados de poluição encontrados com as possíveis fontes de degradação com aplicação das técnicas estatísticas convencionais, como Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise Fatorial (AF), e atribui isto à falta de espacialização da informação. A autora conclui ainda que os parâmetros com grande contribuição para a degradação ambiental na BH do Rio São Francisco são coliformes termotolerantes, cor verdadeira, fósforo total, manganês total, sólidos em suspensão totais e turbidez.

Almeida (2013), ao estudar a BH do Rio das Velhas, hierarquizou os parâmetros de qualidade da água por porcentagem de violação dos limites legais em ordem decrescente, obtendo como aquele mais impactante os coliformes termotolerantes, seguido por arsênio total, fósforo total, turbidez, oxigênio dissolvido e, por fim, clorofila a.

Barbosa (2015) identificou 8 parâmetros como os principais degradadores da BH do Rio Paracatu, sendo eles: chumbo total, coliformes termotolerantes, cor verdadeira, ferro dissolvido, fósforo total, manganês total, sólidos suspensos totais e turbidez.

Calazans (2015), ao estudar a rede de monitoramento de qualidade da água superficial nas bacias do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba, encontrou como parâmetros responsáveis pela maior parte da degradação da BH do Rio das Velhas: coliformes termotolerantes, manganês total, arsênio total e fósforo total. Notam-se resultados diferentes dos encontrados por Almeida (2013) para a mesma bacia. Já na BH do Rio Paraopeba, a autora identifica como os parâmetros mais degradadores: coliformes termotolerantes, manganês total e fósforo total.

Lima (2016), ao estudar a BH do Rio Doce em sua porção dentro do território de Minas Gerais, concluiu que os parâmetros coliformes termotolerantes, ferro dissolvido, manganês total, cor verdadeira, sólidos em suspensão totais, turbidez, alumínio dissolvido e o fósforo total são os mais negativamente impactantes para a qualidade da água superficial na bacia.

Gonçalves (2016), ao estudar a BH do Rio Paraíba do Sul, concluiu que os parâmetros coliformes termotolerantes, fósforo total, ferro dissolvido, manganês total, oxigênio dissolvido, DBO e turbidez são os que mais acuradamente representam a degradação da qualidade das águas na bacia, já que têm concentrações acima dos padrões de qualidade em diversas medições.

Soares (2017), ao estudar a BH do Rio Piracicaba e Paraopeba, identificou que os parâmetros mais impactantes são: indicador biológico (conjunção dos valores de coliformes termotolerantes e *E. coli*), ferro dissolvido e manganês total.

Nota-se a reiterada identificação em diferentes bacias hidrográficas mineiras dos parâmetros **coliformes termotolerantes e fósforo total, seguidos de manganês total e turbidez** como fontes de degradação da qualidade da água.

Diversas pesquisas mencionadas anteriormente foram publicadas em periódicos nacionais e internacionais, conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2 - Pesquisas sobre a qualidade da água superficial de Minas Gerais que utilizaram dados de monitoramento efetuado pelo IGAM.

Referência	Local	Objetivo/contextualização	Análises/ferramentas	Principais resultados/Conclusões
Soares et al. (2020)	Bacias Hidrográficas dos Rios Paraopeba e Piracicaba.	Verificar as regiões mais impactadas nas duas bacias e calcular o risco relativo de a bacia do rio Piracicaba apresentar mais violações que a bacia do rio Paraopeba, com base nos limites legais para os 19 parâmetros analisados. Período de 2000 a 2015	Testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn, teste de Shapiro Wilk, Tabelas de Contingência, Teste do Qui-quadrado, Risco Relativo e Odds Ratio (OR).	O Indicador de contaminação fecal, manganês e ferro dissolvido foram considerados os parâmetros mais relevantes para a caracterização da qualidade da água nas bacias. O Rio do Peixe, em Nova Era, e o Córrego das Pedras, em Betim, foram considerados os corpos hídricos mais impactados nas bacias do rio Piracicaba e do rio Paraopeba, respectivamente. A bacia do rio Paraopeba apresentou maior risco de violação para DBO ₅ , manganês, fósforo total, SST e turbidez, enquanto a bacia do rio Piracicaba apresentou maior risco de violação por contaminação fecal.
Dantas et al. (2020)	Porção mineira da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	Estudar a contaminação fecal (Coliformes termotolerantes e E. Coli) nas 10 circunscrições hidrográficas (CH), nos anos 2000–2018.	Teste de Kruskal-Wallis, seguido de análise de comparações múltiplas, teste de tendência de Mann-Kendall.	Concluiu-se que ainda existe uma situação precária de saneamento básico nas 10 circunscrições hidrográficas analisadas. As CH mais impactadas foram a SF5 (Velhas) e a SF3 (Paraopeba), seguidas pela SF2 (Pará), com concentrações medianas acima de 20.000 UFC/100 mL. Essas CH são também as mais densamente povoadas. Por outro lado, a CH menos impactada em termos de contaminação fecal foi SF9 (Rios Pandeiros e Calindó).
Pinto et al. (2019)	Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas	Estudar a qualidade das águas superficiais em 65 estações de monitoramento, 16 parâmetros, durante 11 anos (2008 a 2013).	Análise multivariada de Cluster, teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Comparações Múltiplas, análise de violação aos padrões.	Os resultados mostram que os cursos de água localizado na região do Alto Rio das Velhas são mais afetados pelo lançamento de efluentes industriais e esgoto doméstico, sendo a região do Baixo mais afetada pela poluição difusa e pela erosão.

Oliveira et al. (2019)	Bacia Hidrográfica do Rio Pará.	Avaliar e comparar a qualidade das águas superficiais de 10 sub-bacias da Bacia do rio Pará, além de verificar o impacto da sazonalidade e o atendimento aos limites da legislação estadual vigente para 18 parâmetros, de 2008 a 2016.	Testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn, teste de Mann-Whitney.	Identificou-se que todas as sub-bacias se mostraram fora do enquadramento de suas classes para, pelo menos, um dos parâmetros avaliados. Por fim, a análise da sazonalidade apontou diferenças significativas nos parâmetros OD, turbidez, sólidos em suspensão totais, sólidos totais e temperatura da água onde foi demonstrado que houve uma piora da qualidade da água no período chuvoso para a maioria das sub-bacias.
Calazans et al. (2018)	Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.	Avaliar e propor adequações na rede de monitoramento da qualidade da água de águas doces superficiais na bacia do rio Paraopeba. Analisados 19 parâmetros e 30 estações de monitoramento no período de 5 anos (2008–2013).	Análises multivariadas de Cluster e de Componentes Principais, teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido do teste de Dunn, percentual de violação.	Os parâmetros mais relevantes em termos de violação aos padrões foram os coliformes termotolerantes, manganês e fósforo total, provenientes da descarga de esgoto doméstico e de atividades de mineração e poluição difusa da agricultura, além de áreas de pastagem, identificadas como as principais fontes de poluição responsáveis pela deterioração da qualidade das águas superficiais nesta bacia. A estação de monitoramento BP073 apresentou a pior qualidade da água na bacia do rio Paraopeba e as estações BP094 e BP092 mostraram resultados semelhantes, sugerindo que apenas uma delas fosse mantida na rede de monitoramento.
Costa et al. (2017)	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	Analisar o percentual de violações aos padrões legais de 26 parâmetros, no período de monitoramento de 14 anos.	Teste de Kruskal-Wallis/ teste de Dunn, teste de Mann-Kendall e correlação de Spearman.	Os coliformes termotolerantes e o fósforo total (ambos relacionados com o descarte de esgotos sem tratamento ou com tratamento insuficiente), cor, turbidez, manganês, sólidos suspensos totais, ferro e arsênio (erosão, atividades de mineração e demais processos de causas naturais e antropogênicas) apresentaram as maiores violações.
Oliveira et al. (2017)	Perímetros irrigados de Gorutuba/Lagoa Grande e Jaíba no Médio São Francisco.	Investigar o impacto da irrigação na qualidade das águas superficiais da região, utilizando dados de 9 estações de monitoramento da região, que representavam diferentes usos e ocupação do solo.	Análise multivariada de Cluster, teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido de Dunn, e teste de estacionariedade de Spearman.	As estações localizadas ao longo do Rio São Francisco não apresentaram diferenças significativas entre si, ainda que o uso e ocupação do solo fossem diferentes, provavelmente pela maior capacidade de autodepuração do Rio São Francisco, em relação aos demais cursos d'água. Concluiu-se que a maioria das estações localizadas cursos d'água do projeto Jaíba apresentou uma tendência de elevação dos parâmetros ao longo do tempo.

Pinto et al. (2017)	Bacia Hidrográfica do Rio Verde	Calcular tendências temporais das cargas e concentrações de 11 parâmetros físicos, químicos e biológicos, em nove estações de monitoramento de qualidade da água superficial, no período de 2008 a 2014.	Teste de correlação de Spearman, teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn, testes de tendência de Mann-Kendall e Sazonal Mann-Kendall.	Os resultados indicaram diferenças entre a distribuição espacial da carga e da concentração para a maioria dos parâmetros avaliados no estudo, mostrando a necessidade de análise conjunta de dados de concentração e vazão para uma avaliação mais abrangente e fidedigna da qualidade da água. A análise de dados de carga dos poluentes, sem o estudo do comportamento da vazão e da concentração não fornece resultados conclusivos, visto que não permite avaliar a influência desses componentes nas alterações da carga.
Trindade et al. (2017)	Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas	Avaliar as tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais de 11 variáveis de 29 estações de monitoramento da sub-bacia do Rio das Velhas.	Análise de Cluster, testes não paramétricos de Kruskal-Wallis, seguido pelo teste de Dunn, e testes de tendência de Mann-Kendall e Sazonal de Mann-Kendall.	A maioria dos cursos d'água da região apresentaram valores estáveis das variáveis ao longo do período estudado, com maiores alterações associadas a coliformes termotolerantes, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), nitrato e Índice de Qualidade das Águas (IQA), principalmente nas proximidades dos grandes centros urbanos. Uma importante constatação foi a alteração da qualidade da água no trecho Baixo Rio das Velhas, apontada pela tendência de redução do IQA em estações localizadas nessa região.

Ainda, outros pesquisadores vêm investigando os dados de qualidade da água superficial coletados pelo IGAM, como Viorino et al. (2022), Rocha et al (2021) e De Fátima Silva e Da Fonseca (2021), com destaque para os trabalhos da Universidade Federal de Ouro Preto que trabalha sistematicamente sobre estes dados com foco em bacias e sub-bacias hidrográficas e parâmetros específicos, sem, no entanto, aplicação de técnicas estatísticas para tratamento dos dados. Um resumo dos trabalhos disponíveis nos *sites* da instituição é apresentado no Quadro 3 **Erro! Autoreferência de indicador não válida.**

Quadro 3 – Resumo das pesquisas realizadas na Universidade Federal de Ouro Preto sobre a qualidade da água superficial de Minas Gerais

Referência	Local	Objetivo/contextualização	Análises/ferramentas	Principais resultados/Conclusões
Silva, 2020	Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, sub-bacia do rio Itabirito	Utilizar o QUAL-UFMG para simular a qualidade da água em período seco e chuvoso e como subsídio quantificar o balanço de carga orgânica na bacia hidrográfica do rio Itabirito, nos trechos a montante e a jusante da Estação de Tratamento de Esgoto do município de Itabirito.	Índice de Qualidade da Água – IQA; modelagem de qualidade da água com uso da ferramenta QUAL-UFMG.	Identificou pelo cálculo do IQA com base nos dados do IGAM de 1998 a 2018 reiteradamente qualidade da água da bacia classificada como ruim. As variáveis que mais impactam na degradação da qualidade da água amostradas na Bacia do Rio Itabirito, sub-bacia do Rio das Velhas, são E.coli e turbidez . Historicamente a depleção da qualidade da água por essas variáveis foram observadas no bando de dados do IGAM desde 1998 até 2018 tanto na estação seca quanto na chuvosa.
Silva, 2018	Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, sub-bacia do rio Araguari.	Relacionar a sazonalidade das chuvas com o índice de qualidade da água em três bacias hidrográficas que possuem diferenças em relação às suas atividades econômicas e que estão localizadas na bacia do Rio Araguari.	Índice de Qualidade da Água – IQA; Correlação de Pearson.	Correlação positiva alta dos parâmetros turbidez, sólidos totais, temperatura e fosfato total com precipitação e correlação negativa também alta ente precipitação e os parâmetros nitrato, OD e DBO.
Drumond, 2016	Bacia Hidrográfica do Rio Doce, sub-bacia do rio Xopotó	Avaliar a qualidade da água, sedimentos e condições microbiológicas da bacia hidrográfica do Rio Xopotó.	Índice de Qualidade da Água – IQA; identificação molecular dos tipos diarreiofênicos de <i>E. coli</i> .	Os parâmetros E. coli, turbidez e fósforo , foram os mais influenciadores nos trimestres com IQA's ruins. No monitoramento próprio, a autora observou que a bacia hidrográfica apresentou diversificados genótipos de <i>E. coli</i> diarreiofênica, com predominância de patótipos diarreiofênicos na estação chuvosa. Em relação aos elementos traços e maiores, as águas superficiais da bacia hidrográfica do Rio Xopotó apresentaram concentrações de Fe e Al acima do estabelecido na CONAMA 357/05 para águas classe 2. Em sedimentos, houve concentrações acima dos limites estabelecidos na CONAMA 454/12 para o nível 2, de Cr, As e Pb na estação seca.

3.3. Análise exploratória de dados espaciais e autocorrelação espacial

Dados ambientais têm como características estarem associados a um local geográfico que pode afetar direta ou indiretamente seus valores. Para auxiliar na análise destes dados, considerando a posição geográfica como uma variável, existem os métodos de estatística espacial cujo conjunto é chamado de análise exploratória de dados espaciais – AEDE.

A AEDE é etapa prévia obrigatória para a construção de modelos inferenciais e permite, sobretudo, visualizar padrões de dependência espacial sob forma de mapas (Monteiro, 2004). Ela é composta por uma série de metodologias usadas para medir aglomeração espacial global e local, anomalias espaciais e revelar mecanismos de interação espacial. Dentre estas análises, estão as de autocorrelação espacial global e local (Zhao et al., 2021).

A autocorrelação espacial traduz o fato de que os dados influenciados por seu local de ocorrência, quando próximos uns dos outros no espaço, têm maior probabilidade de serem semelhantes do que dados distantes uns dos outros. Ou seja, devido à autocorrelação, os dados associados a um local geográfico não são independentemente aleatórios. Esta autocorrelação pode existir nas escalas global e local (O'Sullivan; Unwin, 2010).

O indicador global de autocorrelação analisa estatisticamente o conjunto de todos os elementos em estudo, isto é, analisa associações de uma variável geolocalizada com todas as demais dentro do limite da área de estudo, retornando um valor único (Fisher e Getis, 2010). Já o indicador local de associação espacial (LISA, na sigla em inglês) é uma estatística criada por Anselin (1995), que visa decompor estatísticas globais em seus componentes locais com a finalidade de identificar *clusters* e *outliers*, retornando um valor para cada variável do conjunto (Fisher e Getis, 2010). O índice chamado I de Moran é a principal metodologia de autocorrelação espacial empregada tanto na modalidade global, quanto na local (Fisher e Getis, 2010).

A metodologia de cálculo do I de Moran global assemelha-se à do coeficiente de correlação do momento do produto de Pearson. A diferença principal é que o espaço é incluído na análise do I de Moran; em vez de encontrar a correlação entre duas variáveis, o objetivo desta é encontrar a correlação de uma variável consigo mesma em relação a uma matriz de pesos espaciais, a partir da análise da diferença entre cada observação e a média de todas as observações. O I de Moran é, então, um teste de aleatoriedade espacial, de modo que a rejeição da hipótese nula implica na existência de autocorrelação espacial (Fisher e Getis, 2010).

A estatística I de Moran Global pode ser definida pela equação 1 (Câmara et al., 2002):

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (z_i - \bar{z})(z_j - \bar{z})}{\sum_{j=1}^n (z_j - \bar{z})^2} \quad (1)$$

Em que,

z é o número de áreas ou número de pontos de dados;

z_i é a variável aleatória contínua ou valor do atributo considerado na área i ;

\bar{z} é o valor médio do atributo na região de estudo;

w_{ij} é o elemento ij da matriz de vizinhança normalizada, ou seja, são os elementos da matriz w dos pesos espaciais que representam a relação geográfica entre todos os pares de pontos.

A probabilidade de ocorrência de diferentes regimes de associação espacial é grande quando se analisa um elevado número de áreas, sendo necessário examinar padrões em maior detalhe. Os indicadores locais produzem um valor específico para cada área, permitindo assim a identificação de agrupamentos. O Índice de Moran Local identifica a relação existente entre um determinado ponto e a sua vizinhança, a partir de uma distância predefinida, por intermédio da covariância existente entre eles, permitindo o exame da homogeneidade/diversidade dos dados (Anselin, 1995).

O índice local de Moran pode ser expresso para cada área i a partir dos valores normalizados z_i do atributo como apresentado na equação 2 (Câmara et al., 2002):

$$I_i = \frac{z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} z_j}{\sum_{j=1}^n z_j^2} \quad (2)$$

Em que,

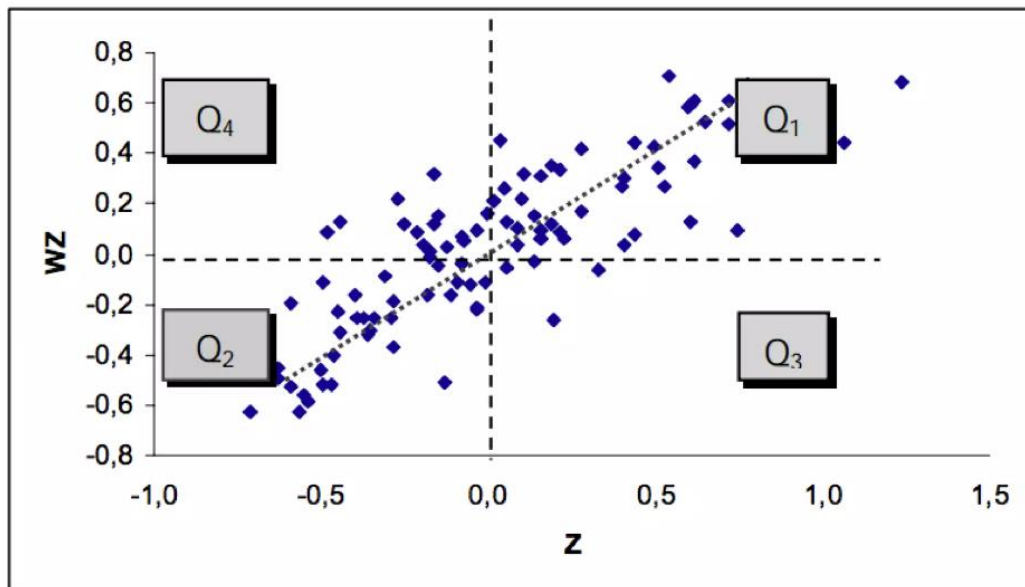
$$z_i = \frac{(z_i - \bar{z})}{s}$$

é a variável normalizada.

Da equação de I_i percebe-se que resultados positivos são obtidos onde ocorrem concentrações de valores baixos ou de valores altos do atributo, enquanto resultados negativos decorrem da proximidade entre valores baixos e altos na mesma área. Assim, o Índice de Moran Local dá uma indicação da homogeneidade e da diversidade dos dados.

Uma forma de visualizar a dependência espacial é apresentada na Figura 1, que ilustra o diagrama de espalhamento de Moran, do inglês Moran Scatterplot. Este gráfico bidimensional de z compara os valores padronizados do atributo numa determinada área com a média wz dos seus vizinhos (Luzardo et al., 2017).

Figura 1 - Diagrama de espalhamento de Moran.



Fonte: Luzardo et al. (2017)

Como pode ser observado, o diagrama é dividido em quatro quadrantes.

No quadrante superior direito (Q1) o valor do atributo de cada polígono e o valor médio do atributo nos polígonos vizinhos são maiores que a média global (ambos representados por alto), indicando associação espacial positiva ($I > 0$): cluster alto-alto.

No quadrante inferior esquerdo (Q2) o valor do atributo de cada polígono e o valor médio do atributo nos polígonos vizinhos são menores que a média global (ambos representados por baixo), também indicando associação espacial positiva ($I > 0$): cluster baixo-baixo.

No quadrante inferior direito (Q3) o valor do atributo de cada polígono está acima da média global (representado por alto), enquanto o valor médio do atributo em polígonos vizinhos está abaixo daquela média (representado por baixo), indicando pontos de associação espacial negativa ($I < 0$): outlier alto-baixo.

No quadrante superior esquerdo (Q4) o valor do atributo de cada polígono está abaixo da média global (representado por baixo), enquanto o valor médio do atributo em polígonos vizinhos está acima daquela média (representado por alto), também indicando pontos de associação espacial negativa ($I < 0$): outlier baixo-alto.

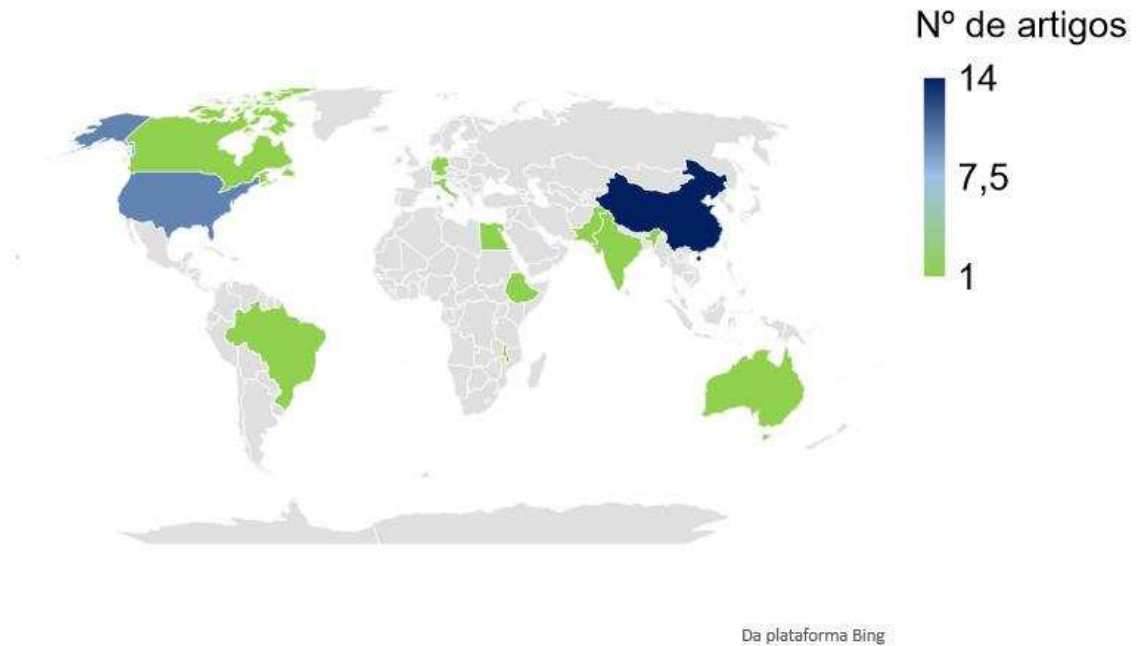
O resultado do I de Moran local é interpretado com base no valor esperado, que é o valor obtido caso a distribuição geográfica dos valores do atributo específico fosse resultado de uma completa aleatoriedade. Valores positivos do I de Moran local observados significativamente maiores que o valor esperado indicam agrupamento (*cluster*) potencial e autocorrelação espacial positiva. Valores negativos observados significativamente menores que o valor esperado indicam a presença potencial de valores anômalos (*outliers*) e autocorrelação espacial negativa. Valores próximos do esperado não indicam nenhuma autocorrelação (Grekousis, 2020).

O conhecimento obtido a partir das análises espaciais de dados e das análises estatísticas espaciais é necessário para execução de modelagem de dados cuja localização é relevante para a análise (O'Sullivan; Unwin, 2010). Os autores Jiang et al. (2020), em artigo de revisão sobre métodos para o desenho de uma rede de monitoramento de qualidade da água, indicam o I de Moran local como método geoestatístico de autocorrelação tipicamente proposto para o desenho das redes e de reconhecida importância para projeção de uma rede apropriada.

Segundo Beveridge et al. (2012), o I de Moran local como método geoestatístico de autocorrelação permite a determinação de estações importantes e estações redundantes, de modo que é possível, inclusive, remover estações sem perda significativa de informações, enfatizando a importância de considerar a informação fornecida por uma estação individual junto das informações de grupos de estações dentro de uma rede.

A partir de levantamento de fontes bibliográficas (metodologia apresentada no item 4.1), identificou-se que os dois maiores produtores de artigos com aplicação do I de Moran à temática de qualidade da água foram China e Estados Unidos. Ainda, países do hemisfério norte dominaram o número de trabalhos na área, sendo encontrado apenas um artigo no Brasil e dois em países africanos (Figura 2).

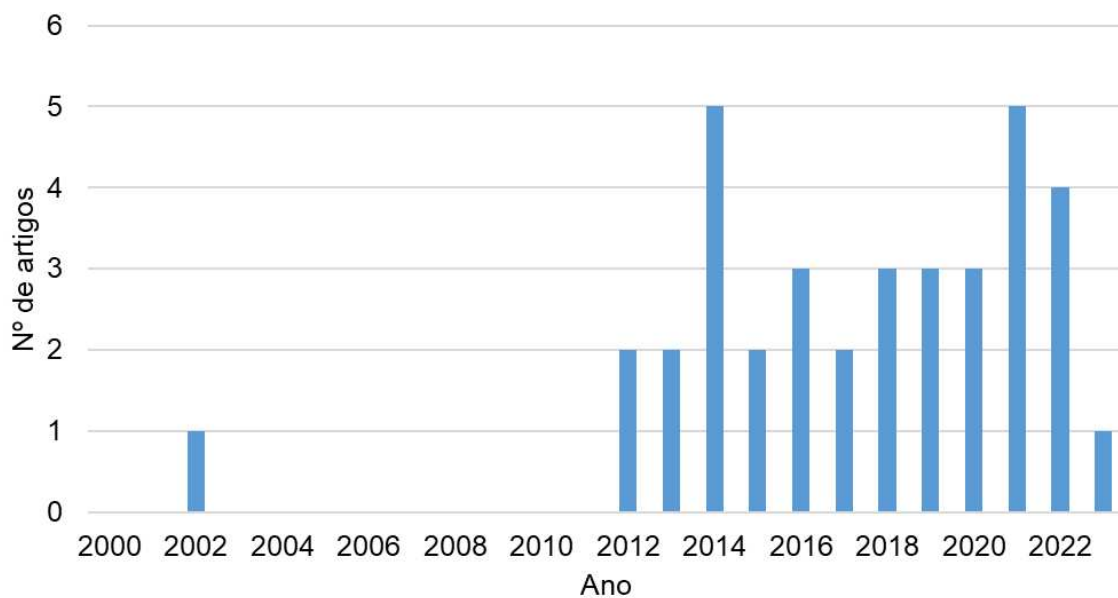
Figura 2 – Distribuição espacial dos artigos que compõem a revisão bibliográfica



Fonte: de autoria própria.

Pelos dados apresentados na Figura 3, verifica-se que a aplicação de análise estatística espacial para qualidade da água é um método recente.

Figura 3 – Distribuição anual dos artigos que compõem a revisão bibliográfica.

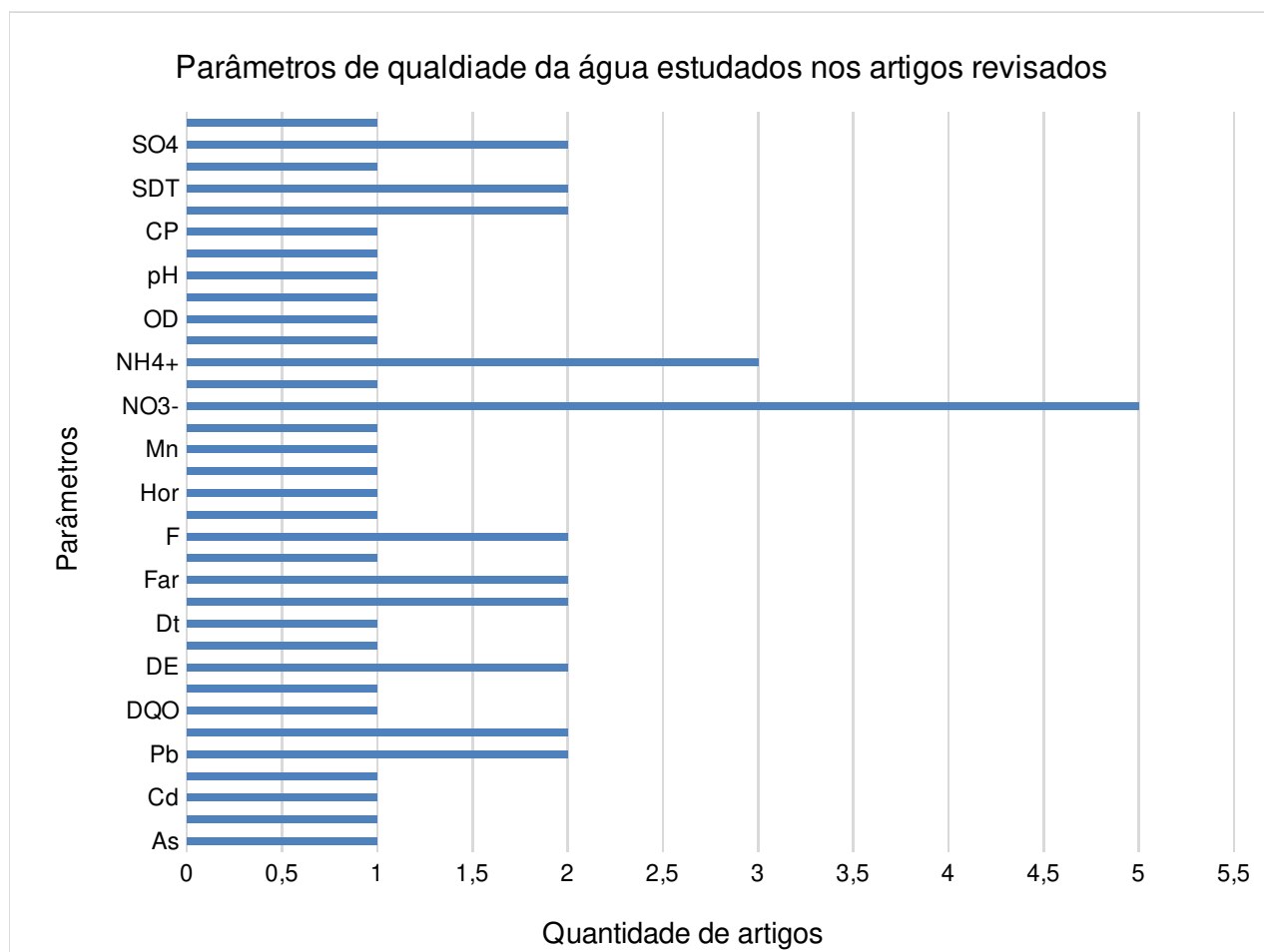


Fonte: de autoria própria.

Os *softwares* e métodos espaciais mais aplicados pelos pesquisadores foram o ArcGIS e o I de Moran, o que indica a consolidação do uso destes. Destaca-se, ainda, a utilização de técnicas de interpolação como krigagem e densidade de Kernel, o que abre uma possibilidade de ampliação de estudos.

Foram estudados diversos parâmetros com a aplicação da estatística espacial por meio do cálculo do I de Moran, com destaque para a série nitrogenada. A Figura 4 ilustra os parâmetros pesquisados nos artigos consultados.

Figura 4 - Apresentação dos diferentes parâmetros físicos, químicos e biológicos identificados nos artigos de revisão bibliográfica



Fonte: autoria própria

Legenda: As = Arsênio; Bic = Bicarbonato; Cd = Cádmio; Ca = Cálcio; Pb = Chumbo; Cl = Cloreto; DQO = Demanda Química de Oxigênio; Coli = Coliformes (totais e termotolerantes); DE = Desreguladores endócrinos; CE = Condutividade elétrica; Dt = Dureza total; E. coli = Escherichia coli; Far = Fármacos; Fe = Ferro; F = Flúor; Pb = Fósforo; Hor = Hormônios; Mg = Magnésio; Mn = Manganês; Hg = Mercúrio; NO³⁻ = Nitrato; NO²⁻ = Nitrito; NH⁴⁺ = Nitrogênio amoniacal; N = Nitrogênio Orgânico; OD = Oxigênio Dissolvido; PO₄³⁻ = Ortofosfato; K = Potássio; C = Produtos de cuidado pessoal; Na = Sódio; SDT = Sólidos dissolvidos totais; SST = Sólidos suspensos totais; SO₄ = Sulfato; Zn = Zinco.

O Quadro 4 apresenta algumas pesquisas que empregaram a análise exploratória de dados espaciais para determinação de alterações ambientais.

Quadro 4 - Pesquisas que empregaram a análise exploratória de dados espaciais para determinação de alterações ambientais.

Referência	Local	Objetivo/contextualização	Análises/ferramentas	Principais resultados/Conclusões
Luo et al. (2022)	Bacia do Rio Ulan Mulun, China.	Avaliar a qualidade do ambiente ecológico da Bacia durante o período de 2000 a 2020.	Imagens de satélite; Índices Global e Local de Moran; Modelo de Markov; mapa de distribuição do índice ecológico de sensoriamento remoto (RSEI).	Os resultados demonstraram que a distribuição espacial da qualidade do ambiente ecológico da Bacia do Rio Ulan Mulun foi positivamente correlacionada e o grau de agrupamento diminuiu gradualmente. O I de Moran Local mostrou que high-high (H-H) estava distribuído principalmente nas regiões leste e sul da bacia, onde a densidade populacional era baixa e a vegetação estava em bom estado. Low-low (L-L) foi distribuído principalmente nas regiões centrais e ocidentais da bacia, onde a densidade populacional era alta e as empresas industriais e minerárias estavam concentradas.
Xiong et al. (2021)	Bacia do Lago Erhai, Província de Yunnan, China	Efetuar uma avaliação espaço-temporal das mudanças na qualidade do ambiente ecológico da Bacia no período de 1999 a 2019.	Imagens de satélite Landsat; Índices Global de Moran; Modelo de Markov; Índice ecológico de sensoriamento remoto (RSEI).	O valor I de Moran Global variou de 0,662 a 0,783 em 1999–2019, o que indicou que a distribuição da qualidade do ambiente ecológico foi positivamente correlacionada. O mapa de cluster do indicador local de associação espacial do RSEI mostra que os pontos altos estavam localizados principalmente nas regiões de altitude oeste e sul da área de estudo, e os pontos baixos-baixos foram distribuídos principalmente na área à beira do lago, onde as populações eram densas e as atividades humanas eram frequentes.
Shukla and Lalitha (2021)	Quatro rios da Índia: Ganga, Beas, Satluj e Yamuna.	Dois algoritmos diferentes de detecção de outliers espaciais baseado em uma abordagem espacial é aplicado a dados de qualidade da água (contendo informações sobre as redes fluviais e múltiplos atributos em diferentes níveis de poluição).	Métodos ponderados geograficamente (métodos GW); Índice de Moran. Aplicados a 101 estações de monitoramento, em 16 variáveis: OD, pH, DBO, Temperatura, Condutividade, NO ₃ , NO ₂ , coliformes termotolerantes e Totais.	Os dois métodos geograficamente ponderados aplicados ao conjunto de dados de qualidade de água detectaram valores discrepantes espacialmente para diferentes larguras de banda. Para todas as larguras de banda ambos os algoritmos detectam o local de monitoramento de água BEAS U/S MANALI localizado em Himachal Pradesh como o valor mais atípico. Manali é um dos principais destinos turísticos na Índia e, por sua vez, é afetado pela forte poluição da água. Uma vez que os dados sobre a qualidade da água dependem da área geográfica e, portanto, da geolocalização, a detecção de outliers ajudam a detectar uma instabilidade local em uma área e, portanto, a aplicação de métodos geograficamente ponderados para tais dados é bastante apropriada para a detecção de locais de monitoramento de água onde a atenção e o envolvimento do governo são fortemente exigido.
Mailani, Chang and Chun (2019)	Artigo de revisão.	Revisar diferentes modelos de regressão relacionados à qualidade da água que incorporam aspectos espaciais em seus modelos.	Spatial lag and error, spatial eigenvector-based, geographically weighted regression, and spatial-stream-network-based	Abordagens de modelagem de regressão focadas na qualidade da água estão mudando de relações espaciais baseadas em distância em linha reta para relações a jusante. O cálculo da autocorrelação espacial e da autocorrelação espacial residual se mostrou dependente do tipo de regressão espacial utilizada. A matriz de pesos é normalmente usada conforme disponível no software utilizado e a maioria dos estudos não tentou modificá-lo. Diferentes processos de escala, como certa distância de rios <i>versus</i> consideração de bacias hidrográficas inteiras são tratados

			models; Moran's Index.	separadamente na maioria dos estudos. Geralmente, a capacidade das variáveis preditoras de prever a variável de resposta melhora significativamente quando regressões são usadas. Foram identificadas novas direções de pesquisa em termos de considerações espaciais, construção de matriz de pesos, inclusão de processos de multiescala e identificação de novas variáveis preditoras.
Mainali & Chang (2018)	Bacia Hidrográfica do Rio Han da Coreia do Sul.	Analisar as tendências sazonais de N total, P total, DQO e SST na Bacia e explorar os efeitos de fatores antropogênicos (cobertura da terra e população) e naturais (topografia e solo) na qualidade da água.	Teste de Mann-Kendall e I de Moran na detecção de autocorrelação.	A qualidade da água da Bacia melhorou a partir do início da década de 1990 a 2016, com diminuição das concentrações de nutrientes no verão e de SS no inverno. A tendência da qualidade da água foi auto correlacionada espacialmente com variações espaciais distintas dentro da bacia, mas algumas estações próximas da área metropolitana de Seul, no entanto, ainda apresentavam água de má qualidade. Aproximadamente 20 a 70 % da variação espacial de diferentes tendências de qualidade da água foram explicados por alguma combinação da atual cobertura agrícola, cobertura florestal, % área coberta por água, alterações na cobertura do solo e variações de declive.
Ali et al. (2017)	Dubai Creek, um lago costeiro em Dubai.	investigar a relação de clorofila-a com diferentes nutrientes lago de Dubai, a partir das imagens do Dubai Sat-1. Modelos espectrais de clorofila-a foram desenvolvidos a partir das adquiridas em 2010 e 2011.	Análise de regressão de mínimos quadrados e I de Moran na detecção de autocorrelação, usando ArcGIS.	Os modelos apresentaram alta correlação (valores de R-quadrado de 87,7% e 89,1%, respectivamente) com dados de qualidade da água coletados nas estações de monitoramento operadas pelo município de Dubai. A análise de Regressão Exploratória (ER) realizada no GIS para estudar a relação entre clorofila-a de base espectral e nutrientes. Embora a análise de Regressão tenha mostrado baixa correlação geral, valores de R-quadrado relativamente altos foram obtidos no emissário da Estação de Tratamento de Esgoto.
Liu et al. (2016)	Bacia Hidrográfica do rio Ying, China.	Estudar amostras de águas superficiais coletadas de 2008 a 2015 em 17 estações da BH. DQO e NH3-N são analisados para caracterizar a qualidade da água do rio.	Análise de cluster e teste sazonal de Kendall para detectar variações sazonais e interanuais e I de Moran para detectar autocorrelação espacial das variáveis.	Os resultados da análise de cluster mostraram 3 grupos de acordo com a similaridade no padrão sazonal de qualidade da água. A tendência análise indicou uma melhoria na qualidade da água durante as estações secas na maior parte das estações. A autocorrelação espacial da qualidade da água mostrou grande diferença entre as estações seca e chuvosa devido à regulação de eclusas e barragens e à falta de pontos locais fonte de poluição. A variação sazonal na qualidade da água está associada aos fatores climáticos (processos hidrológicos e bioquímicos) e regulação de vazões. A análise do uso da terra indica uma boa explicação para a distribuição espacial e a sazonalidade de DQO na escala da sub-bacia.

Fu et al. (2014)	Região subtropical do sudeste da China	Estudar a variação espacial da densidade de carbono de uma floresta subtropical típica do sudeste da China. Um total de 839 amostras foram coletadas em uma área de 12 km × 6 km na província de Zhejiang.	I de Moran, geoestatística e sistema de informação geográfica (GIS).	O índice Global de Moran revelou que a densidade de carbono florestal apresentou autocorrelação espacial positiva significativa e que padrões espaciais claros foram observados usando Moran local I. Foi observado que fatores naturais e antropogênicos desempenharam um papel fundamental na heterogeneidade espacial da densidade carbono florestal. Esses padrões espaciais estavam de acordo com o mapa de agrupamento espacial descrito por I de Moran local, mostrando que Moran I, combinado com geoestatística e GIS, poderia ser usado para estudar padrões espaciais de variáveis ambientais relacionadas ao ecossistema florestal.
Oom & Pereira (2013).	Dados globais do MODIS MOD14 (Terra) e MYD14 (Aqua) Active Fire Product.	identificar e caracterizar incêndios de queima ativa (incêndios florestais, incêndios agrícolas, etc.) e outras anomalias térmicas (por exemplo, vulcões, etc.) no momento da passagem do satélite.	Técnicas de autocorrelação espacial, índices de Moran Global e Local, diagrama de espalhamento de Moran.	Um valor de 0,80 ($p = 0,001$, $\alpha = 0,05$) para I de Moran indicou forte autocorrelação espacial entre incêndios em escala global, com 60% de todas as células exibindo resultados positivos significativos ou correlação espacial negativa. Análise de regressão destacou áreas com uso muito intensivo do fogo associado a práticas de gestão de terras, incêndios muito grandes que se destacam em regiões com ciclo de fogo longo, e substancialmente redução da atividade de fogo em áreas com conservação especial.
Brody et al. (2004)	Bacias hidrográficas de San Antonio – Texas/USA	O artigo explora o grau em que as percepções da qualidade da água estão espacialmente correlacionadas em duas bacias hidrográficas em San Antonio, Texas.	Técnicas de autocorrelação espacial, índices de Moran Global e Local.	Medidas locais de autocorrelação espacial determinam que “pontos críticos” de pontos de vista semelhantes são mais propensos a ocorrerem perto dos riachos, em áreas densamente povoadas, e que os entrevistados nestes grupos acreditam que os cursos de água estão altamente poluídos. Os resultados demonstram que as percepções ambientais são, de fato, espacialmente dependentes em toda a paisagem e que as redes geográficas de ativismo da população contribuem para a formação localizadas respostas semelhantes.

4. METODOLOGIA

4.1. Revisão bibliográfica

Uma das etapas iniciais desta pesquisa foi a realização de revisão bibliográfica sistemática, seguindo a sequência de atividades disposta no fluxograma da Figura 5.

Figura 5 – Metodologia aplicada para a revisão sistemática



Fonte: de autoria própria.

As palavras-chave selecionadas foram: “*water pollution*”; “*watershed*”; e “*spatial statistical analysis*”, todas inseridas entre aspas e em duplas (“*water pollution*” AND “*spatial statistical analysis*”; “*watershed*” AND “*spatial statistical analysis*”). O recorte temporal foi delimitado de 2000 a 2023. Os idiomas considerados foram inglês e português, pelo interesse em trabalhos com abrangência territorial grande, como regiões chinesas, estadunidenses e da União Europeia. Foram selecionadas duas plataformas *online* de pesquisas de artigos em periódicos: *Scopus* e *Science Direct*. Em ambas, utilizou-se restrições de tipo, selecionando-se “artigos”, e de área, selecionando-se “*Environmental Science*”. Os artigos com título e *abstract* de conteúdo distante do tema de análise foram excluídos da revisão.

A síntese quali-quantitativa foi realizada com auxílio do *Excel*; coletaram-se os dados de autores, país, ano, título, método espacial aplicado e ferramentas utilizadas. Na plataforma *Scopus*, a partir do login institucional, a busca feita na aba “*Document Search*” retornou 15 documentos. Na plataforma *Science Direct*, o mesmo processo foi repetido, resultando em 74 artigos. Com a remoção das duplicatas e dos artigos cujo assunto divergia do objeto de pesquisa, foram sistematizados os dados de 36 artigos de onde foram extraídas as informações quali-quantitativas apresentadas no final do item 3.3 do documento em tela.

4.2. Área de estudo

Este estudo abrange as 17 Bacias hidrográficas de rios de domínio da União cujos limites estão inseridos no estado de Minas Gerais, algumas compartilhadas com estados vizinhos, sendo elas: BH do Rio Grande, do Rio Paranaíba, do Rio Doce, do Rio Paraíba do Sul, do

Rio Jequitinhonha, do Rio Mucuri e do Rio São Francisco (IGAM, 2010). Um resumo com as principais características de cada uma destas bacias está apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Características principais das Bacias hidrográficas de rios de domínio da União em território mineiro.

N	Bacia Hidrográfica	Unidades Estratégicas de Gestão (UEGs)	População	Área (km²)	Nº de estações de monitoramento	Densidade de estações (nº estações/1000 km²)
1	Alcobaça ou Itanhém	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1 (agregam BU1, IN1, IU1, JQ1, JQ2, JQ3, JU1, OS1, PA1, PE1, SM1)	20.911	1.515,93	1	0,66
2	Buranhém	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	5.329	329,36	2	6,07
3	Doce	Afluentes do Rio Doce – DO1 (agregam DO1, DO2, DO3, DO4, DO5, DO6, IB1 e IP1)	1.799.146	71.167,75	87	1,22
4	Grande	Afluentes do Rio Grande – GD1 (agregam GD1, GD2, GD3, GD4, GD5, GD6, GD7, GD8 e PJ1)	3.753.196	86.197,76	95	1,10
5	Itabapoana	Afluentes do Rio Doce – DO1	36.678	668,59	2	2,99
6	Itapemirim	Afluentes do Rio Doce – DO1	3.677	33,01	2	60,58
7	Itaúnas	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	2.269	131,58	1	7,60
8	Jequitinhonha	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	756.620	65.718,09	49	0,75
9	Jucuruçu	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	8.508	709,27	2	2,82
10	Mucuri	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	390.001	14.620,34	11	0,75
11	Paraíba do Sul	Afluentes do Rio Paraíba do Sul – OS1 (agregam OS1 e OS2)	982.610	20.724,64	51	2,46
12	Paranaíba	Afluentes do Rio Paranaíba – PN1 (agregam PN1, PN2 e PN3)	679.006	70.618,03	52	0,74
13	Pardo	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	116.717	12.703,73	7	0,55
14	Peruípe	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	1.917	1.158,91	14	12,47
15	Piracicaba/Jaguari	Afluentes do Rio Grande – GD1	53.685	80,21	1	7,77
16	São Francisco	Afluentes do Alto Rio São Francisco – SF1 (agregam SF1, SF2, SF3, SF4 e SF5). Afluentes do Baixo Rio São Francisco – SF2 (agregam SF6, SF7, SF8, SF9 e SF10)	4.017.060	234.681,45	397	1,76
17	São Mateus	Afluentes dos Rios Mucuri, São Mateus, Jequitinhonha e Pardo – JQ1	175.942	5.726,00	2	0,35

Fonte: de autoria própria

4.3. Banco de dados de qualidade das águas superficiais de Minas Gerais

A série histórica de dados de monitoramento da qualidade das águas disponibilizada pelo IGAM, considerando os anos de 2000 a 2021, foi utilizada nesta pesquisa. Foram excluídas as estações de monitoramento com menos de 10% de dados disponíveis, já que estas não seriam suficientemente representativas. Considerou-se, então, 786 estações entre ativas e inativas no período selecionado.

A série histórica do IGAM traz 71 parâmetros, sendo que alguns destes foram removidos do monitoramento e outros acrescentados ao longo dos anos. Destes 71, excluíram-se aqueles com menos de 10% de dados disponíveis, já que também não seriam suficientemente representativos. Ademais, foram excluídos “condição do tempo” e “temperatura do ar”. Ressalta-se que o parâmetro “coliformes termotolerantes”, medido até o ano de 2012, e *Escherichia Coli*, medido a partir de 2013, foram compilados para criação de um único parâmetro, denominado “indicador fecal”.

Com isto, restaram 56 parâmetros submetidos à estatística descritiva como etapa metodológica desta pesquisa (Quadro 6), dos quais 36 têm limite determinado para águas doces na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22, o que corresponde a aproximadamente 63%.

Dentre os 56 parâmetros para os quais a estatística descritiva foi calculada, o Cianeto total, o Cobre total, o Cromo hexavalente, o Estreptococos fecais e o Selênio total, a partir da determinação da mediana por estação de monitoramento, apresentaram quantidade de dados menor que 10%; então, realizou-se reajuste de parâmetros para exploração espacial.

Os parâmetros Boro total, Bário total, Cádmiio total, Mercúrio total e pH em laboratório apresentaram dados qualitativamente insuficientes, pela alta quantidade de dados censurados, pela medição restrita a algumas bacias hidrográfica ou, ainda, por nenhum valor medido ultrapassar qualquer limite legal ao longo de toda a série histórica. Com isto, estes parâmetros também não foram explorados na etapa metodológica de análise espacial. Após estes ajustes, 46 parâmetros foram explorados espacialmente na presente pesquisa.

Outra base de dados utilizada foi o *shape* das estações de monitoramento de qualidade da água do IGAM, obtido no *site* do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (Infraestrutura de Dados Espaciais – IDE – Sisema). Este, no entanto, apresenta menos estações do que este estudo se propôs a analisar. Portanto, foram pesquisadas as coordenadas das estações não georreferenciadas em trabalhos técnicos e bases de dados

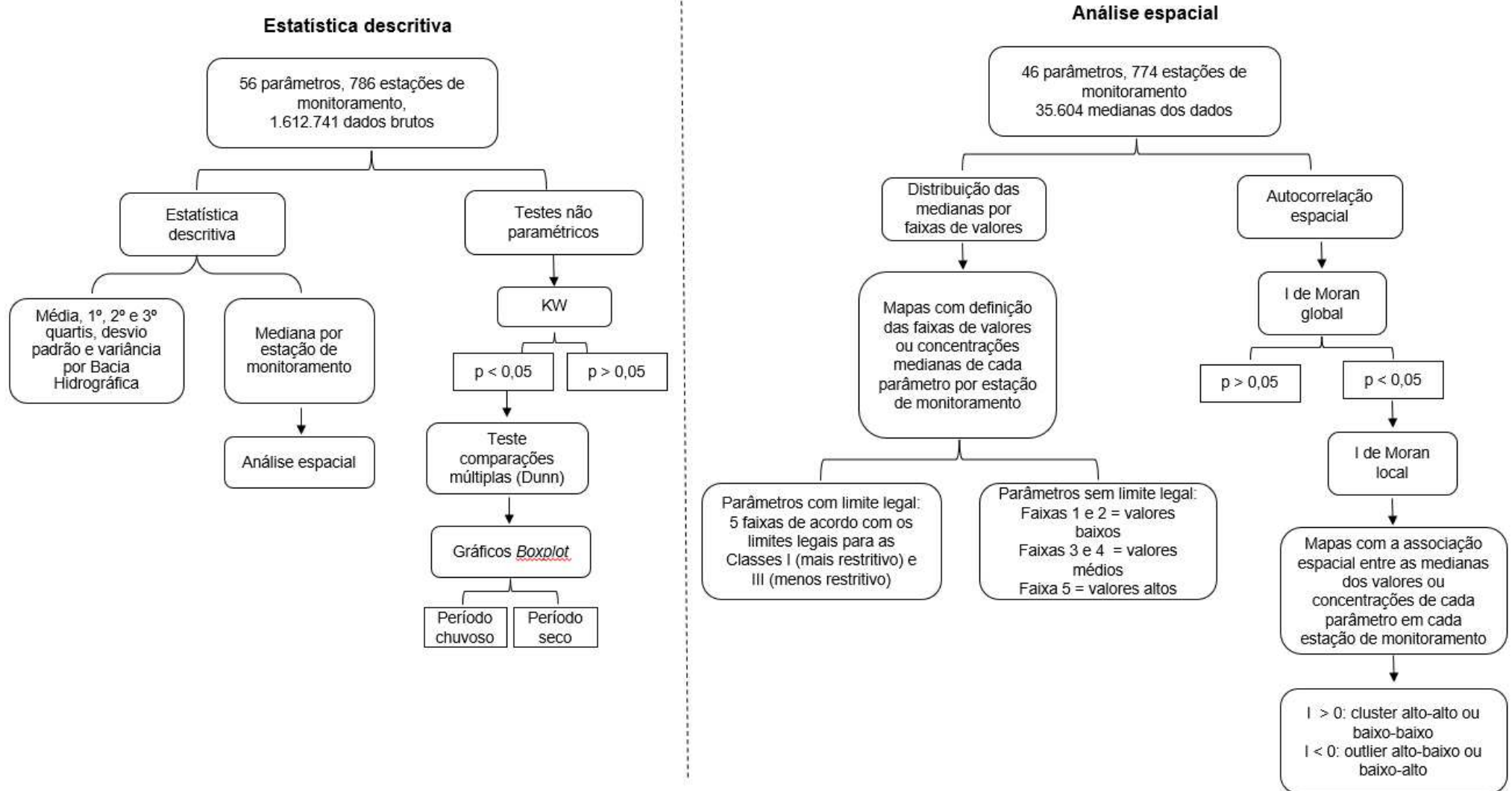
do IGAM, de modo a criar um *shape* completo. Com estas informações, os pontos foram plotados no *software Google Earth Pro* e depois unidos ao *shape* obtido no IDE Sisema. O *shape* resultante, utilizado na análise espacial, incluiu 774 estações. Apresenta-se, na Figura 6, o resumo do processo de tratamento do banco de dados.

Quadro 6 – Parâmetros selecionados para análise na presente pesquisa.

Parâmetro	Notação de referência	Unidade	Parâmetro	Notação de referência	Unidade
Alcalinidade de bicarbonato	Alc Bic	mg/l	Feofitina a	Fe a	µg/L
Alcalinidade total	Alc t	mg/l	Ferro dissolvido*	Fe diss	mg/l
Alumínio dissolvido*	Al diss	mg/l	Fósforo total*	P t	mg/l
Arsênio total*	As t	mg/l	Indicador fecal**	IF	NMP/100 mL
Bário total*	Ba t	mg/l	Magnésio total	Mg	mg/l
Boro total*	B t	mg/l	Manganês total*	Mn t	mg/l
Cádmio total*	Cd t	mg/l	Mercúrio total*	Hg t	mg/l
Cálcio total	Ca t	mg/l	Níquel total*	Ni t	mg/l
Chumbo total*	Pb t	mg/l	Nitrato*	NO ₃ -	mg/l
Cianeto Livre*	CN livre	mg/l	Nitrito*	NO ₂ -	mg/l
Cianeto total	CN t	mg/l	Nitrogênio amoniacal total*	NH ₄ ⁺	mg/l
Cloreto total*	Cl t	mg/l	Nitrogênio orgânico	N	mg/l
Clorofila a*	Cl a	µg/L	Óleos e graxas*	O/G	mg/l
Cobre dissolvido*	Cu diss	mg/l	Oxigênio dissolvido*	OD	mg/l O ₂
Cobre total	Cu t	mg/l	pH em laboratório*	pH lab	-
Condutividade elétrica <i>in loco</i>	CE	µS/cm	pH in loco*	pH	-
Coliformes totais	Coli t	NMP/100 mL	Potássio dissolvido	K diss	mg/l
Cor verdadeira*	Cor	mg.Pt/L	Selênio total*	S t	mg/l
Cromo hexavalente total	Cr6+	mg/l	Sódio dissolvido	Na diss	mg/l
Cromo total*	Cr t	mg/l	Sólidos dissolvidos totais*	SDT	mg/l
Demanda Bioquímica de Oxigênio*	DBO	mg/l O ₂	Sólidos em suspensão totais*	SST	mg/l
Demanda Química de Oxigênio	DQO	mg/l O ₂	Sólidos totais	ST	mg/l
Densidade de cianobactérias*	DC	Cel/mL	Substâncias tensoativas*	MBAS	mg/l
Dureza de cálcio	Dur Ca	mg/l CaCO ₃	Sulfato total*	SO ₄ t	mg/l
Dureza de magnésio	Dur Mg	mg/l CaCO ₃	Sulfeto total*	S t	mg/l
Dureza total	Dur t	mg/l CaCO ₃	Temperatura da água	T	°C
Estreptococos fecais	EF	UFC/100 mL	Turbidez*	Turb	UNT
Fenóis totais*	Fe t	mg/l	Zinco total*	Zn t	mg/l

Legenda: "*" parâmetros com limite legal; "**" indicador criado pela união do parâmetro coliformes termotolerantes com o parâmetro E. coli.

Figura 6 - Fluxogramas dos métodos aplicadas ao banco de dados nas diferentes fases da pesquisa.



Fonte: de autoria própria.

Legenda: as classes são aquelas definidas na Deliberação Normativa ConjuntCOPAM/CERH 08/22; as faixas dos parâmetros sem limite legal foram definidas pelo método de Quebras Naturais.

4.4. Pré-processamento dos dados

Nesta etapa, foi efetuada a exclusão de estações e parâmetros de monitoramento com menos de 10% de dados disponíveis, já que estes não seriam suficientemente representativos da qualidade da água no local de amostragem. Em seguida, realizou-se a padronização de textos (remoção de acentos, pontos, cedilha etc.), a divisão do banco de dados entre períodos seco e chuvoso e, ainda, a criação de uma coluna com valores numéricos para associação com a camada georreferenciada da rede de monitoramento.

Com os dados tratados, foi feita uma análise preliminar para detecção de dados censurados, estes substituídos no banco de dados pelo limite de detecção do teste analítico. Insta esclarecer que se define dado censurado como aquele que representa um resultado não quantificável, como quando as concentrações reais de um parâmetro são muito baixas, próximas de zero, e, portanto, o método analítico não é capaz de retornar o valor real (Von Sperling et al., 2020).

4.5. Estatística descritiva e testes de hipóteses não paramétricos

A estatística descritiva foi calculada por meio do pacote “rcmdr” em linguagem de programação R, considerando média, quartis (primeiro, segundo – mediana – e terceiro), desvio padrão e variância para cada um dos 56 parâmetros selecionados, que foram agrupados por bacia hidrográfica e separados por período climático. Os resultados são apresentados em gráficos do tipo *box-plot*, plotados com auxílio do pacote “ggplot2”, para melhor visualização e entendimento.

O teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis (KW), seguido do teste de comparações múltiplas, ao nível de significância $\alpha = 5\%$, foi utilizado para verificar a existência de diferença estatística significativa entre os dados de cada parâmetro, por bacia hidrográfica e por período climático. Assim, a hipótese nula é que não existe diferença significativa entre os dados de um parâmetro nas 17 bacias hidrográficas. Se a hipótese nula é rejeitada, segue-se para o teste de Dunn.

O teste de comparações múltiplas de Dunn, com ajuste do p-valor pelo método de Bonferroni, foi aplicado somente quando o teste KW apontou a existência de diferença significativa entre os dados de monitoramento de cada estação de amostragem. O ajuste de p-valor foi aplicado para corrigir o efeito de diferentes tamanhos entre as amostras. A utilização de testes não-paramétricos, que não demandam ajuste a uma distribuição de frequência, justifica-se pelo fato de dados ambientais, em geral, não seguirem a distribuição

normal (Pinto et al., 2019; Oliveira; Sperling, 2008; Naghettini; Pinto, 2007). Ao final dessa etapa, foram gerados gráficos *box-plot* que possibilitaram a melhor visualização dos resultados.

De modo a facilitar a visualização das informações nos gráficos, mantendo-os concisos, os resultados dos testes de *Kruskal-Wallis* e *Dunn* estão apresentados separadamente, no item 5.1.

A partir da estatística descritiva e da observação dos gráficos *box-plot*, foi possível estabelecer faixas de valores para cada parâmetro de modo a quantificar sua magnitude e, assim, detalhar a qualidade das águas por bacia hidrográfica.

4.6. Análise exploratória de dados espaciais e autocorrelação espacial

O *shape* criado, conforme descrito no item 4.3, foi inserido no *software QuantumGIS*, bem como uma planilha em formato *.xls* com os valores das medianas de cada parâmetro estudado por estação de monitoramento. Isto porque não é possível associar mais de um valor de um mesmo parâmetro para uma mesma estação, sendo obrigatório optar por alguma forma de agregação. Assim, propôs-se nesta pesquisa a utilização da mediana dos dados de cada estação, obtida a partir de todos os valores medidos no período estudado, sendo então denominada “mediana histórica do parâmetro”.

Por fim, os valores de medianas históricas por estação foram unidos ao mencionado *shape*, criando-se uma *layer* na qual associou-se uma mediana histórica a cada um dos parâmetros analisados, para todas as estações de monitoramento.

A partir desta *layer*, foram elaborados mapas de distribuição espacial da medianas históricas, que foram agrupadas em faixas de valores, já que estas medianas formam conjuntos de centenas de dados diferentes, inviabilizando sua representação unitária. Os limites superior e inferior das faixas de valores foram estabelecidos a partir de cálculo realizado no próprio *QuantumGIS* pelo método de quebras naturais (*jenks*), que busca ajustar os limites das faixas de modo que, estatisticamente, a variância dentro da faixa seja pequena, e entre as faixas, grande. Este método encontra agrupamentos e padrões inerentes aos dados, diferenciando áreas entre si (Sallun et al., 2007). Para os parâmetros com limites legais determinados na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22, os valores das faixas estabelecidos pelo método de quebras naturais foi manualmente ajustado para coincidir com estes limites. As faixas de valores das medianas históricas quantificam a magnitude dos valores dos parâmetros por estação de monitoramento.

Por fim, foi realizada análise estatística espacial no software *ArcGIS* para analisar os padrões espaciais de autocorrelação. Para tanto, foram calculados os índices global e local de autocorrelação espacial, utilizando-se o Índice de Moran (I de Moran), que é amplamente aplicado na literatura científica (Fonseca e Aguiar, 2019), além de disponível para cálculo no *software ArcGIS*.

O I de Moran Global avalia a relação de interdependência espacial entre todos os pontos da área de estudo, que é expressa por meio de um valor único para toda a região (Moran, 1950, citado por O'Sullivan; Unwin, 2010). No caso em tela, ele será aplicado para diagnosticar a configuração geral de cada parâmetro de qualidade da água distribuído espacialmente.

O I de Moran Local identifica a relação existente entre o valor de uma variável num determinado ponto e os valores desta mesma variável (para a modalidade univariada) nos pontos em sua vizinhança, a partir de uma distância predefinida, com base na covariância existente entre eles, permitindo o exame da homogeneidade/diversidade dos dados (Anselin, 1995, citado por O'Sullivan; Unwin, 2010). Deste modo, o método mede a associação especial de cada ponto com os demais do mesmo grupo com base na (1) localização e (2) valores (ESRI, 2023). Se o I de Moran global indicar que há associação espacial no grupo estudado, aplica-se o I de Moran local, para avaliar a ocorrência de agrupamentos e valores anômalos.

O I de Moran local será capaz de determinar quatro tipos de regimes de autocorrelação: *cluster high-high* (agrupamento alto-alto), *cluster low-low* (agrupamento baixo-baixo), *outlier high-low* (valor anômalo alto-baixo) e *outlier low-high* (valor anômalo baixo-alto) (Almeida, 2012). Os regimes do tipo *cluster* indicam autocorrelação positiva entre os valores de modo que eles se agrupam, diferenciando-se significativamente dos vizinhos, mas não entre si. Se for do tipo alto-alto, seus valores são maiores que os dos vizinhos, enquanto baixo-baixo significa o inverso. Já o regime de *outlier* identifica que aquele valor é anômalo na sua vizinhança, podendo também ser maior ou menor.

Com o cálculo do I de Moran local no *ArcGIS*, obtém-se quatro resultados: um valor do índice; um valor de z; um valor de p; e uma classificação de regime de autocorrelação. Na pesquisa em tela, optou-se por apresentar os resultados dos regimes de autocorrelação representados em mapas elaborados no próprio *software*.

Para cálculo do I de Moran local, há que se indicar ao *software* algumas premissas, de modo a desenhar a interação dos valores no espaço o mais realisticamente possível. Nesta pesquisa, a correção espacial foi calculada com base no conceito de *inverse distance*, o mais apropriado para dados contínuos e para casos em que a proximidade dos pontos aumenta a chance de estes terem alguma correlação. Este conceito também é indicado quando há grande quantidade de dados (ESRI, 2023).

O método aplicado foi o da distância euclidiana, ressaltando-se que o *software* não requer a determinação de um valor desta. Ressalta-se que, apesar do uso de coordenadas geográficas, o que inicialmente seria incompatível com o método da distância euclidiana, o tamanho das áreas avaliadas é pequeno o suficiente para permitir a aplicação deste método sem gerar erros pela curvatura da Terra, assim como foi feito no trabalho de Miralha e Kim (2018).

A padronização utilizada foi do tipo *raw*, em que os valores dos atributos não são transformados ou ajustados antes do cálculo do índice, uma vez que a autocorrelação aplicada é univariada.

Pela heterogeneidade da distribuição espacial da rede de amostragem, não foi definido um valor limite de distância entre vizinhos. Assim, o *software*, como *default*, calcula este limite como a distância mínima que garante que cada ponto tenha pelo menos um vizinho (ESRI, 2023).

As versões dos *softwares* utilizadas são *QuantumGIS* 3.28.0 e *ArcGIS* 10.8.

4.7. Mapas temáticos para representação espacial da qualidade das águas em Minas Gerais

Para apresentação da distribuição espacial dos valores das medianas históricas, foram criados formatos de legendas para os mapas temáticos. Os parâmetros sem limites legais estabelecidos foram representados de forma tal que cada uma das cinco faixas de valor recebeu uma cor diferente. Como mencionado, os limites das faixas foram calculados com base no método de quebras naturais. A faixa 1 recebeu a cor verde claro; a faixa 2, verde escuro; a faixa 3, laranja claro; a faixa 4, laranja escuro; e a faixa 5, vermelho.

Como apenas 36 dos 46 parâmetros possuem limites preconizados pela legislação, as faixas criadas consideraram o método de aproximação denominado “Quebra Natural” (Natural Breaks), que foi desenvolvido por Jenks (1977), que permite uma melhor visualização da distribuição espacial. O método de quebras naturais ajusta os limites das

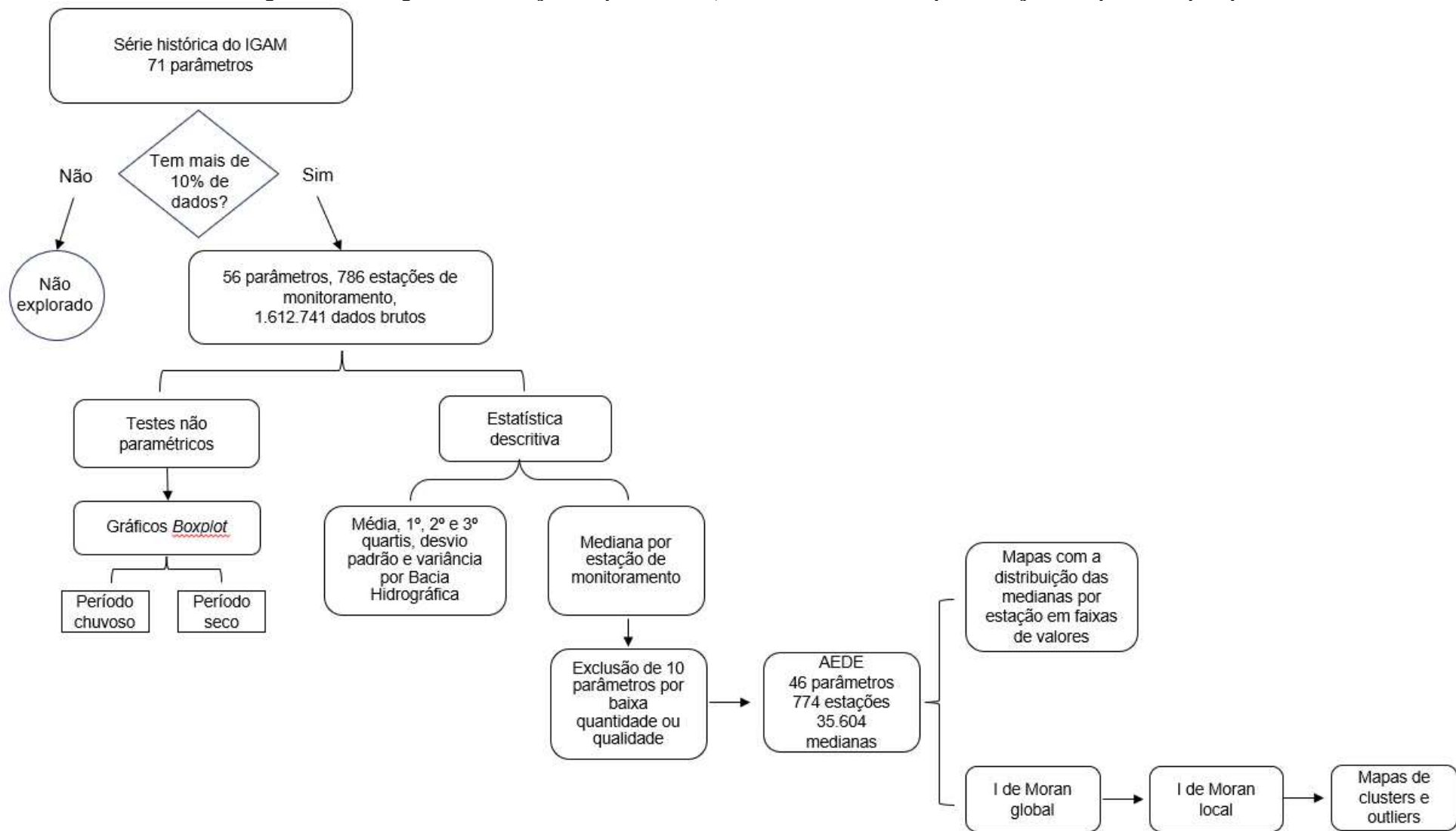
classes de acordo com a distribuição dos valores dos dados, de modo que estatisticamente a variância dentro da classe seja pequena e entre as classes seja grande. Este método encontra agrupamentos e padrões inerentes aos dados, diferenciando áreas entre si (SALLUN e al., 2007).

Já os parâmetros com limites legais foram representados de forma tal que cada uma das cinco faixas de valor recebeu uma cor de acordo com o limite legal do parâmetro, ressaltando-se também que os limites das faixas foram calculados com base no método de quebras naturais. Os tons de verde foram dados para faixas de valores menores que o limite legal para águas doces classe I; os de laranja foram dados para faixas de valores maiores que o limite legal para águas doces classe I e menores que o limite para águas doces classe III; e os tons de vermelho foram dados para as faixas de valores maiores que o limite legal para águas doces classe III.

Ressalta-se, por fim, que foi utilizado o shape *ide_1103_mg_municipios_pol* para delimitação dos municípios mineiros nos mapas, criando referências visuais locais das estações.

Um resumo da seleção de dados e representação dos resultados obtidos a partir dos tratamentos empregados está apresentado no fluxograma da Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma da seleção de parâmetros, seus tratamentos e representações na presente pesquisa.



Fonte: elaboração própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Estatística descritiva e testes de hipóteses não-paramétricos

Os resultados da estatística descritiva estão apresentados no Apêndice A. O teste de Kruskal-Wallis identificou diferença significativa entre as Bacias Hidrográficas no período chuvoso para 54 dos 56 parâmetros, a nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Os parâmetros que não apresentaram diferenças foram Cromo total (p-valor = 0,1984) e Cianeto total (p-valor = 0,1351). No período seco, o teste identificou diferença significativa entre as Bacias Hidrográficas para 53 dos 56 parâmetros, a nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$). Para os parâmetros Cobre total (p-valor = 0,2332), Cromo hexavalente (p-valor = NA) e Mercúrio total (p-valor = 0,4534) não houve diferença significativa.

Testes de Dunn foram realizados para cada um dos parâmetros com diferença significativa apontadas pelo teste de Kruskal-Wallis em ambos os períodos climáticos. Os resultados estão apresentados no Apêndice A.

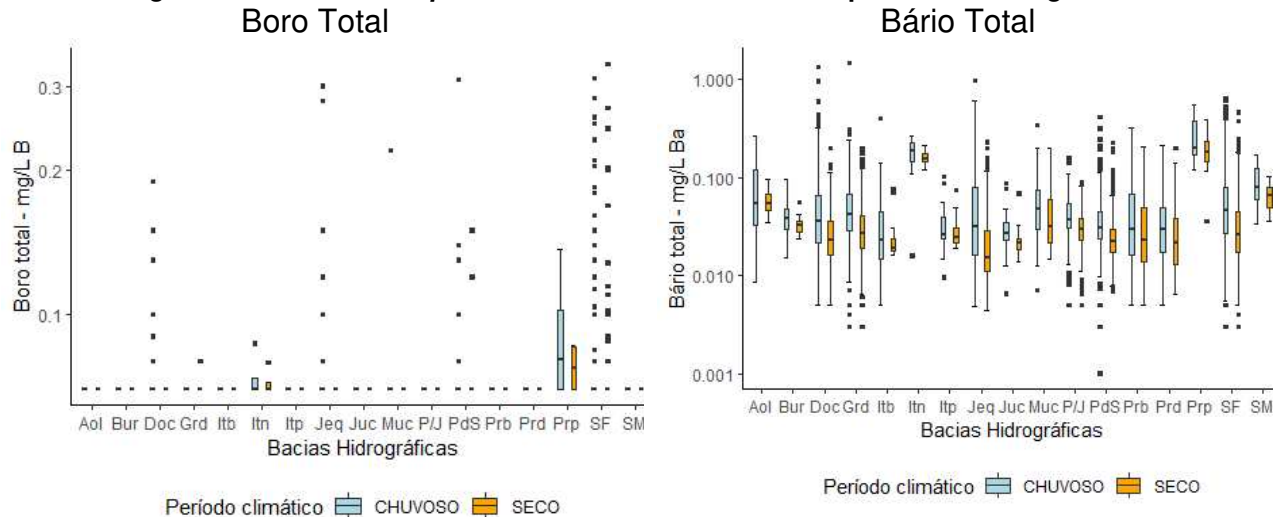
Como mencionado no item 4.3, 10 parâmetros não apresentaram dados suficientes em qualidade (Boro total, Bário total, Cádmi total, Mercúrio total e pH em laboratório) e quantidade (Cianeto total, Cobre total, Cromo hexavalente, Estreptococos fecais e Selênio total) para exploração espacial e, por isso, seus gráficos *box-plot* com os resultados da estatística descritiva estão apresentados neste tópico. Os gráficos *box-plot* para os parâmetros não comentados neste tópico serão apresentados junto aos mapas de distribuição de medianas históricas por faixas de valores nos itens 5.2.1 e 5.2.2.

O parâmetro Boro total apresentou todos os valores históricos abaixo do limite legal mais restritivo. Isto é, durante os 21 anos de monitoramento, nunca houve um resultado, mesmo de *outlier*, acima dos limites estipulados pela DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 para águas de classes I, que é de 0,5 mg/l B. Já o Bário total apresentou apenas quatro valores acima do limite legal mais restritivo, que é de 0,7 mg/l Ba para águas doces classe I. Estes ocorreram em três Bacias Hidrográficas: a do Rio Doce, a do Rio Grande e a do Rio Jequitinhonha (Figura 8).

O parâmetro Cádmi total apresenta 98,5% dos seus dados iguais a 0,0005 mg/l (Figura 9). Este valor representa o limite de detecção do método, sendo 50 vezes menor que o limite legal estabelecido na DN conjunta COPAM/CERH n. 08/22 para águas doces classe I (0,001 mg/l) e 500 vezes menor que o limite para classe III (0,01 mg/l). Apenas alguns *outliers* ultrapassam este limite menos restritivo da norma, observados nas bacias

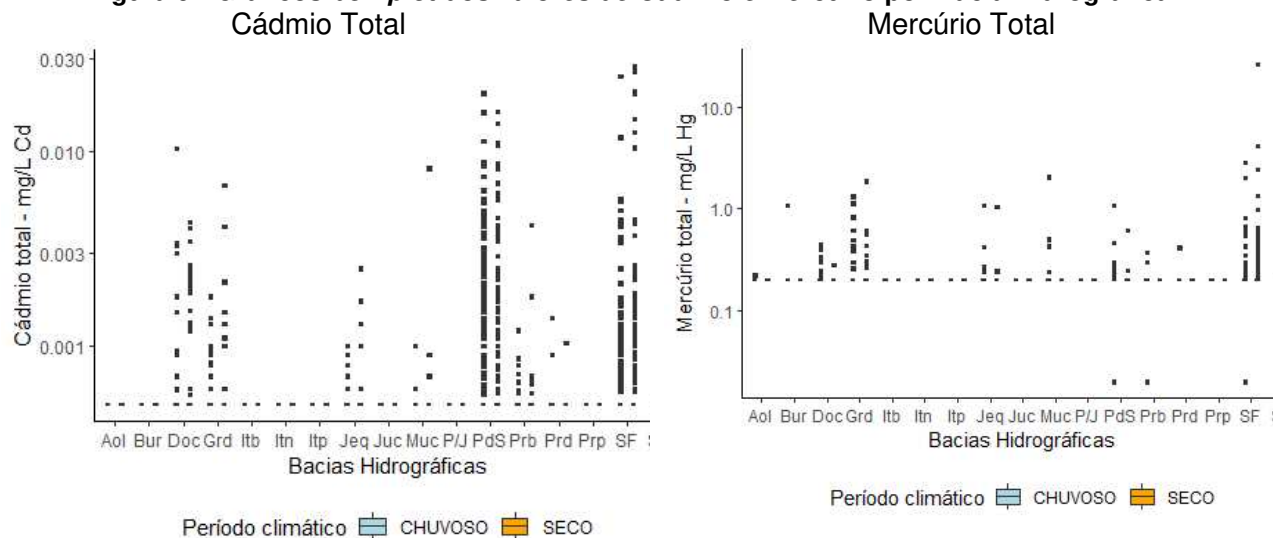
hidrográficas dos rios Paraíba do Sul e São Francisco. O mesmo ocorre com o parâmetro Mercúrio total, em que 99,13% dos dados são iguais a 0,2 mg/l, valor limite de detecção do método. No entanto, o limite legal do parâmetro é igual a 0,002 mg/l para águas doces classe I (100 vezes menor), e 0,01 mg/l para águas doces classe III.

Figura 8 – Gráficos *box-plot* dos valores de Bário e Boro por Bacia Hidrográfica



Legenda: Aol - Alcobaça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

Figura 9 - Gráficos *box-plot* dos valores de Cádmio e Mercúrio por Bacia Hidrográfica



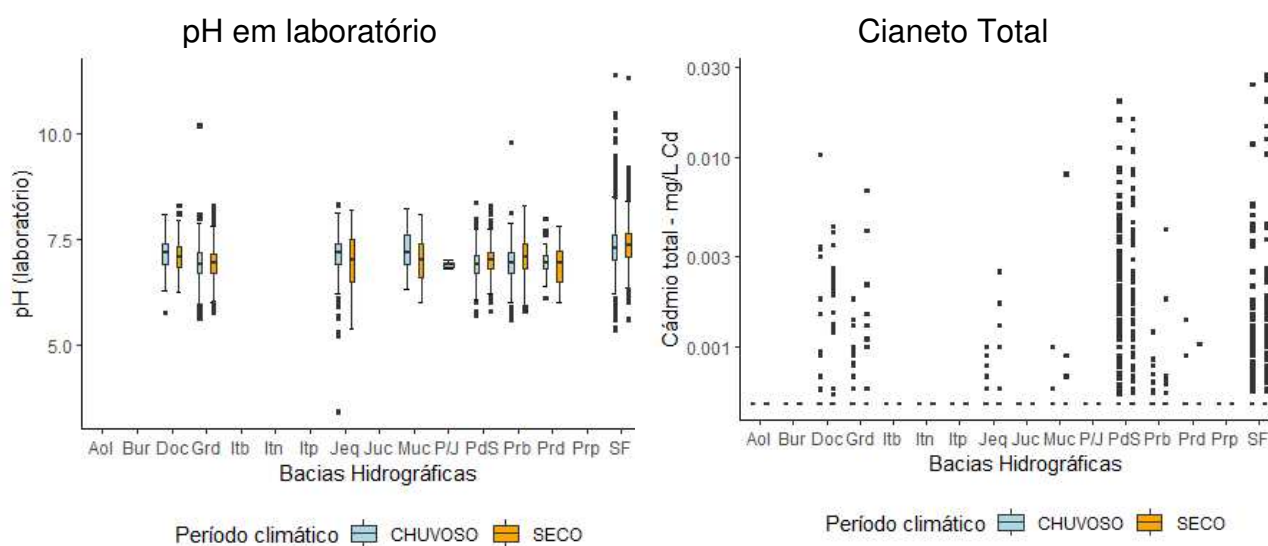
Legenda: Aol - Alcobaça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

O parâmetro pH em laboratório apresentou dados em somente 9 das 17 Bacias hidrográficas de rios de domínio da União existentes no estado; o parâmetro pH *in loco*, por

sua vez, foi medido em todas as bacias. Devido à existência de correlação entre ambos os parâmetros, selecionou-se apenas o pH *in loco* para exploração espacial neste estudo. O coeficiente de correlação de Spearman entre estes é igual a 0,62, que significa uma correlação moderada.

O parâmetro Cianeto total apresenta dados para os anos de 2000 a 2009 em 8 das 17 Bacias hidrográficas de rios de domínio da União que ocorrem em Minas Gerais. A atual norma que define os limites legais dos parâmetros de qualidade da água no estado não apresenta valores para o Cianeto total. No entanto, a Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH 10/86, que vigeu até o ano de 2008, trazia o parâmetro Cloretos, com limite entre 0,01 mg/l CN (classe 1) e 0,2 mg/l CN (classe 3). O limite de detecção do método é de 0,01 mg/l CN, de modo que todos os valores de Cianeto total estão acima do limite legal mais restritivo vigente à época de medição; apenas nas bacias hidrográficas dos rios Grande, Paraíba do Sul e São Francisco há valores acima do limite legal menos restritivo, chegando a 1,0 mg/l CN. Estes resultados estão dispostos na Figura 10.

Figura 10 – Gráficos *box-plot* dos valores de Cianeto total e pH em laboratório por Bacia Hidrográfica

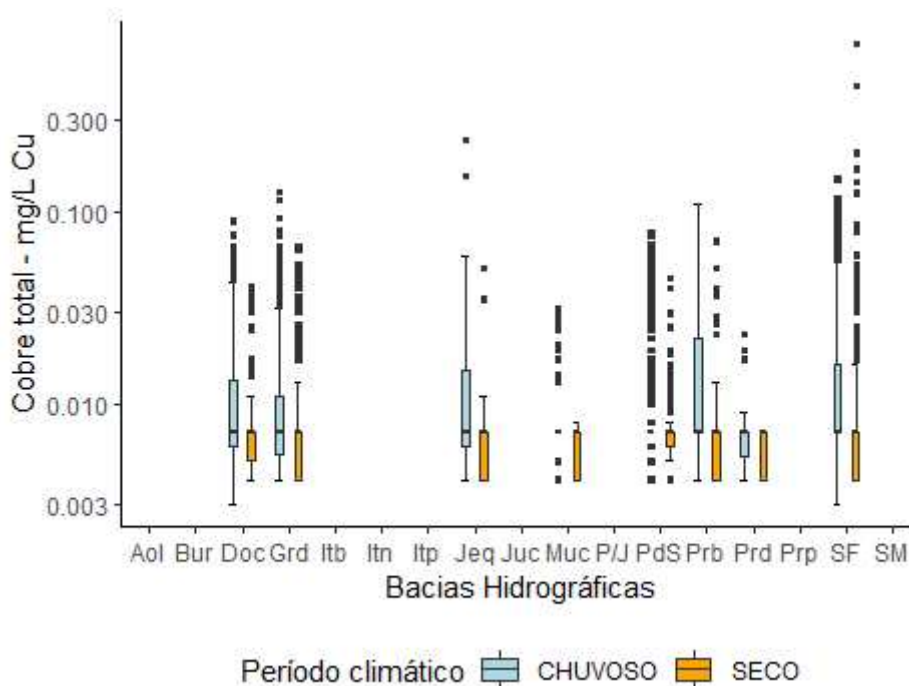


Legenda: Aol - Alcobaça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

O Cobre total apresenta dados para 8 das 17 Bacias hidrográficas de rios de domínio da União estudadas. Há dados de medição entre o ano 2000 e o ano de 2006 e para os anos de 2012 e 2013. Não há limite para este parâmetro na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 ou em sua antecessora, a DN Conjunta COPAM/CERH-MG 01/2008. No entanto, na DN

Conjunta COPAM/CERH 10/86, há limites para o parâmetro Cobre, que variam de 0,2 mg/l Cu a 0,5 mg/l Cu. Nota-se que a mediana do parâmetro em todas as bacias medidas permanece em torno de 0,007 mg/l Cu (Figura 11), que é o limite de detecção do método analítico. Apenas alguns *outliers* nas bacias dos rios Jequitinhonha e São Francisco superam os valores do limite mais restritivo na norma vigente à época da medição, e nenhum supera os valores do limite menos restritivo.

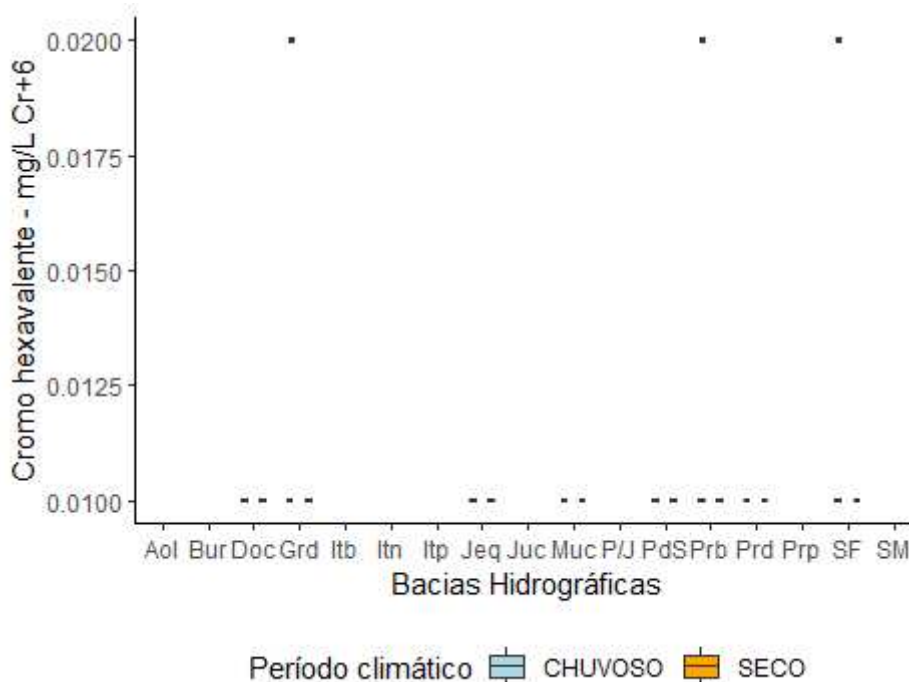
Figura 11 - Gráfico *box-plot* dos valores de Cobre por Bacia Hidrográfica



Legenda: Aol - Alcobaça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

O Cromo hexavalente tem 4.415 de dados válidos (10,15%), sendo medido apenas entre os anos de 2000 e 2006. Este parâmetro não apresenta valor limite definido na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22, nem na DN Conjunta COPAM/CERH-MG 01/2008. No entanto, na DN Conjunta COPAM/CERH 10/86, há limite para o parâmetro Cromo hexavalente igual a 0,05 mg/l Cr. O gráfico (Figura 12) apresenta valores de Cromo hexavalente sempre abaixo de 0,02 mg/l, menor que a metade do valor limite legal vigente à época de medição. Ainda, apresenta apenas 3 valores acima do limite de detecção do método de análise, de 0,01 mg/l Cr, que ocorrem nas bacias hidrográficas dos rios Grande, Paranaíba e São Francisco.

Figura 12 - Gráfico *box-plot* dos valores de Cromo hexavalente por Bacia Hidrográfica



Legenda: Aol - Alcobaça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

O parâmetro *Estreptococos* fecais foi medido de 2000 a 2016 em apenas 60 estações de monitoramento; por este motivo, quando os dados totais foram transformados em mediana por estação, este parâmetro apresentou quantidade abaixo de 10%, tornando-se insuficiente para ser analisado sob o aspecto espacial. Não existem limites legais definidos para *Estreptococos* fecais na norma estadual ou mesmo na norma federal (CONAMA 357/05 e alterações). Nota-se que a variação dos valores é grande, com amplitudes interquartis que variam de 10 UFC/100 ml a 100.000 UFC/100 ml (Figura 13).

Das 10850 medições do parâmetro Selênio total, apenas 84 têm resultados acima do limite de detecção do método analítico, o que representa 0,77% dos dados totais. Ademais, este parâmetro é medido em apenas 42 estações de monitoramento. Seu limite legal estabelecido na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 varia de 0,01 mg/l Se a 0,05 mg/l Se, ambos superiores ao limite de detecção. Nota-se pelo gráfico *box-plot* (Figura 14) que apenas uma estação na BH do Rio Paraíba do Sul e algumas estações na BH do Rio São Francisco ultrapassam o valor de 0,01 mg/l Se. Nesta bacia, inclusive, tem-se um valor amostrado 10 vezes maior que o limite legal mais restritivo.

Figura 13 - Gráfico *box-plot* dos valores de Estreptococos por Bacia Hidrográfica

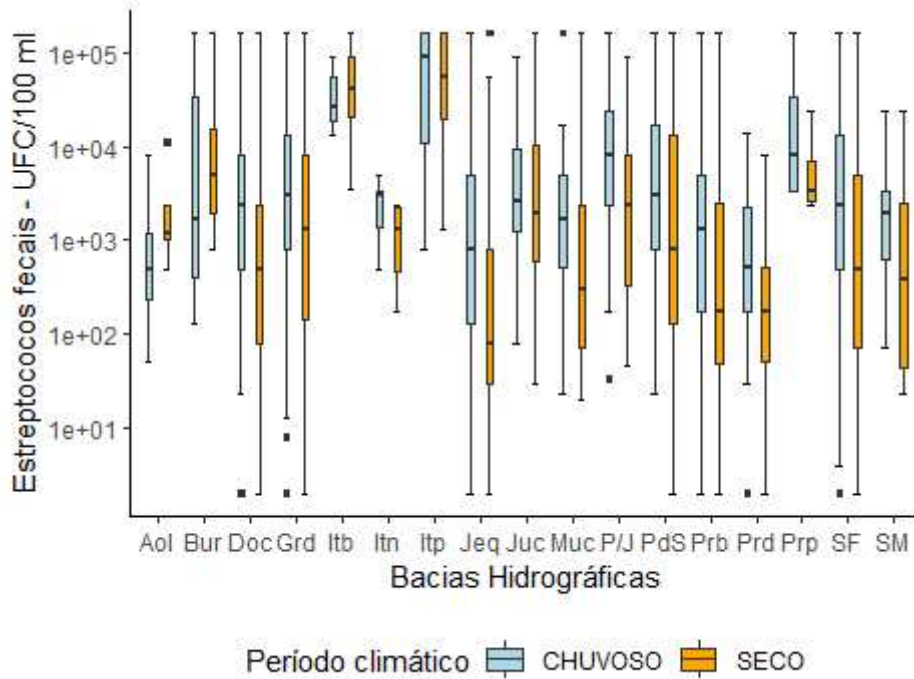
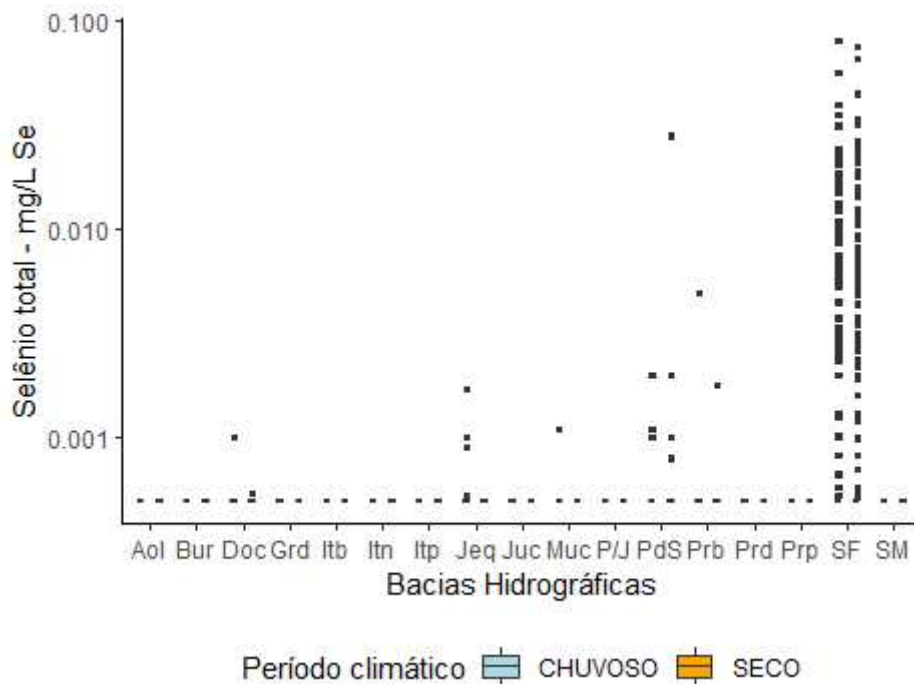


Figura 14 - Gráfico *box-plot* dos valores de Selênio por Bacia Hidrográfica

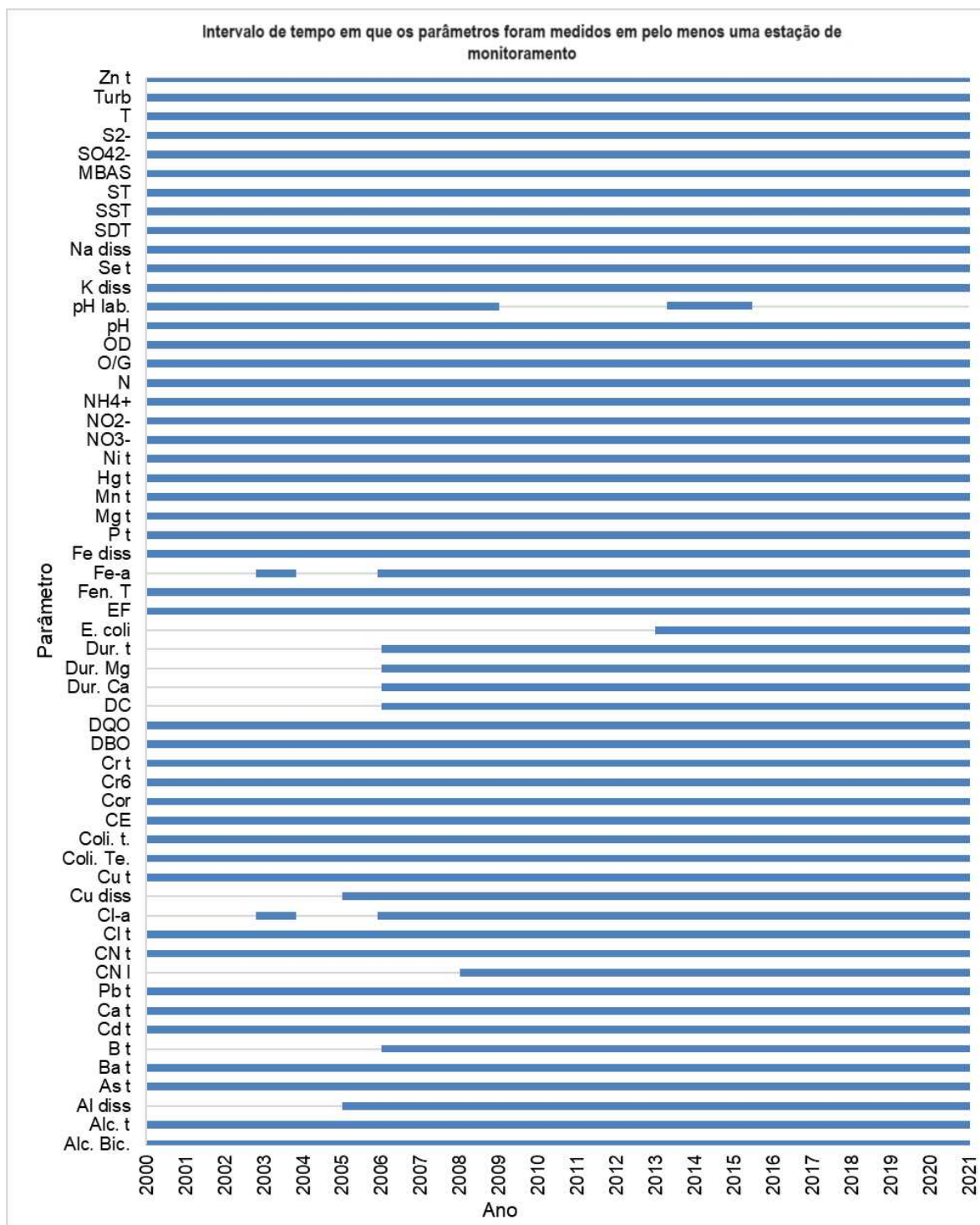


Legenda: Aol - Alcobça ou Itanhém, Bur - Buranhém, Doc – Doce, Grd – Grande, Itb – Itabapoana, Itn – Itaúnas, Itp – Itapemirim, Jeq – Jequitinhonha, Juc – Jucuruçu, Muc – Mucuri, P/J - Piracicaba / Jaguari, PdS - Paraíba do Sul, Prb – Paranaíba, Prd – Pardo, Prp – Peruípe, SF - São Francisco SM - São Mateus.

A

Figura 15 mostra o histórico anual de medição de cada parâmetro e evidencia as diferenças, muitas vezes desencadeadas por alterações normativas, no período em que se mediu cada variável. Destacam-se, aqui, os marcos temporais de 2005, quando entrou em vigor a Resolução CONAMA 357/05, que define condições e padrões de qualidade das águas, e o ano de 2008, quando foi promulgada a DN Conjunta COPAM/CERH 01/08, também com o objetivo de definir padrões de qualidade das águas. Desde 2022, está em vigor no estado de Minas Gerais a DN Conjunta COPAM/CERH 08/22, que revogou sua antecessora, a 01/08.

Figura 15 – Representação da medição dos parâmetros estudados no recorte temporal pesquisado.



Legenda: Alc. Bic. = alcalinidade do bicarbonato, Alc. t = Alcalinidade total, Al diss. = Alumínio dissolvido, As t = Arsênio total, B t = Boro total, Ba t = Bário total, Ca = Cálcio, Ca = Cálcio, Cd t = Cádmi total, CE = Condutividade elétrica in loco, Cl t = Cloro total, CL-a = Clorofila a, CN = Cianeto, CN l = Cianeto livre, Coli = Coliformes, Cor = cor verdadeira, Cr t = Cromo total , Cr6+ = Cromo hexavalente, Cu = Cobre, Cu diss. = Cobre dissolvido, DBO = demanda bioquímica de oxigênio, DC = Densidade de cianobactérias, DQO = Demanda química de oxigênio, Dur = Dureza, EF = Estreptococos fecais, Fe a = Feofitina a, Fe diss. = Ferro dissolvido, Fen t = Fenóis totais, Hg t = Mercúrio total, IF = indicador fecal, K diss = Potássio dissolvido, Mg

= Magnésio, Mn t= Manganês total, N = Nitrogênio orgânico, Na diss = Sódio dissolvido, NH₄⁺ = nitrogênio amoniacal, Ni t = Níquel total, NO₂⁻ = nitrito, NO₃⁻ = nitrato, O/G = óleos e graxas e MBAS = Substância tensoativas, OD = oxigênio dissolvido, P t = Fósforo total, Pb t = Chumbo total, pH = pH in loco, ph lab = ph em laboratório, S t = Sulfeto total, SDT = Sólidos dissolvidos totais, Se t = Selênio total, SO₄ t = Sulfato total, SST = Sólidos suspensos totais, ST = Sólidos totais e T = temperatura da água., Turb. = Turbidez, Zn t = Zinco total.

5.2. Mapas temáticos para representação espacial da qualidade das águas em Minas Gerais

Foram elaborados mapas para a apresentação da distribuição das medianas históricas e dos resultados de autocorrelação para 46 dos 56 parâmetros. Não foram elaborados mapas para os parâmetros Boro total, Bário total, Cádmio total e Mercúrio total, uma vez que seus valores históricos estão todos abaixo dos limites legais mais restritivos. O parâmetro pH em laboratório não foi medido em todas as Bacias Hidrográficas e, portanto, também não foi explorado com a metodologia espacial. Já os parâmetros Cianeto total, Cobre total, Cromo hexavalente, Estreptococos fecais e Selênio total não foram explorados espacialmente por apresentarem insuficiência de dados.

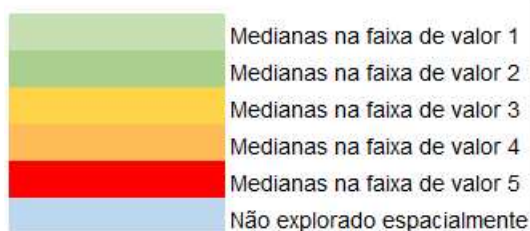
5.2.1. Parâmetros sem limites legais estabelecidos

Uma matriz com um resumo da ocorrência de valores por faixa em cada bacia hidrográfica é apresentada na Figura 16.

As bacias hidrográficas dos rios Doce, Jequitinhonha e São Francisco apresentam, para diversos parâmetros, estações com maiores valores de medianas históricas, nas faixas 4 e 5, o que indica serem estas as águas superficiais de pior qualidade no estado. Já os parâmetros que apresentam valores nas faixas 4 e 5 no maior número de bacias hidrográficas são **Coliformes totais** e **Potássio dissolvido**, que impactam 7 das 17 bacias estudadas.

Figura 16 – Ocorrência de estações considerando a maior faixa de valor observada por bacia hidrográfica para parâmetros sem limites legais.

Parâmetro/ Bacia Hidrográfica	Alc. bic.	Alc t	Ca t	CN t	Cu t	CE	Coli t	Cr6+	Dur Mg	Dur Ca	Dur t	DQO	EF	Fe a	K diss.	Mg t	Na diss.	N	ST	T
Alcobaça ou Itanhém																				
Buranhém																				
Doce																				
Grande																				
Itabapoana																				
Itapemirim																				
Itaúnas																				
Jequitinhonha																				
Jucuruçu																				
Mucuri																				
Paraíba do Sul																				
Paranaíba																				
Pardo																				
Peruípe																				
Piracicaba / Jaguari																				
São Francisco																				
São Mateus																				



Legenda: Alc. Bic. = alcalinidade do bicarbonato, Alc. t = Alcalinidade total, Ca = Cálcio, CN = Cianeto, Cu = Cobre, CE = Condutividade elétrica in loco, Coli = Coliformes, Cr6+ = Cromo hexavalente, Mg = Magnésio, Ca = Cálcio, Dur = Dureza, DQO = Demanda química de oxigênio, EF = Estreptococos fecais, Fe a = Feofitina a, K diss = Potássio dissolvido, Na diss = Sódio dissolvido, N = Nitrogênio orgânico, ST = Sólidos totais e T = temperatura da água.

Os parâmetros Alcalinidade do bicarbonato (Figura 17) e Alcalinidade total (Figura 18) apresentam valores com amplitudes interquartil entre 10 e 100 mg/l, com ocorrência de grande número de *outliers* acima do limite superior nas Bacias Hidrográficas dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha e Paraíba do Sul. As medianas por bacia estão entre 10 e 70 mg/l e não apresentam padrão quanto a diferença entre períodos chuvoso e seco.

A distribuição das medianas históricas aponta para estações com valores nas faixas 4 e 5, que vão de 131 a 396 mg/l, majoritariamente na BH do Rio São Francisco, nas CHs Rio das Velhas, Rios Jequitaí e Pacuí e Rio Verde Grande, ocorrendo também na bacia do rio Jequitinhonha, na CH Médio e Baixo Rio Jequitinhonha. Segundo Libânio (2010), águas naturais de origem superficial no Brasil apresentam alcalinidade comumente inferior a 100 mg/l de CaCO₃. Ainda segundo o autor, valores mais elevados de alcalinidade nos corpos d'água estão associados a processos de decomposição da matéria orgânica, à atividade

respiratória de microrganismos, com liberação e dissolução do gás carbônico (CO₂) na água, e ao lançamento de efluentes industriais. Ainda, a alcalinidade total pode estar associada a ocorrência de solos e rochas calcárias.

Os resultados da aplicação do I de Moran mostram a formação de três *clusters* do tipo alto-alto para Alcalinidade de bicarbonato, delimitando mais precisamente os resultados encontrados com a distribuição espacial das medianas por faixas de valores e apontando quais estações têm valores significativamente acima de seus vizinhos. Nota-se a separação das estações na bacia do São Francisco em dois grandes *clusters* alto-alto, diferenciando as ocorrências entre as circunscrições do rio das Velhas e do rio Verde Grande. Há, ainda, um *cluster* unitário na CH do rio Paracatu.

Os *outliers* do tipo baixo-alto contornando os *clusters* alto-alto delimitam o local de ocorrência dos altos valores de alcalinidade. Ainda, atenta-se para os três *outliers* do tipo alto-baixo nas bacias hidrográficas do Rio Doce, do Rio Grande, do Rio Paraíba do Sul e na do rio São Francisco; estes indicam uma condição pontual de altos valores do parâmetro. Os resultados de Alcalinidade total são semelhantes aos de Alcalinidade de bicarbonato, inclusive para a análise de autocorrelação espacial.

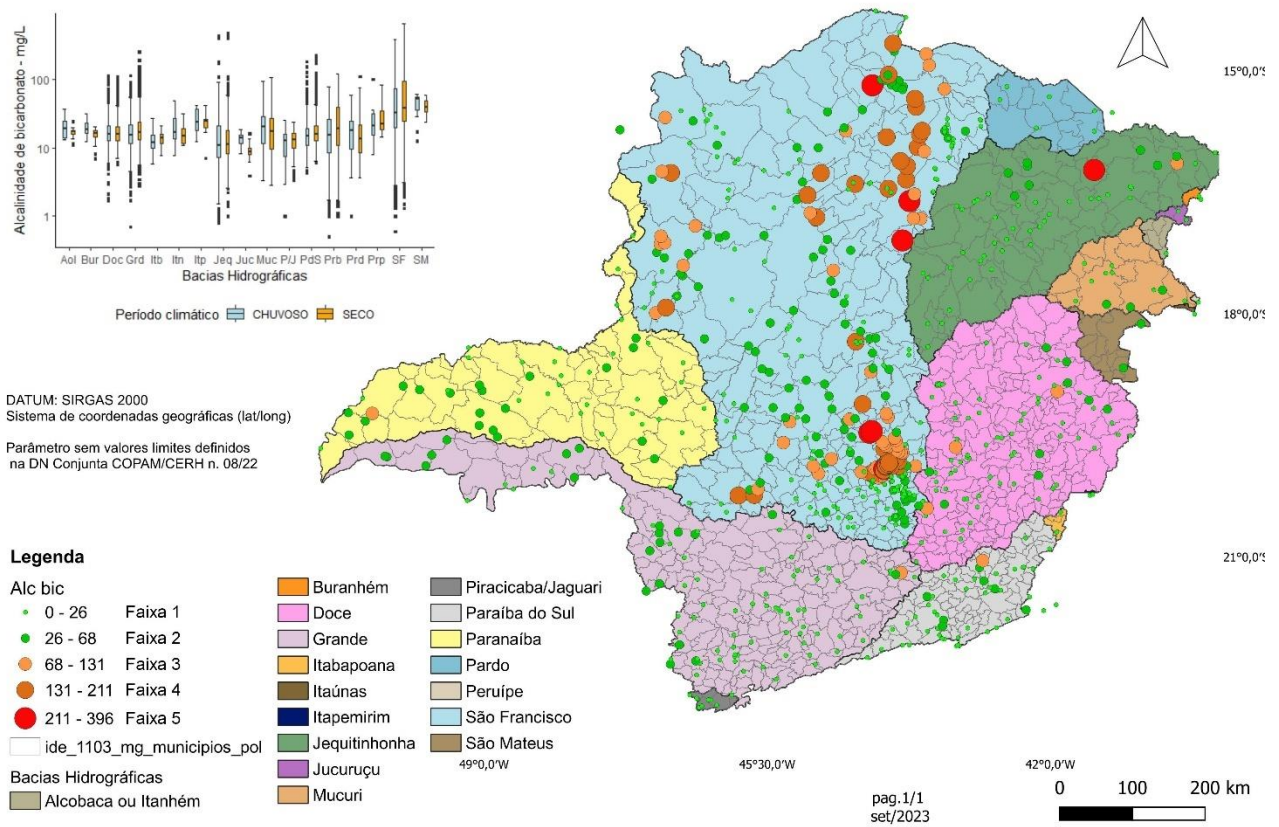
A variabilidade entre as bacias hidrográficas é notada pelas diferentes amplitudes interquartil. Nota-se, ainda, que as medianas por bacia hidrográfica do parâmetro Cálcio total (Figura 19) estão entre 4 e 10 mg/l. A diferença entre períodos seco e chuvoso em cada bacia é pequena, e há grande número *outliers* superiores nas bacias hidrográficas dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco.

A distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro por estação amostral apresenta padrão de concentração das faixas 4 e 5 apenas na BH do Rio São Francisco, em especial nas CHs dos rios Verde Grade, Jequitáí e Pacuí, das Velhas e Paraopeba. A variação dos valores de medianas históricas entre as estações amostrais são da ordem de dezenas, de modo que o maior valor da faixa 1 (7,1 mg/l) é 59 vezes menor que o maior valor da faixa 5 (419 mg/l).

O resultado da análise de autocorrelação espacial revela dois *clusters* do tipo alto-alto nas mesmas regiões em que ocorrem estes agrupamentos para o parâmetro Alcalinidade total, qual seja, CHs dos rios das Velhas e Verde Grande. Ainda, os padrões de *outliers* do tipo baixo-alto são também muito semelhantes, delimitando a área dos *clusters*.

Figura 17 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alcalinidade de bicarbonato

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Alcalinidade de bicarbonato (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Alalinidade de bicarbonato (mg/L) no Estado de Minas Gerais

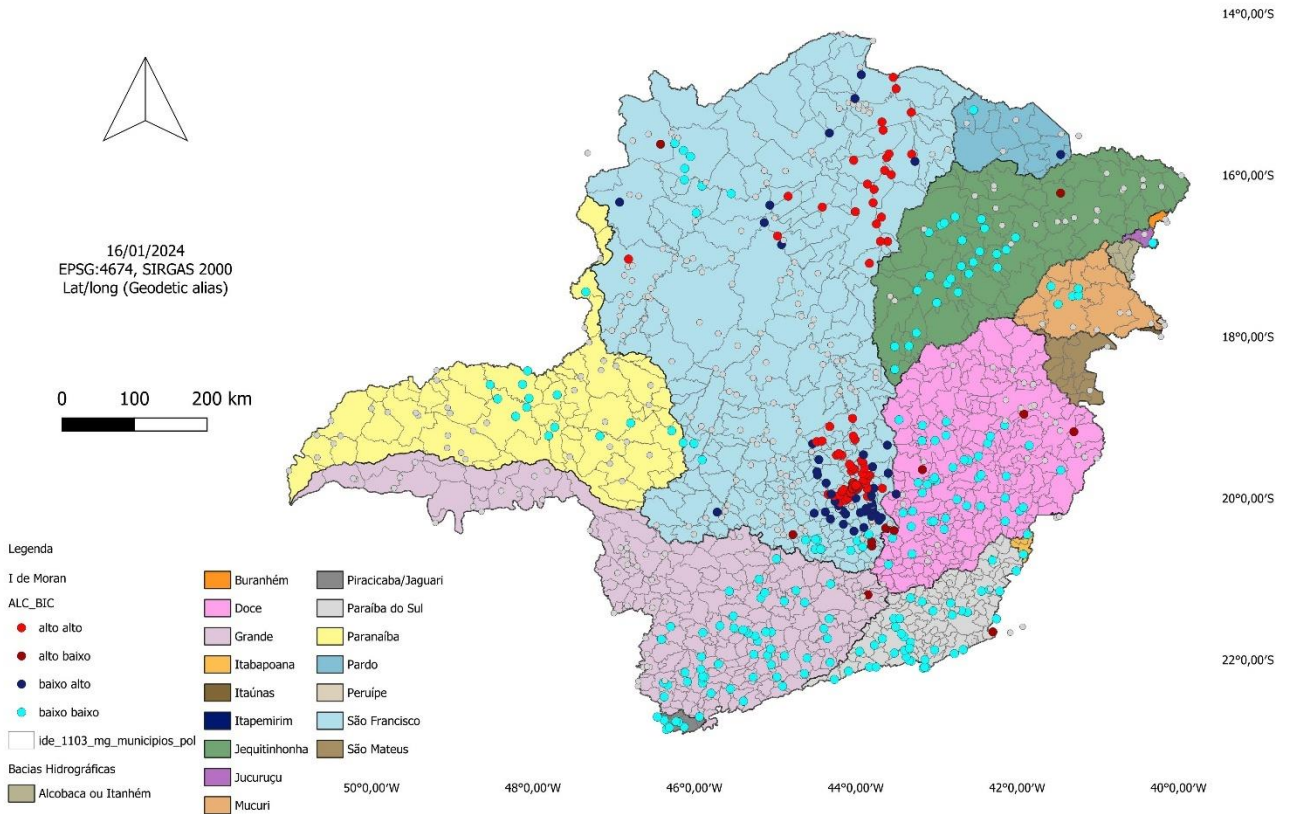
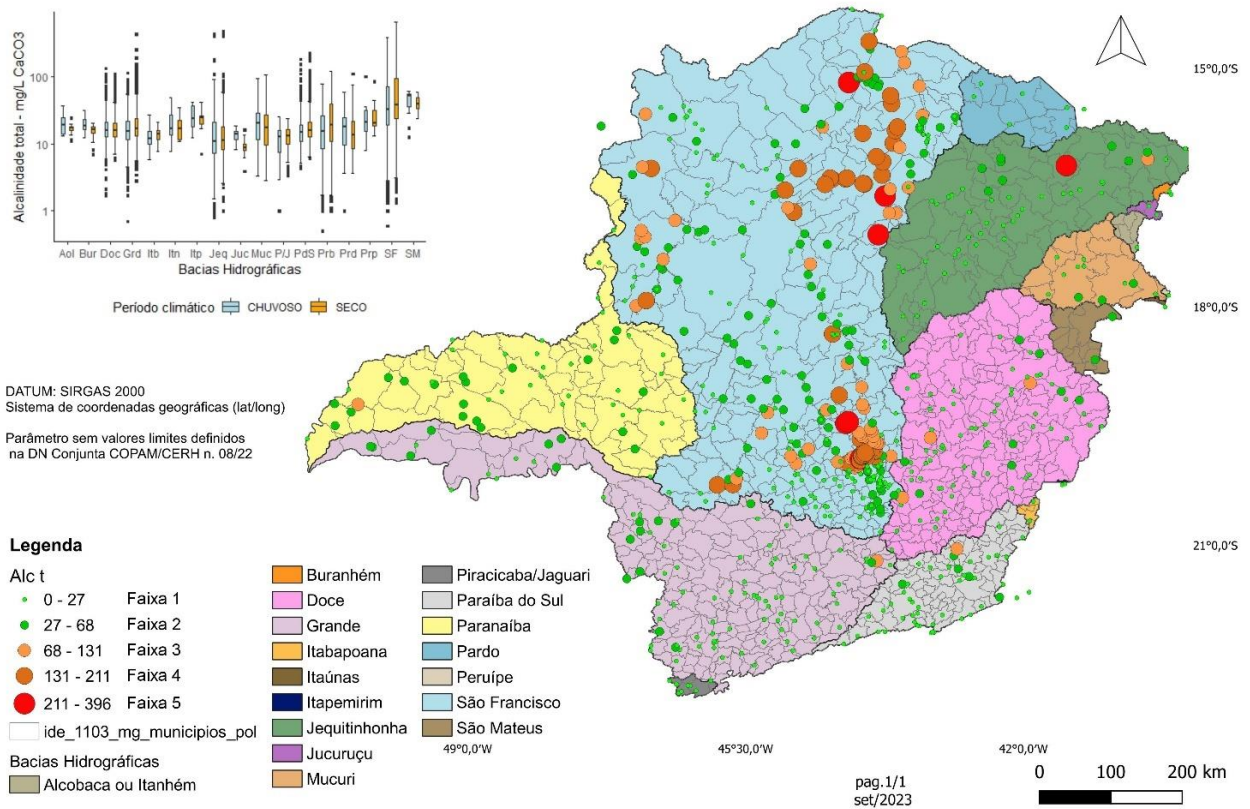


Figura 18 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alcalinidade total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Alcalinidade total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Alalinidade total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

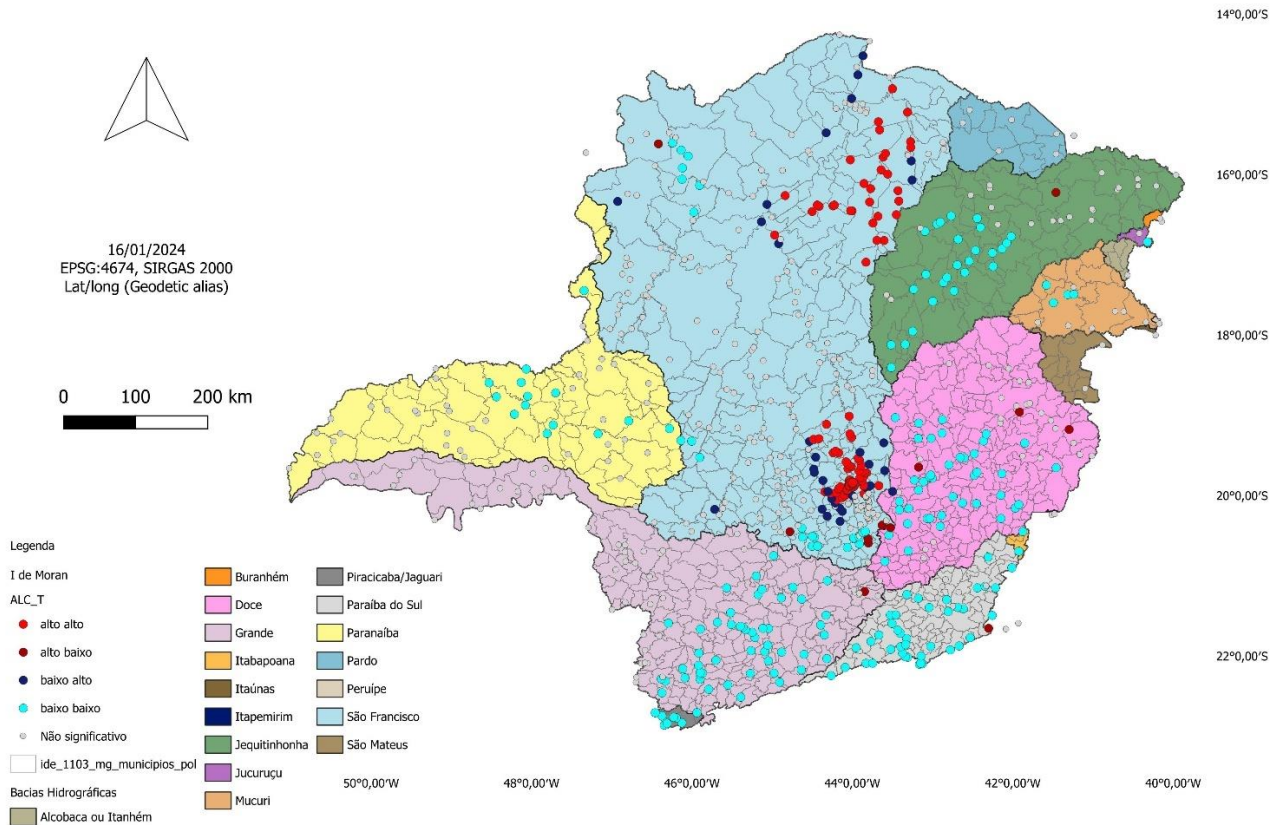
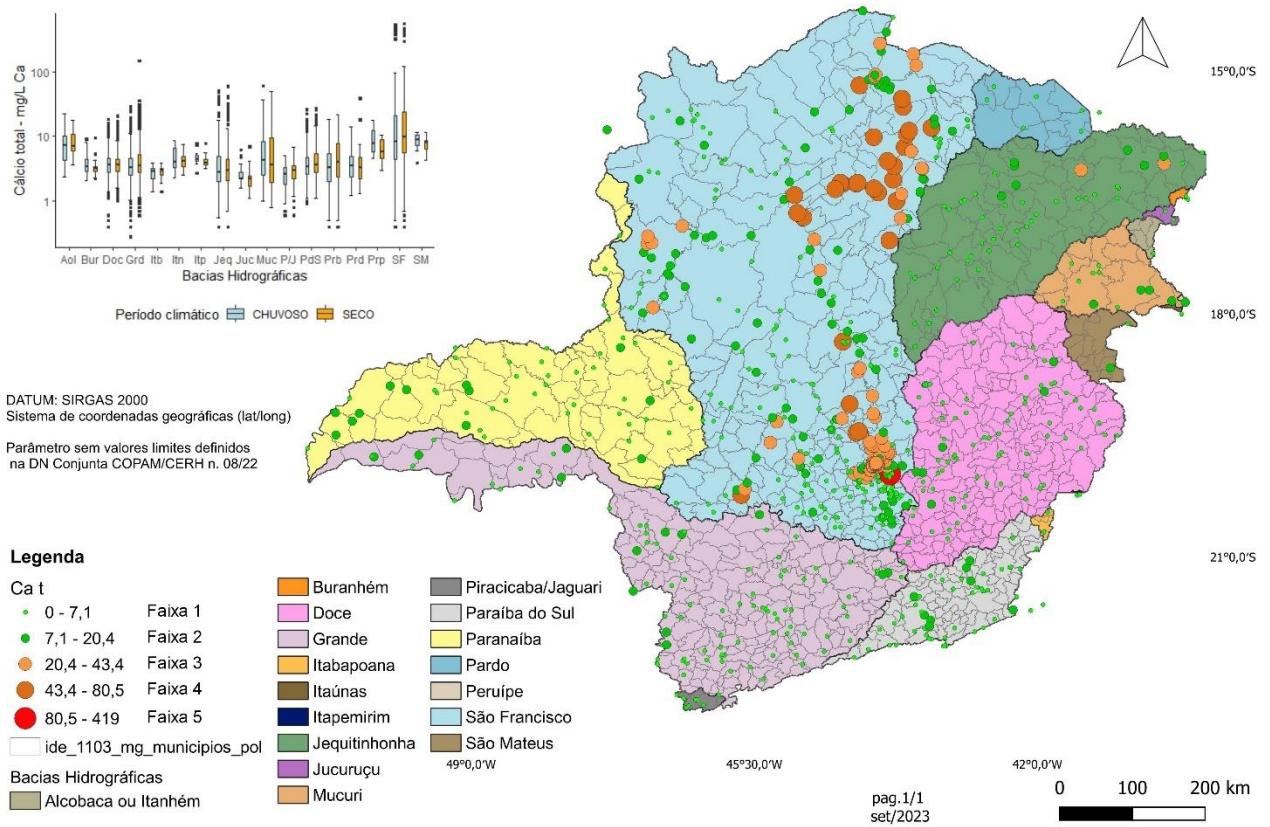
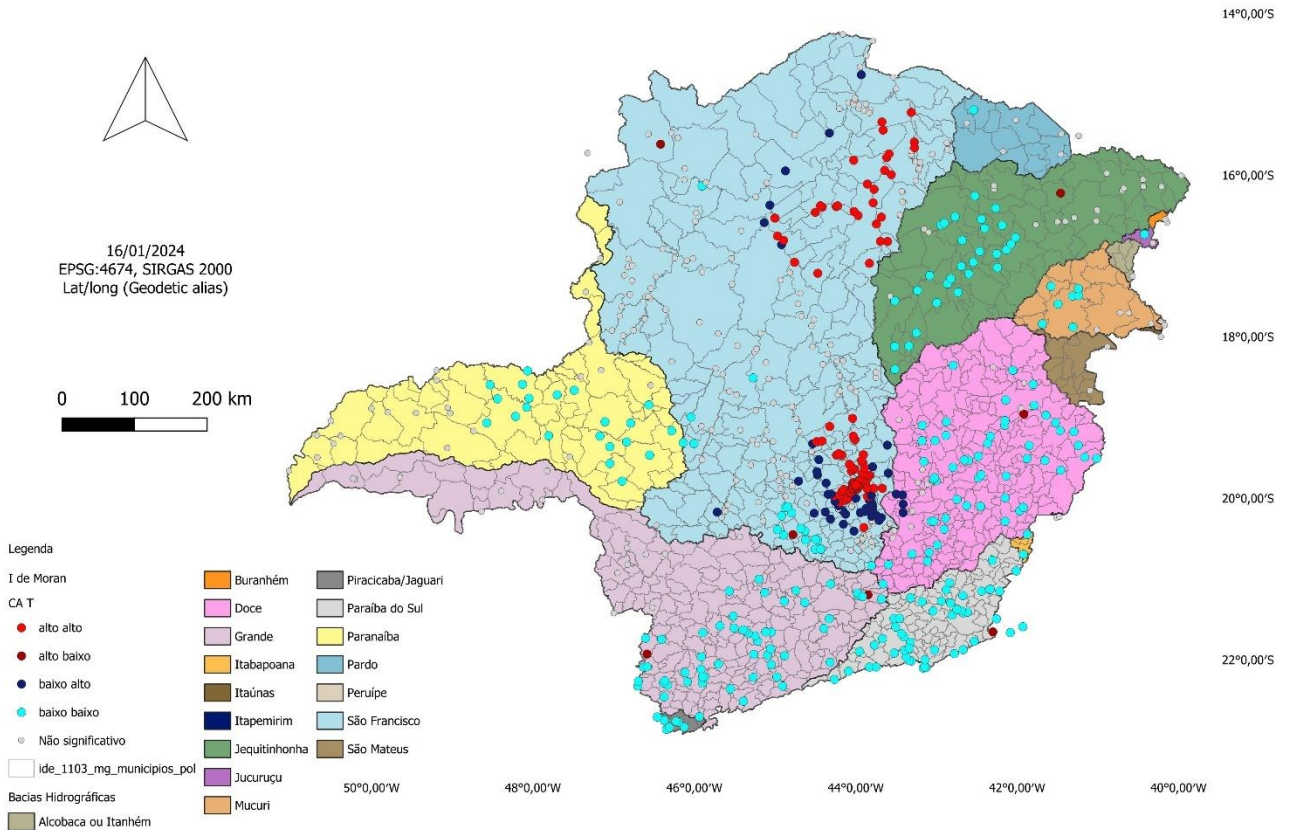


Figura 19 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cálcio total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Cálcio total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Cálcio total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Há uma estação na BH do Rio Jequitinhonha que representa um outlier do tipo alto-baixo, ou seja, um valor significativamente acima dos seus vizinhos, apontando para uma ocorrência pontual na bacia; o mesmo ocorre nas bacias dos rios Doce, Grande e Paraíba do Sul.

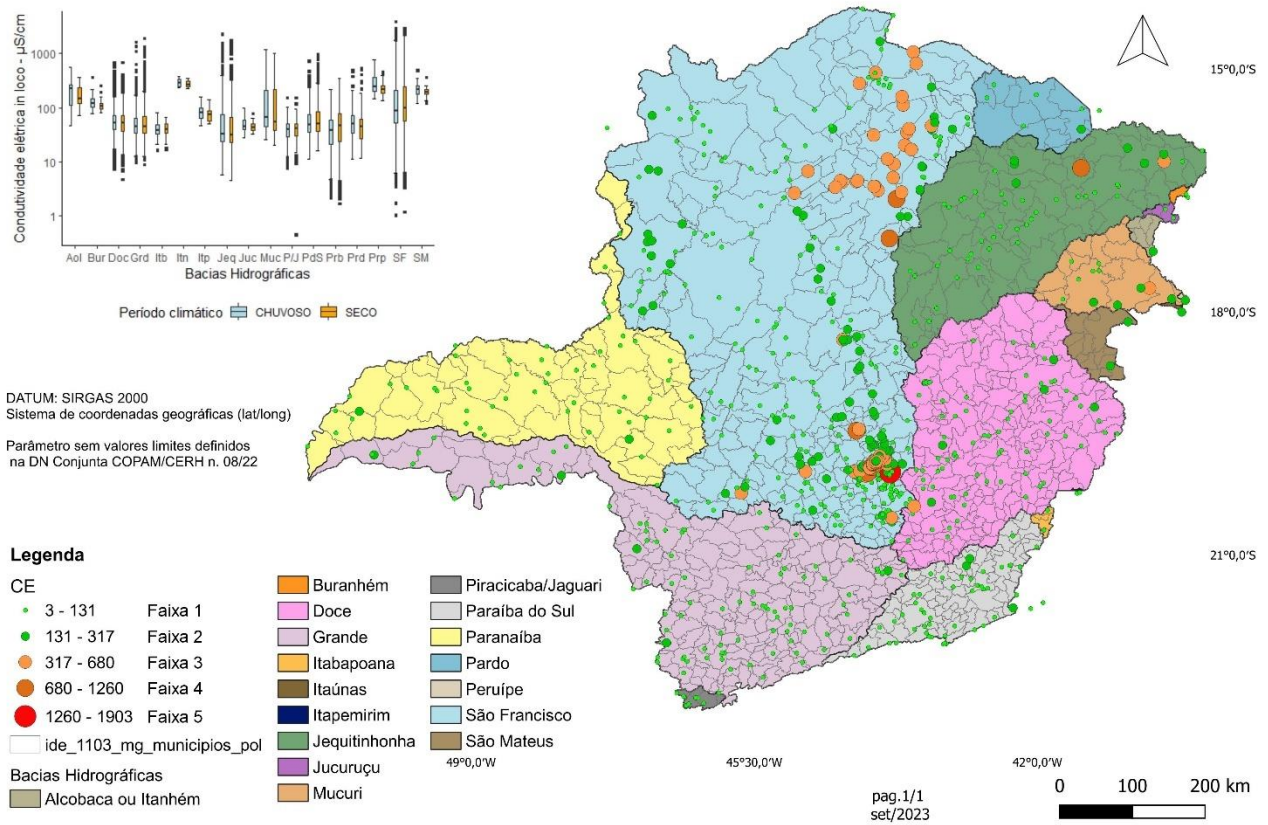
Para o parâmetro Condutividade elétrica (Figura 20), nota-se grande diferença entre a distribuição dos valores unitários por bacias hidrográficas e pouca influência do período chuvoso. A amplitude e interquartil, bem como as medianas, estão entre os valores de 50 e 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As maiores medianas históricas nas faixas de valores 4 e 5 estão concentradas na BH do Rio São Francisco, especialmente na CH do Rio das Velhas, do Rio Verde Grande e do Rio Jequitaí e Pacuí. Há ainda uma estação na faixa 4 na BH do Rio Jequitinhonha.

Segundo Libânio (2010), águas naturais costumam apresentar valores de condutividade elétrica de até 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo atingir 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ em corpos d'água receptores de efluentes domésticos e industriais. Neste sentido, nota-se que já a primeira faixa de valores de medianas históricas do parâmetro ultrapassa os 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e que na única estação de monitoramento com valores na faixa 5, a mediana histórica de CE atinge quase 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

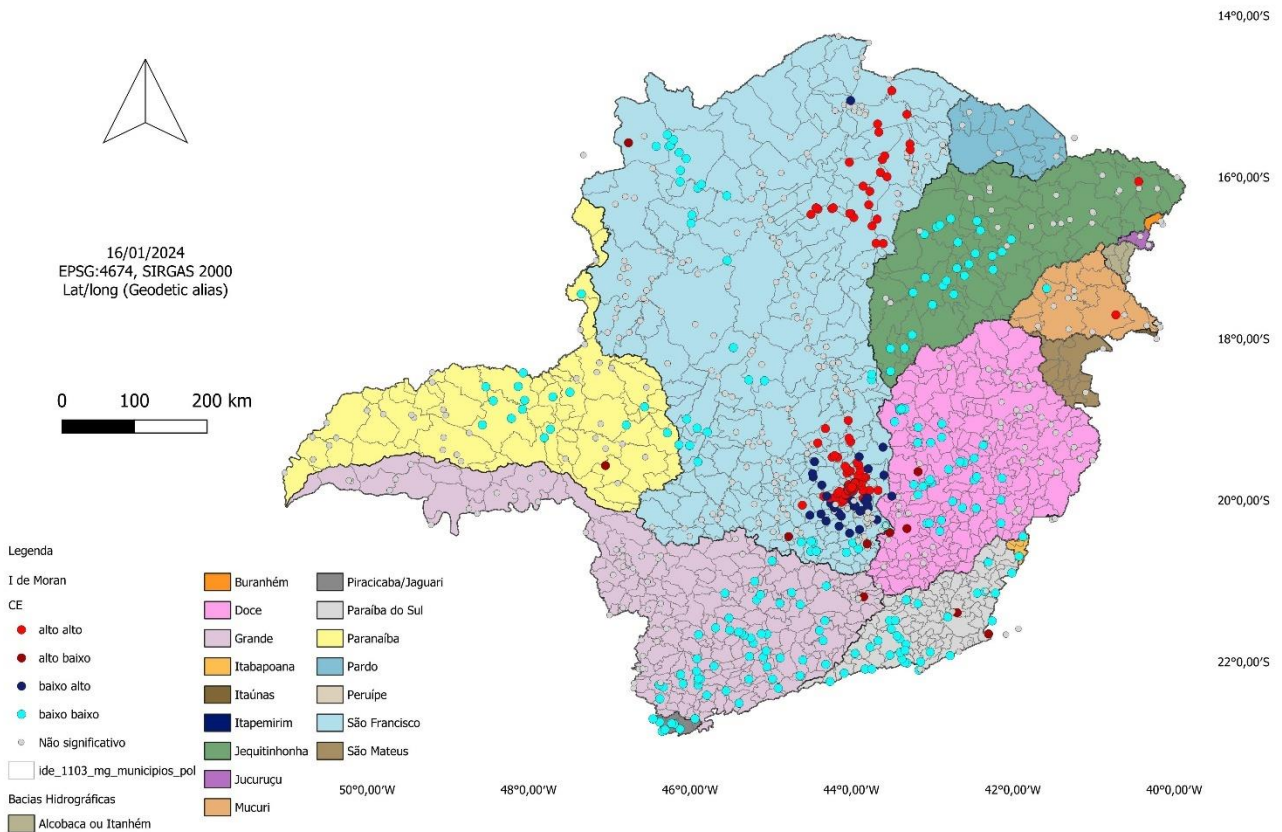
As análises do I de Moran local resultaram quatro *clusters* do tipo alto-alto, representando locais em que haveria maior deterioração da qualidade da água com base no parâmetro Condutividade elétrica, provavelmente pela recepção de efluentes domésticos e industriais nestes corpos d'água. Um destes *clusters* está localizado sobre a região metropolitana de Belo Horizonte – RMBH e é limitado por um “cordão” de *outliers* do tipo baixo-alto, assim como ocorre com os parâmetros Alcalinidade total, Alcalinidade de bicarbonato e Cálcio total, na CH do Rio das Velhas e na do rio Paraopeba. O outro *cluster* deste tipo está localizado na região de Montes Claros, nas circunscrições dos rios Verde Grande e Jequitaí e Pacuí. Os demais *clusters*, que são conjuntos unitários, ocorrem nas bacias dos rios Jequitinhonha (CH do Médio e Baixo Rio Jequitinhonha) e Mucuri. Nota-se, ainda, alguns *outliers* do tipo alto-baixo nas bacias dos rios Doce, Grande, Paranaíba e Paraíba do Sul, o que aponta para degradação pontual da qualidade da água nesta bacia sob o aspecto da Condutividade elétrica.

Figura 20 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Condutividade elétrica

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Condutividade elétrica (mg/L) no Estado de Minas Gerais



O parâmetro Coliformes totais (Figura 21) é um dos indicadores biológicos de qualidade da água, apesar de ser menos acurado que o Coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. O coeficiente de correlação de Spearman calculado para avaliar a correlação entre os parâmetros Coliformes totais e Indicador fecal (composto por valores de Coliformes termotolerantes e *E. coli*) foi igual a 0,767, o que mostra uma correlação forte.

A distribuição dos valores de Coliformes totais por bacia hidrográfica apresentada no gráfico *box-plot* evidencia medianas acima de 1000 NPM/100 mL. Na DN COPAM 10/1986, última norma com padrão para este parâmetro, as águas doces de classe 1 tinham limite de 1000 coliformes totais por 100 mililitros em 80% ou mais de pelo menos cinco amostras mensais colhidas em qualquer mês. Ainda, nota-se grande quantidade de *outliers* abaixo do limite inferior do gráfico, o que aponta para um padrão de altos valores de Coliformes totais reiterados, em especial nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco.

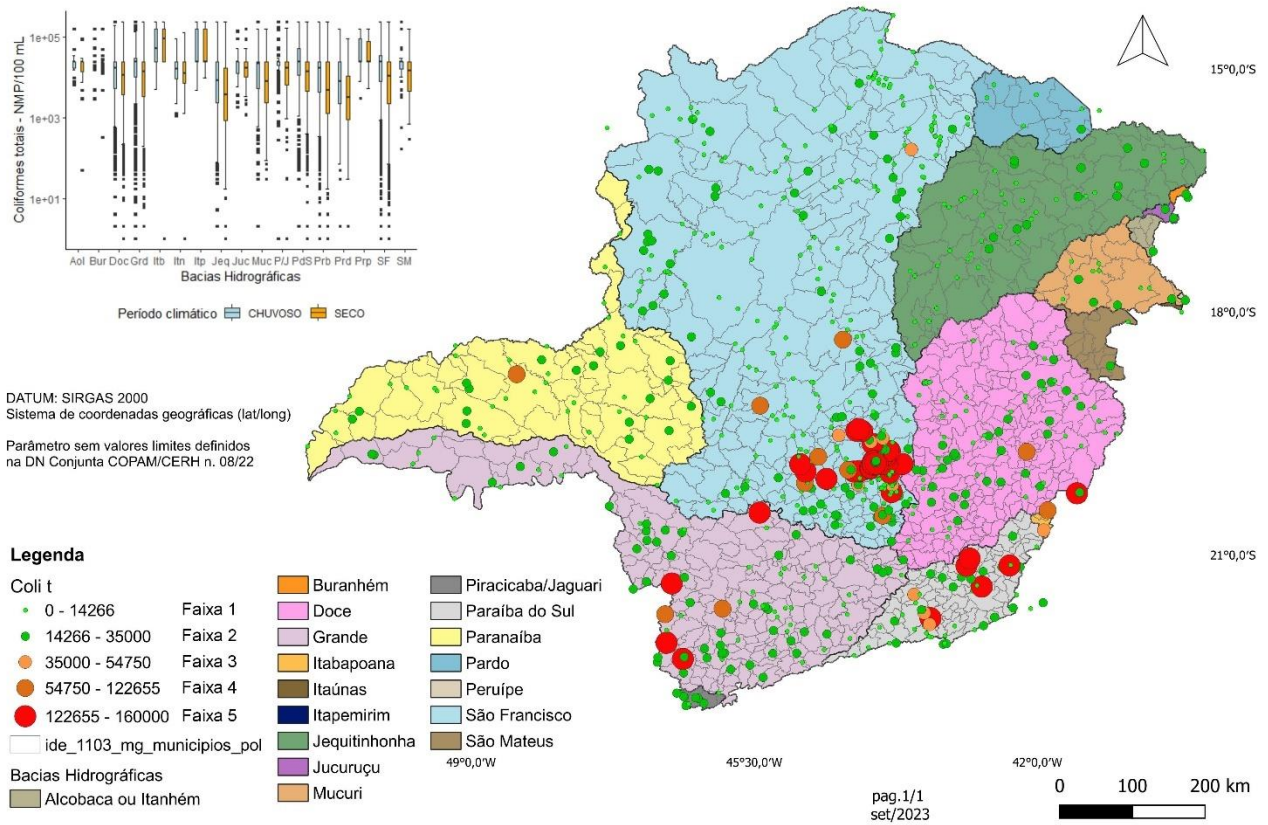
A distribuição das medianas históricas mostra clara concentração de estações de monitoramento com valores na faixa 5 na porção sul do estado, precisamente nas bacias dos rios Grande, Itapemirim, Paraíba do Sul e São Francisco, com quantidade de Coliformes totais que chega a 160.000 NPM/100 mL.

Os resultados de autocorrelação mostram a formação de três *clusters* do tipo alto-alto. Um deles está na BH do Rio Grande, com apenas uma estação, na CH do Entorno do reservatório de Furnas. O segundo *cluster* do tipo alto-alto formou-se na BH do Rio Paraíba do Sul, com estações na calha do rio Pomba e outras adjacentes, todas na circunscrição dos rios Pomba e Muriaé. Por fim, o maior *cluster* alto-alto formou-se na porção central da bacia do São Francisco, nas circunscrições dos rios das Velhas, Paraopeba e Pará, sobre a RMBH e adjacências. Como já notado para outros parâmetros, este *cluster* está limitado por *outliers* do tipo baixo-alto. Há, ainda, alguns *outliers* do tipo alto-baixo espalhados no estado, indicando degradação pontual da qualidade da água nestes locais sob o aspecto da ocorrência de altos valores de Coliformes totais.

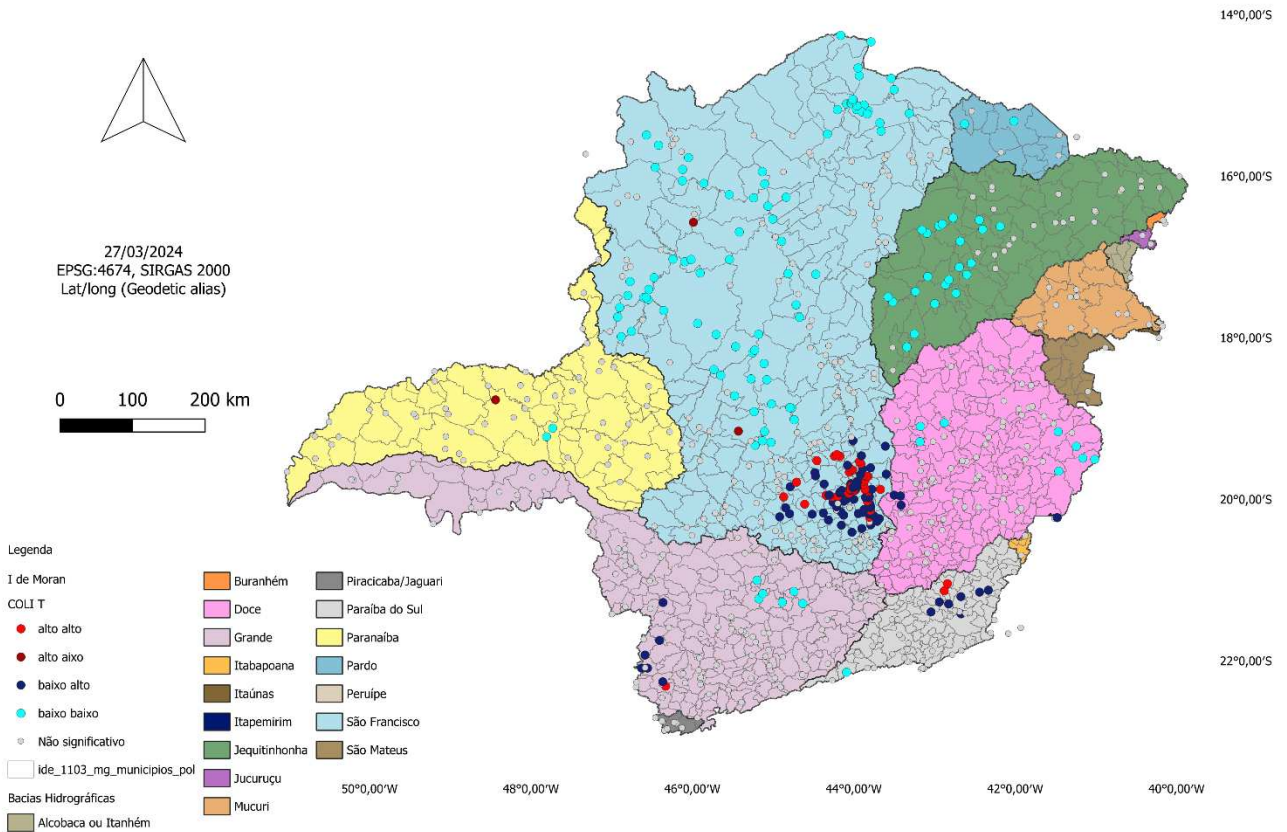
O parâmetro Dureza, em suas três apresentações, não tem limite legais estabelecidos. No Brasil, salvo algumas exceções, como a região norte do estado de Minas Gerais, as águas superficiais são brandas (< 50 mg/l de CaCO₃) ou moderadamente duras (entre 50 e 150 mg/l de CaCO₃), com valores comumente inferiores a 100 mg/l CaCO₃ (Libânio, 2010).

Figura 21 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Coliformes totais

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Coliformes totais (NMP/100 mL) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Coliformes totais (NPM/100 mL) no Estado de Minas Gerais



Normalmente, os valores de dureza estão associados às características pedológicas e geológicas da área de drenagem que contribui para o volume de água no corpo hídrico; por estar associada principalmente a Cálcio e Magnésio, valores mais altos de dureza ocorrem em áreas cársticas (CETESB, 2016). Nos gráficos *box-plot* para os parâmetros Dureza total (Figura 22), Dureza de cálcio (Figura 23) e Dureza de magnésio (Figura 24), nota-se semelhança na distribuição dos valores medidos, com medianas entre 7 e 50 mg/l, o que as classificaria como águas brandas.

Para a Dureza de Cálcio, as medianas históricas na faixa 5, de maior valor, ocorrem de forma concentrada em estações na BH do Rio São Francisco e, pontualmente, na BH do Rio Jequitinhonha. Já a Dureza de Magnésio apresenta maior número de estações nas faixas de valores 4 e 5, com ocorrências nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco.

A Dureza de Magnésio é o parâmetro com os menores valores, chegando a, no máximo, 207,1 mg/l, enquanto a Dureza de Cálcio e a Dureza total tem valores quase cinco vezes maiores. Isto indica que a Dureza total no estado está associada em maior parcela ao cálcio. Este elemento ocorre naturalmente em rochas carbonáticas, as quais, em Minas Gerais, estão justamente na BH do Rio São Francisco, associadas aos grupos Bambuí e Carandaí, mas também em outras bacias, como a do rio Paranaíba (Campello, 2018).

A análise de autocorrelação para o parâmetro Dureza de Cálcio resultou na formação de dois *clusters* do tipo alto-alto na Bacia do Rio São Francisco, com um deles nas CHs do Rio Verde Grande, dos Rios Jequitai e Pacuí e do Rio Pandeiros e outro nas circunscrições dos rios das Velhas e Paraopeba. Ambos estão delimitados por *outliers* do tipo baixo-alto. Nota-se que há *outliers* do tipo alto-baixo em regiões do estado onde não é descrita a presença de rochas carbonáticas (Campello, 2018), como nas CHs do Médio e Baixo rio Jequitinhonha, do rio Caratinga, dos rios Pomba e Muriaé, do rio Verde e do entorno do reservatório de Furnas. Estes *outliers* merecem atenção ao tratar-se de dureza da água, pois apontam degradação pontual em relação a esta variável e, *a priori*, não estão associados a características pedológicas e geológicas de suas áreas de ocorrência.

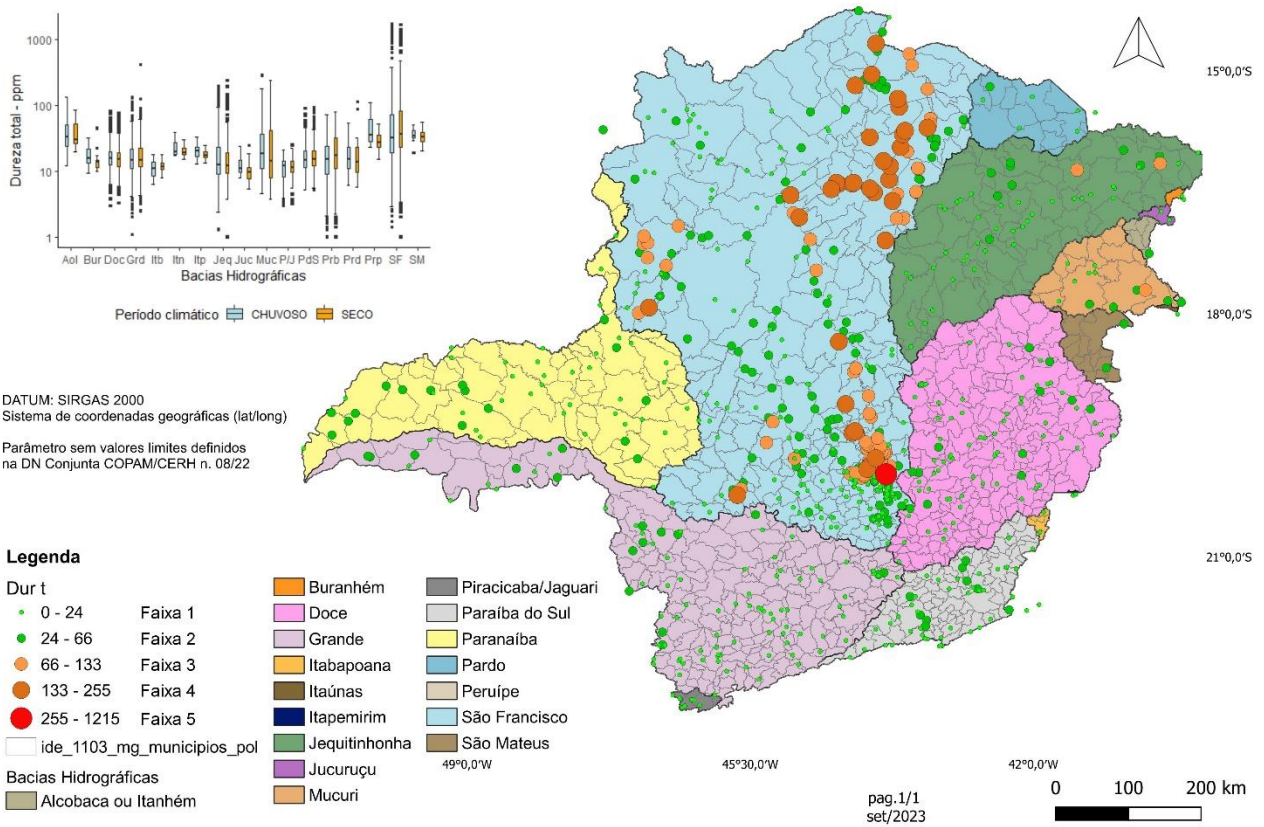
A análise de autocorrelação para o parâmetro e Dureza total é semelhante à de Dureza do Cálcio, com formação de *clusters* do tipo alto-alto na Bacia do Rio São Francisco, um deles nas CHs do Rio Verde Grande, dos Rios Jequitai e Pacuí e do Rio Pandeiros e outro nas circunscrições dos rios das Velhas e Paraopeba. Ainda, houve a formação de um *cluster*

alto-alto unitário na CH do Rio Pará. Todos os *clusters* estão delimitados por *outliers* do tipo baixo-alto.

Já para Dureza do Magnésio, houve a formação de seis *clusters* do tipo alto-alto nas bacias dos rios Jequitinhonha, Mucuri, São Francisco e Paranaíba. Os *outliers* do tipo baixo-alto não delimitam a área de ocorrência dos *clusters* alto-alto, mas estes emaranham-se, tornando desafiadora a interpretação dos resultados. Há, ainda, nove *outliers* do tipo alto-baixo, que indicam valores atípicos de ocorrência pontual local em comparação com o entorno.

Figura 22 – Mapas de análise espacial das medianas Dureza total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Dureza total (ppm) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Dureza total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

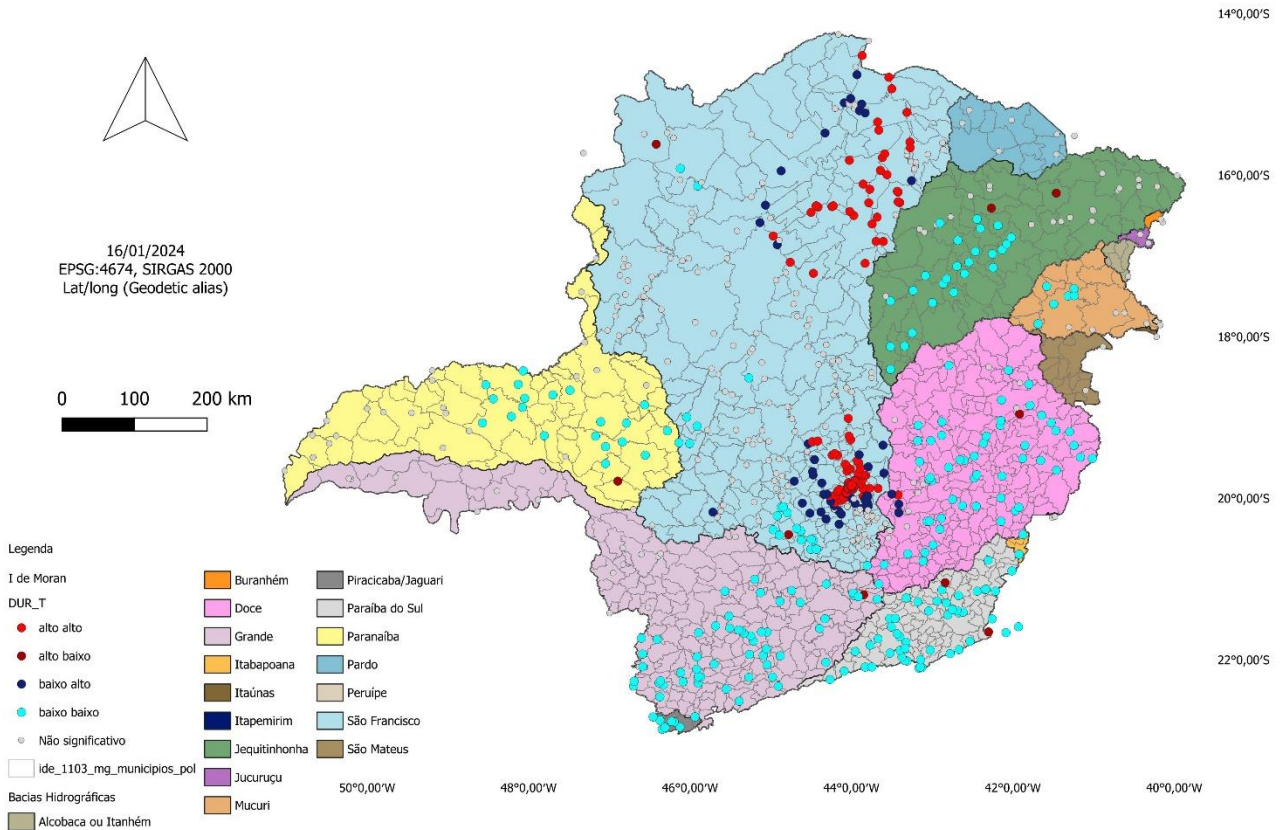
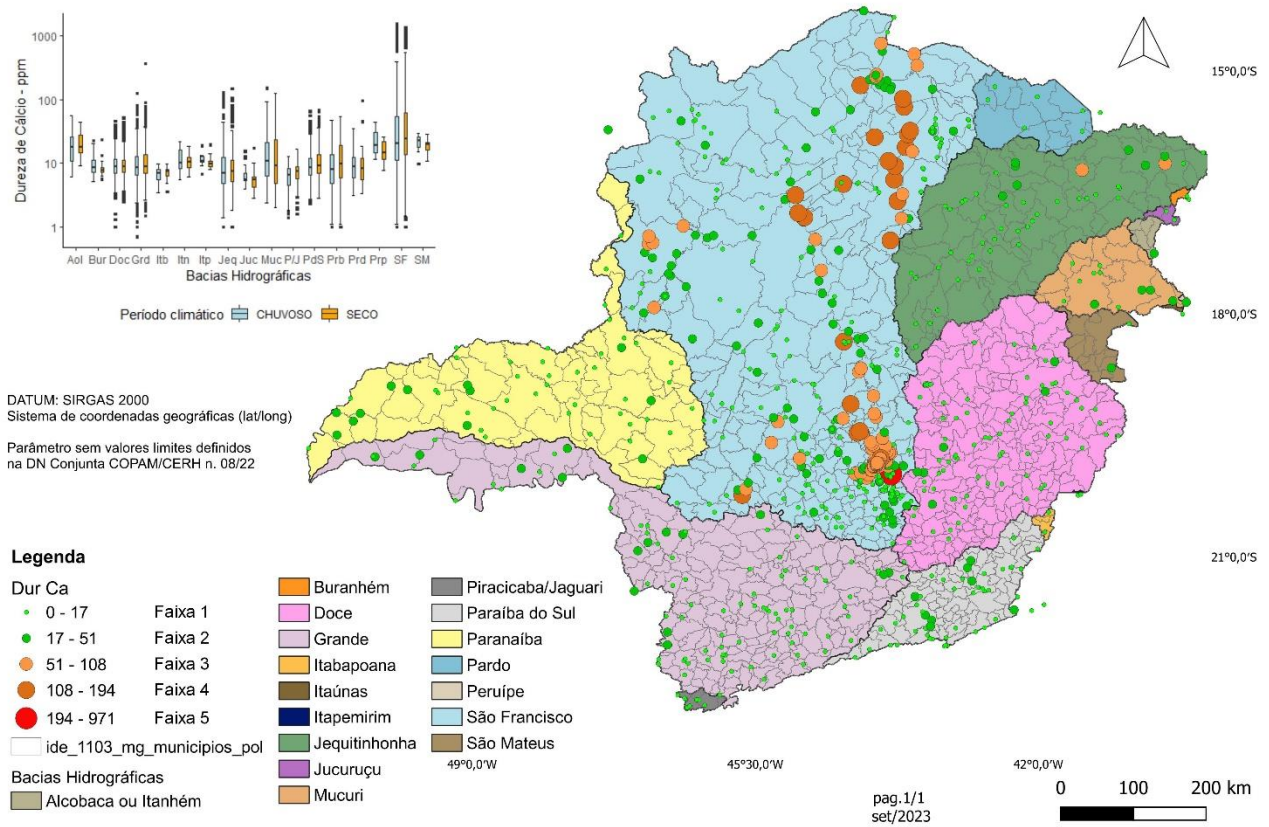


Figura 23 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Dureza de Cálcio

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Dureza de cálcio (ppm) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Dureza de Cálcio (ppm) no Estado de Minas Gerais

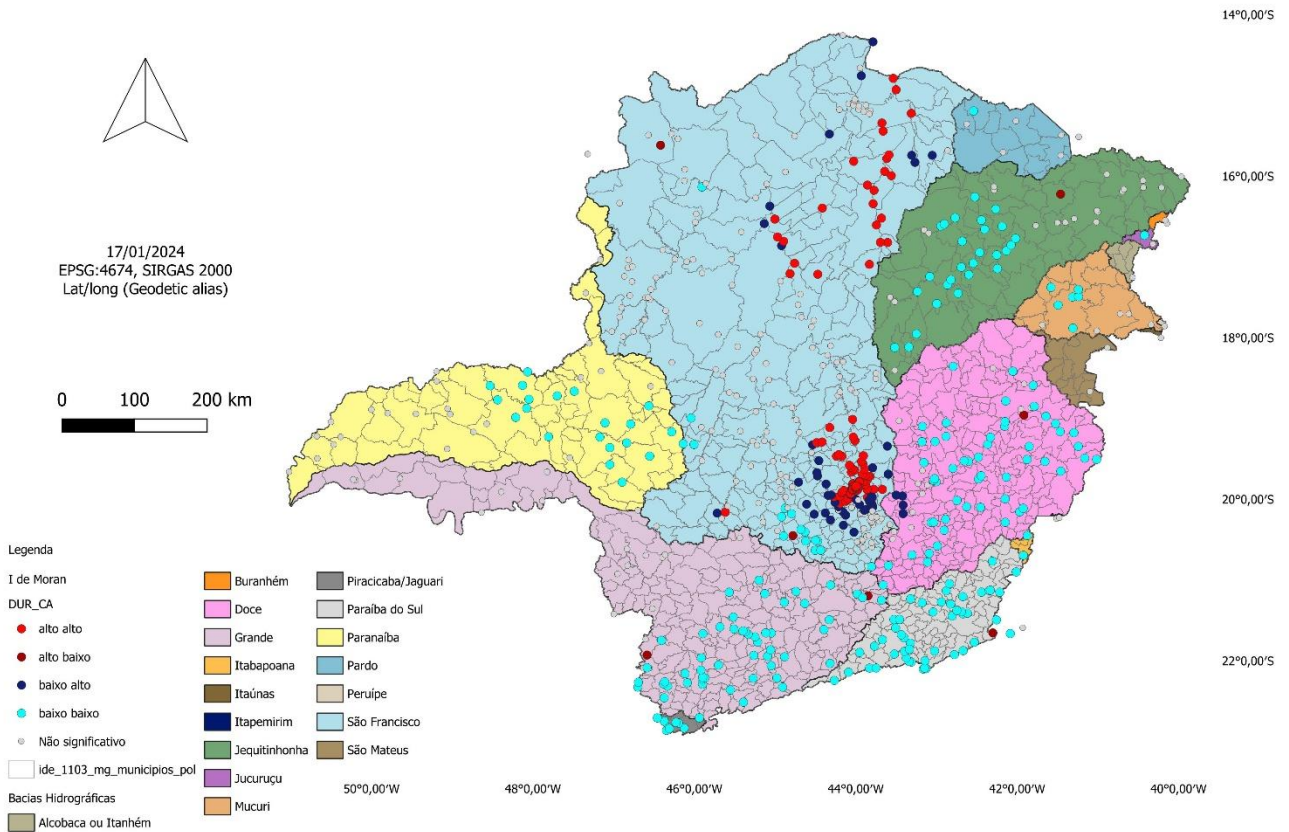
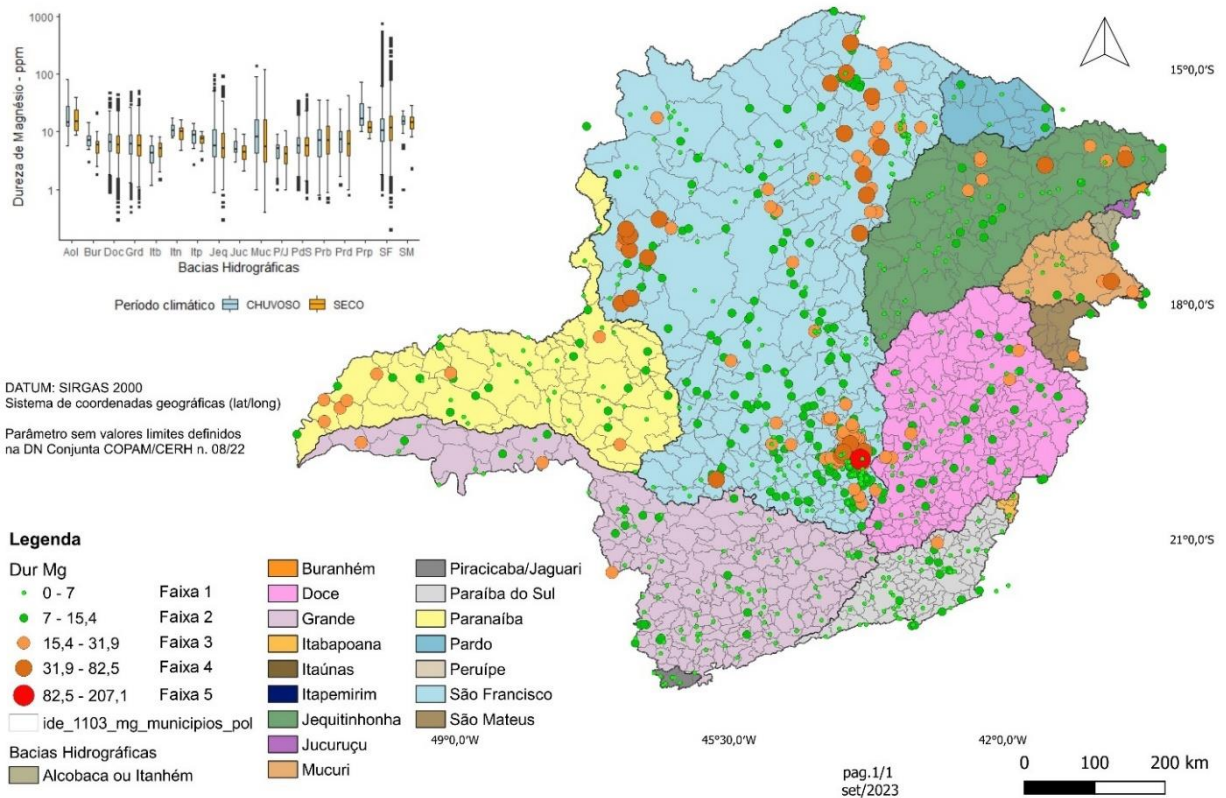
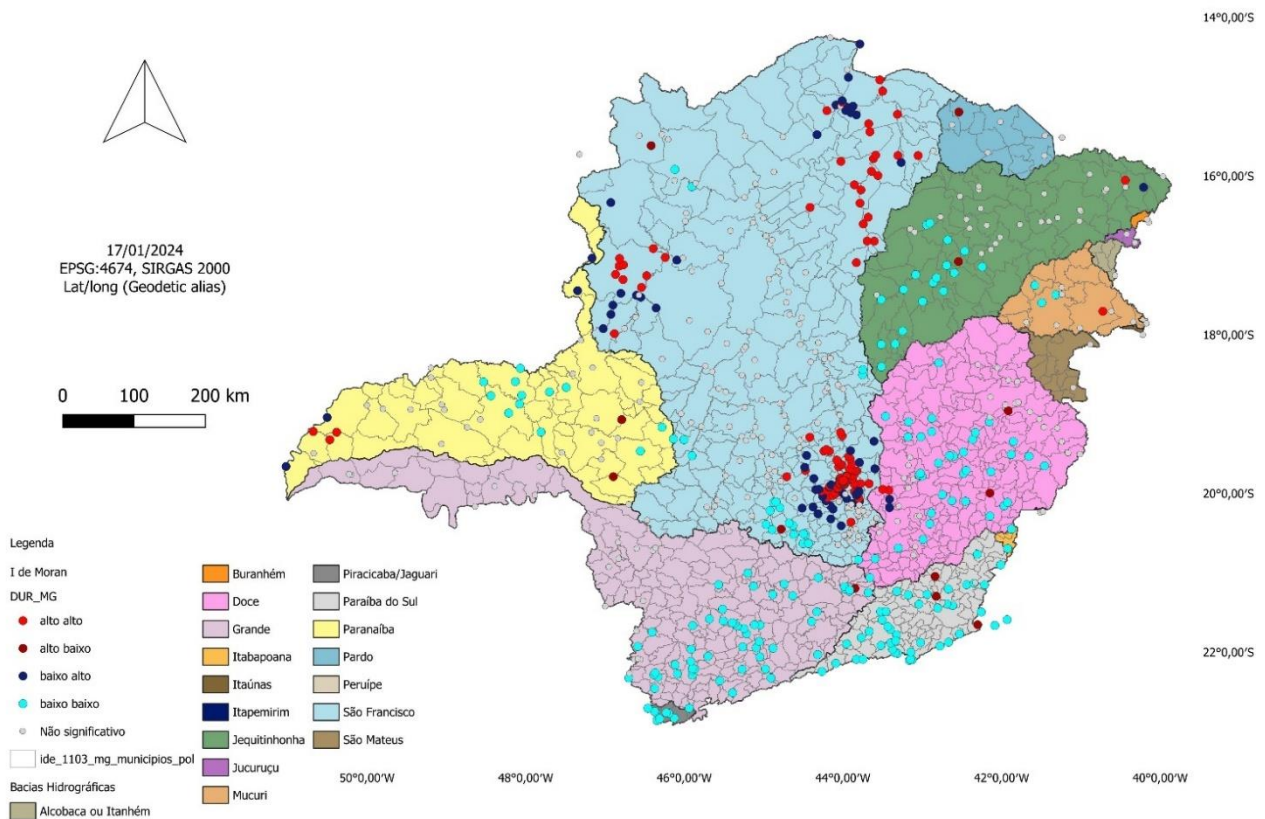


Figura 24 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Dureza de Magnésio

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Dureza de magnésio (ppm) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Dureza de Magnésio (ppm) no Estado de Minas Gerais



Há uma variação notável entre as Bacias Hidrográficas estudadas com relação à amplitude dos valores do parâmetro DQO (Figura 25). As medianas têm valores entre 10 e 90 mg/l, sendo estes mais altos em período chuvoso comparado ao período seco. Os *outliers* estão quase todos acima do limite superior e em alto número nas bacias dos rios Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco, atingindo valores maiores que 1000 mg/l. Não há limites dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 para este parâmetro. Destaca-se, no entanto, que o aumento da concentração de DQO num corpo d'água deve-se principalmente a despejos de origem industrial (CETESB, 2016).

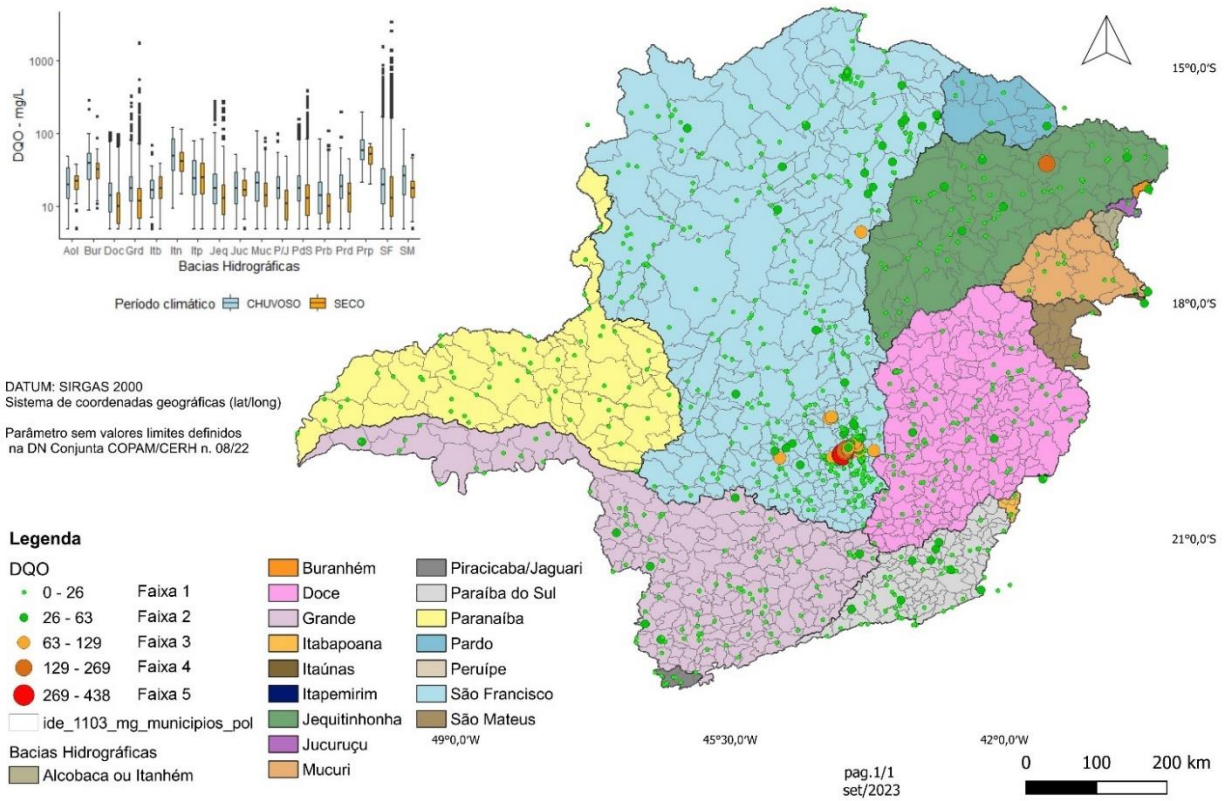
Especialmente, nota-se que quase a totalidade das estações apresentam medianas com valores de até 63 mg/l. Um pequeno número delas, concentradas na porção central do estado, têm valores nas faixas 3 e 4 e apenas uma está na faixa 5. O resultado da aplicação do I de Moran local mostra um *cluster* do tipo alto-alto, na BH do Rio São Francisco nas CHs dos rios das Velhas, Paraopeba e Pará. Este *cluster* está entremeado por *outliers* do tipo baixo-alto, o que demanda uma análise pormenorizada dos resultados nestas estações para delinear a dinâmica apresentada. Há três *outliers* do tipo alto-baixo nas bacias dos rios Doce, Grande e Paranaíba, apontando para degradações pontuais da qualidade da água. Os resultados para este parâmetro são melhor analisados quanto em conjunto aos de Demanda Bioquímica de Oxigênio.

A Feofitina a é um parâmetro correlato à Clorofila a, estando sua importância associada à possibilidade de se obter uma medida mais exata da Clorofila a. Este parâmetro apresenta medianas semelhantes entre bacias, de aproximadamente 1 ug/L, amplitudes variadas e grande quantidade de *outliers* superiores e inferiores nas Bacias Hidrográficas dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco.

A distribuição espacial dos valores de medianas históricas do parâmetro Feofitina a (Figura 26) apresentam padrão semelhante ao da Clorofila a na calha do rio das Velhas, em que uma estação próxima à nascente do rio tem valores na faixa 5, e as estações a jusante têm valores nas faixas 4 e 3 até a confluência com o rio São Francisco. No entanto, na calha do São Francisco, a partir da confluência com o Rio das Velhas, os valores das medianas voltam a aumentar; há uma estação na faixa 5, seguida de estações nas faixas 4 e 3. Pela dispersão dos valores nas faixas 3, nota-se a importância de analisar estes resultados com auxílio do I de Moran local.

Figura 25 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de DQO

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Demanda Química de Oxigênio (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Demanda Química de Oxigênio (mg/L) no Estado de Minas Gerais

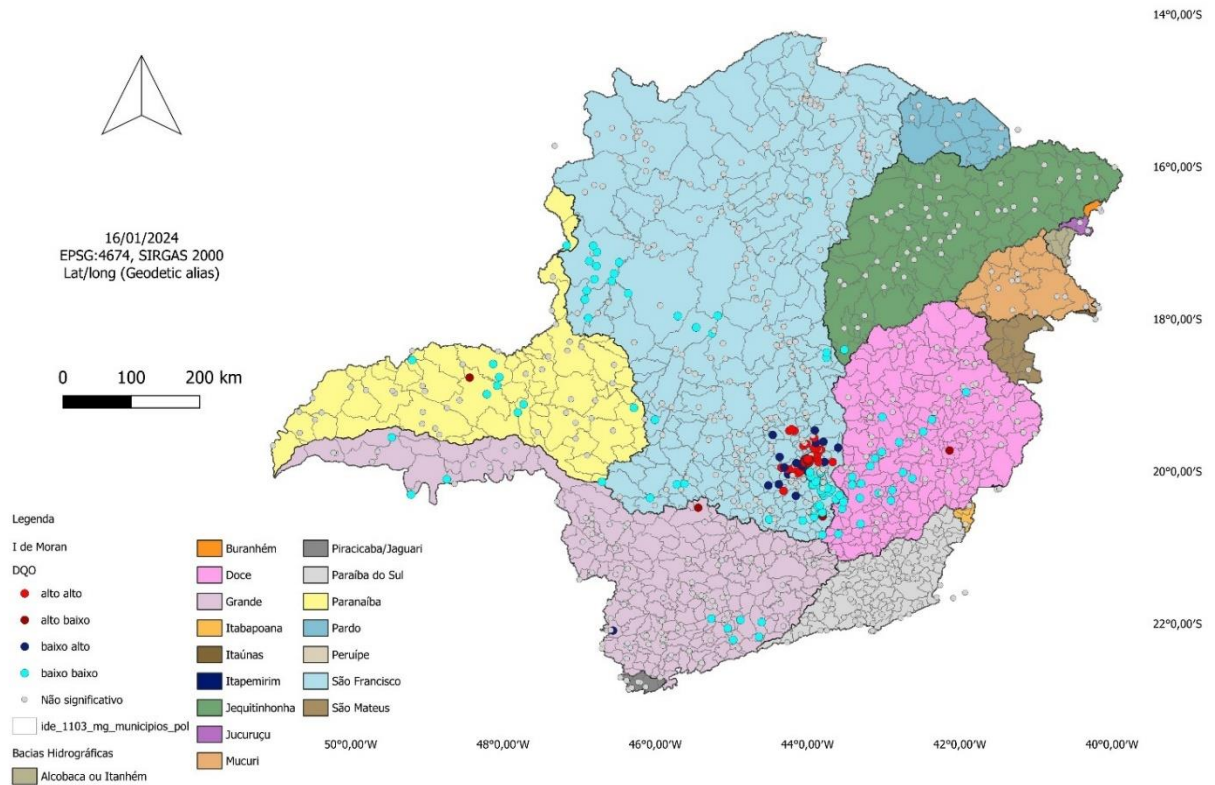
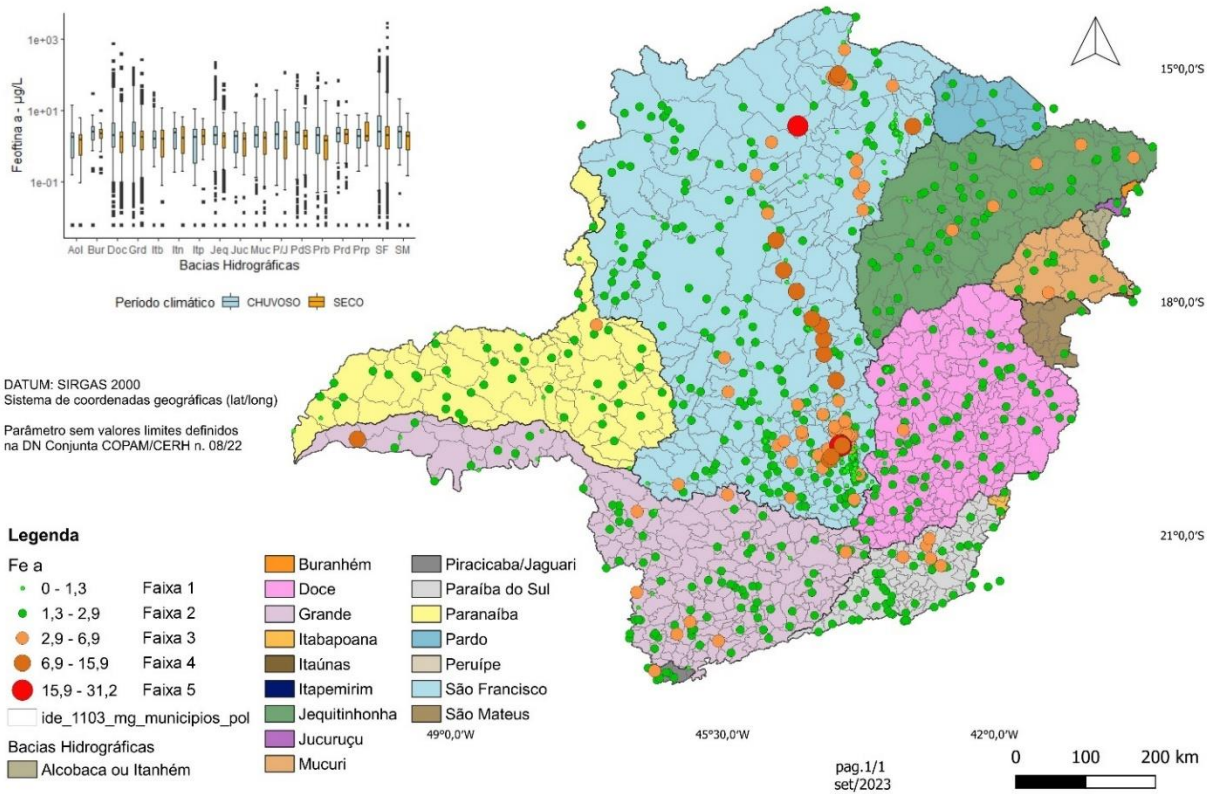
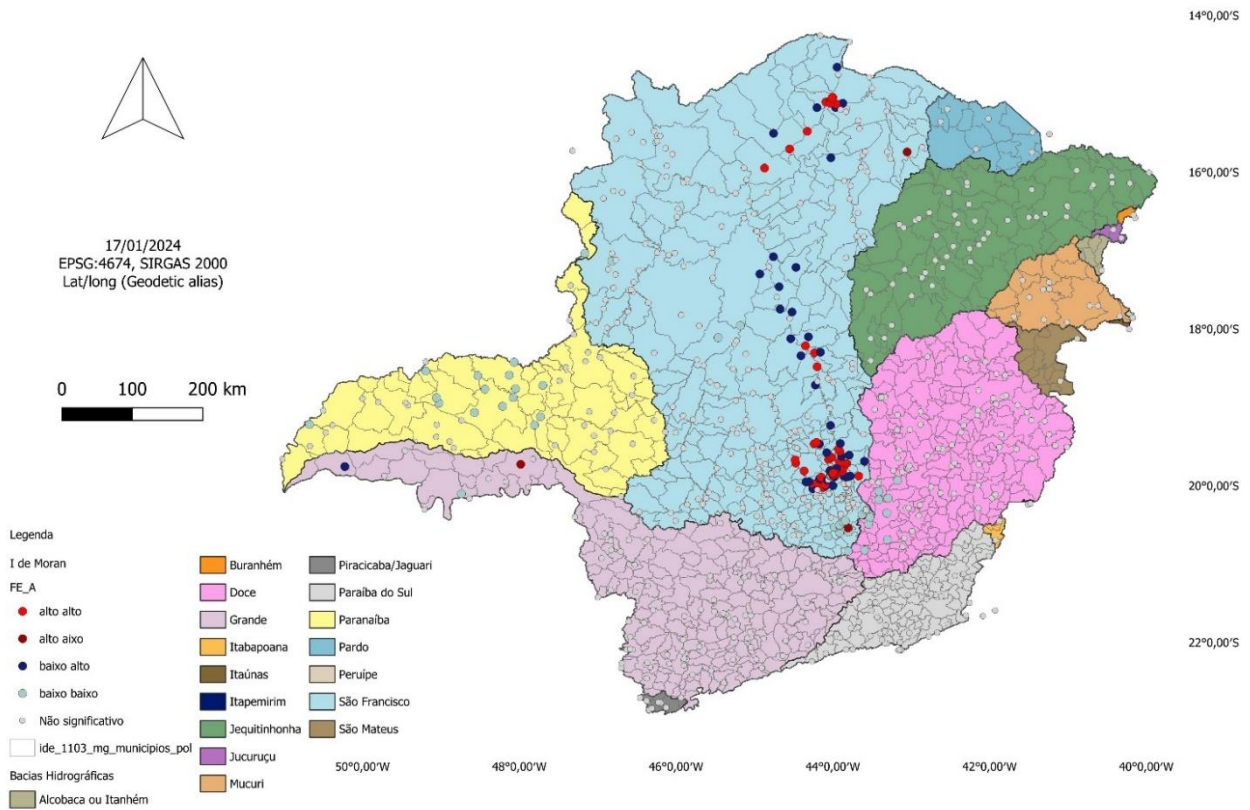


Figura 26 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Feoftina a

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Feoftina a ($\mu\text{g/L}$) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Feoftina a (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Ainda para o parâmetro Feofitina a, os resultados e autocorrelação espacial mostram a formação de três *clusters* do tipo alto-alto na BH do Rio São Francisco: um sobre a calha do rio São Francisco, na CH do Rio Pandeiros, e dois sobre a calha do rio das Velhas e adjacências, na circunscrição homônima. Estes *clusters* estão limitados por *outliers* do tipo baixo-alto. Destacam-se ainda três *outliers* do tipo alto-baixo nas bacias dos rios São Francisco e Grande.

O parâmetro Magnésio total (Figura 27) está ligado aos parâmetros Alcalinidade total, Alcalinidade de Bicarbonato, Dureza total e Dureza de Magnésio. Os coeficientes de correlação linear de Spearman destas duplas de variáveis são iguais a 0,79053 entre Alcalinidade total e Magnésio (correlação forte); 0,7897413 entre Alcalinidade de bicarbonato e Magnésio (correlação forte); 0,9987411 entre Dureza de Magnésio e Magnésio (correlação muito forte); e 0,8783866 entre Dureza total e Magnésio (correlação muito forte), considerando uma base de cálculo de 18.458 valores. Nota-se pelo *box-plot* que as medianas por BH têm valores entre 1,0 mg/l e 10,0 mg/l, com pouca diferença entre os períodos climáticos. A maior quantidade de *outliers*, tanto além do limite inferior quanto do superior, está na BH do Rio São Francisco, com valores que chegam a 100 mg/l.

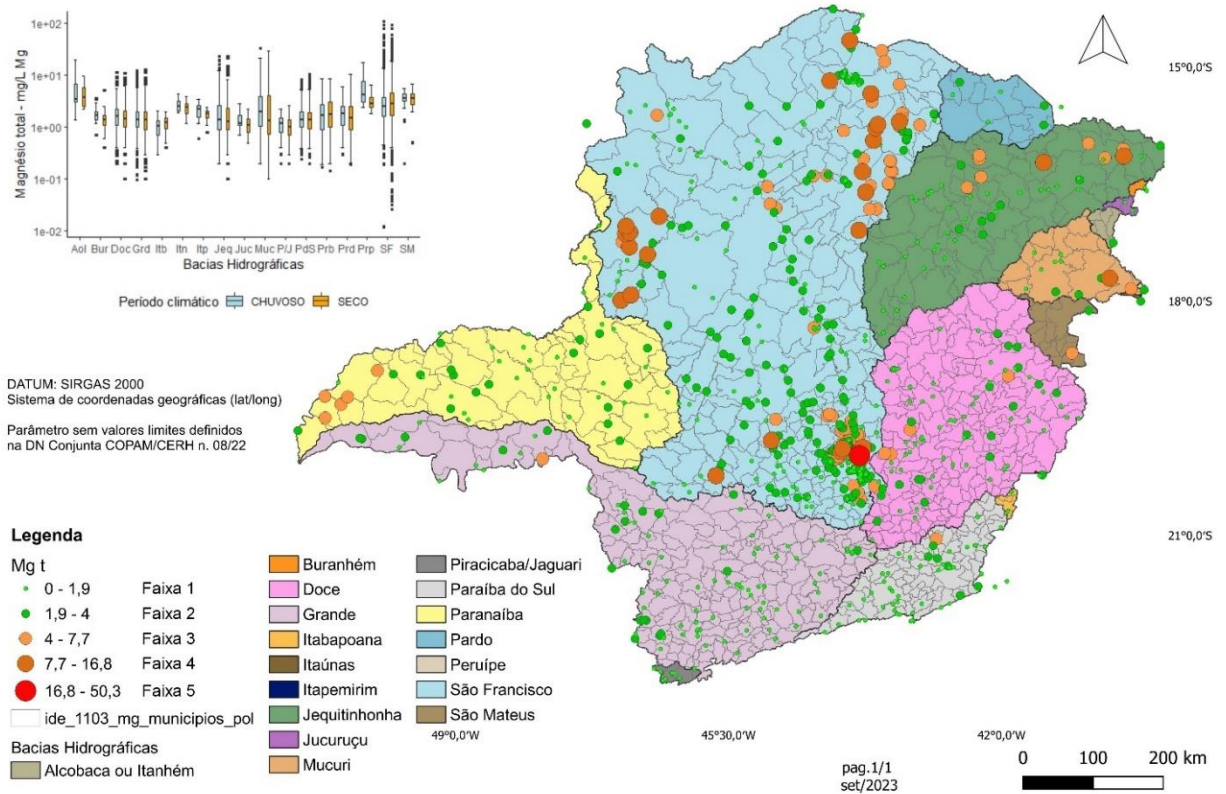
A distribuição espacial, de fato, mostra concentração de estações com medianas históricas nas faixas 4 e 5, de maiores valores, em suas porções norte e central. Há ainda estações com altos valores de medianas históricas nas bacias dos rios Jequitinhonha e Mucuri. A análise de autocorrelação resultou na formação de três *clusters* do tipo alto-alto apenas na BH do Rio São Francisco: um na CH do rio Verde Grande, outro nas CHs dos rios das Velhas e Paraopeba, e o último na CH do Rio Paracatu. Os três estão limitados por *outliers* do tipo baixo-alto. Há esparsos *outliers* do tipo alto-baixo, que indicam degradação pontual da água considerando o parâmetro Magnésio total.

A amplitude interquartil apresenta-se variável entre as bacias, estando entre os valores 0,1 e 1 mg/l. As medianas por bacia hidrográfica estão entre 0,5 e 1,0 mg/l; entretanto, há um número significativo de *outliers* acima do limite superior nas bacias dos rios Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco, atingido até 100 mg/l.

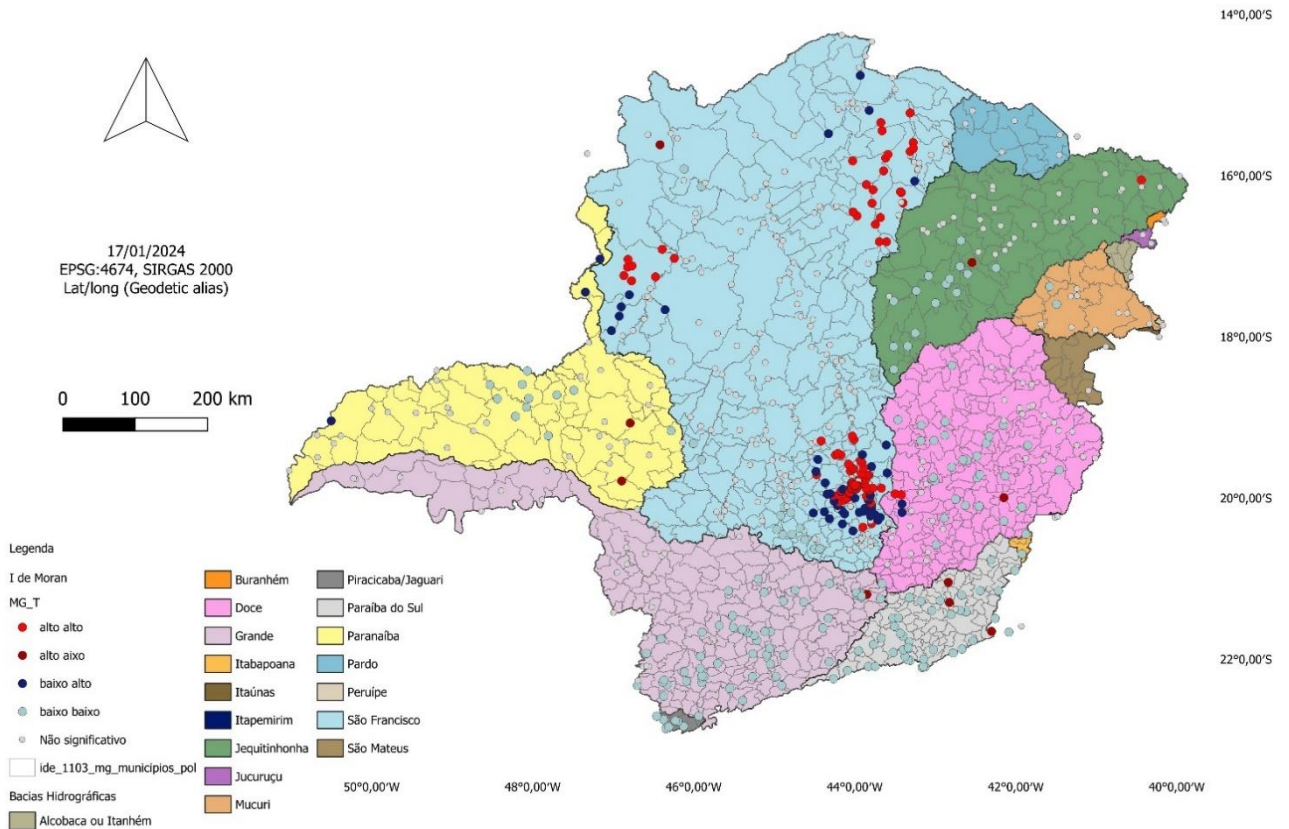
A distribuição espacial das medianas históricas mostra apenas quatro estações com valores nas faixas 4 e 5, acima de 2,19 mg/l, todas na BH do Rio São Francisco, especificamente sobre a RMBH e na região de Januária. A autocorrelação apresenta a

Figura 27 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Magnésio total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Magnésio total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Magnésio total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



formação de apenas um *cluster* do tipo alto-alto com alta concentração de estações localizadas nos municípios de Belo Horizonte e Contagem. Este *cluster* está bem delimitado ao sul por *outliers* do tipo baixo-alto. Pela alta ocupação urbana e industrialização da região, é provável que estes valores sejam derivados de lançamentos de efluentes domésticos e industriais nos corpos hídricos locais.

Os efluentes domésticos constituem, em geral, a principal fonte de Nitrogênio orgânico nas águas superficiais, já que contêm proteínas. Outra fonte menos importante são os efluentes industriais de atividades químicas, petroquímicas, siderúrgicas, farmacêuticas, alimentícias e de curtumes. Esta forma é reduzida e sua ocorrência indica que o foco de poluição se encontra próximo (CETESB, 2016). Segundo Libânio (2010), as concentrações de Nitrogênio orgânico nas águas superficiais costumam ser abaixo de 2 mg/l.

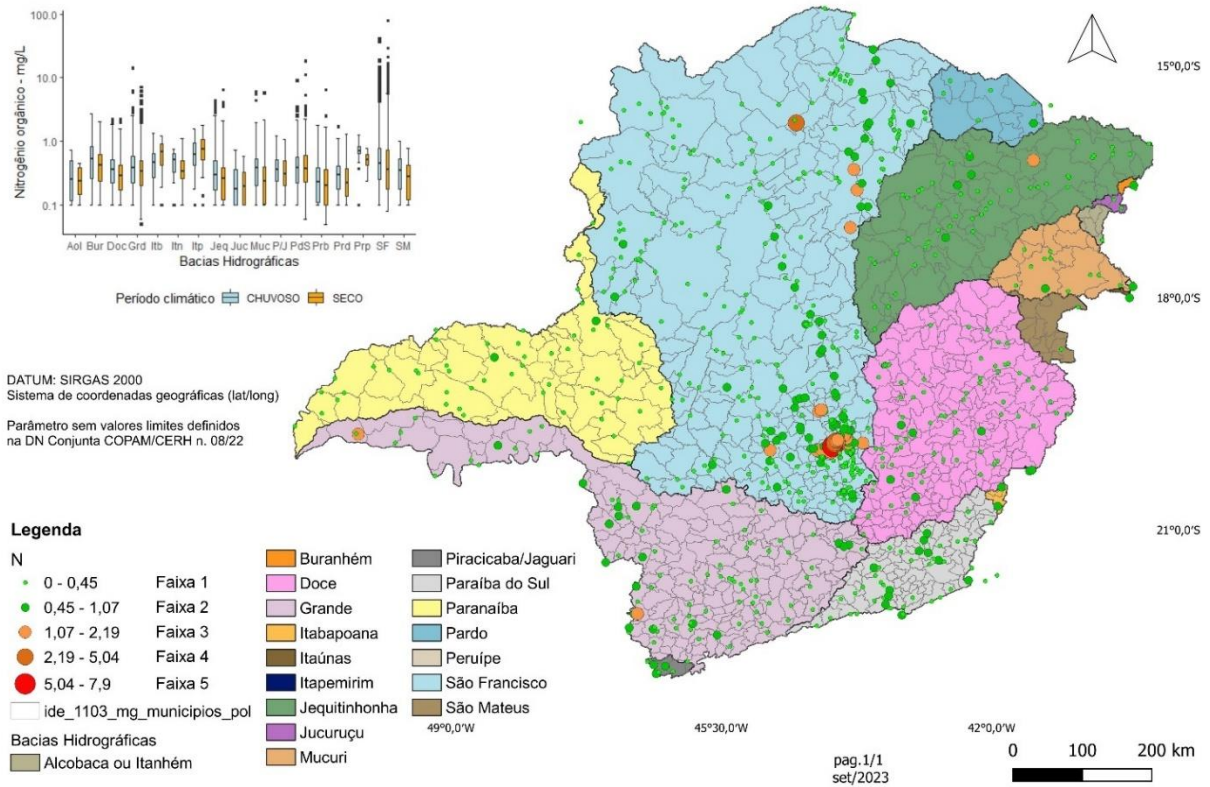
O *box-plot* com dados de Potássio dissolvido (Figura 29) mostram alta variabilidade entre as BHs, com medianas que variam de 1 a 10 mg/l. Nas bacias dos rios Jequitinhonha e São Francisco, há grande amplitude dos dados, dada a distância entre os limites inferior e superior. Na BH do Rio São Francisco, existe ainda grande número de *outliers*, assim como nas bacias dos rios Doce, Paraíba do Sul e Paranaíba.

A distribuição espacial dos valores das medianas históricas mostra dispersão dos dados; as estações com valores nas faixas 4 e 5, mais altas, ocorrem nas porções central e norte do estado, nas BHs dos rios Mucuri, Jequitinhonha, Prado e São Francisco. Não há limite estabelecido para Potássio dissolvido na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22; entretanto, é importante notar que as estações na faixa 5 têm valores até 30 vezes maiores que aquelas na faixa 1. Estas estações onde as medianas históricas apresentam o maior valor dentro o grupo estão nas bacias dos rios São Francisco e Jequitinhonha.

Com relação à autocorrelação, as medianas históricas do Potássio dissolvido formam sete *clusters* do tipo alto-alto nas BHs dos rios Itaúnas, Jequitinhonha, Mucuri, Prado, São Mateus e São Francisco, no leste do estado. A região oeste apresenta apenas *clusters* do tipo baixo-baixo, evidenciando a associação de altos valores do parâmetro com o local das estações amostrais. O Potássio é encontrado em baixas concentrações nas águas naturais; sais de potássio são amplamente usados na indústria de fertilizantes, sendo efluentes industriais e lixiviação em áreas agrícolas fontes de potássio dissolvido (CETESB, 2016). Entretanto, a região do estado de Minas Gerais que concentra atividades agrícolas fica justamente a oeste, onde não foram evidenciados altos valores do parâmetro Potássio. A mineração da substância ocorre especialmente na região de Araxá, BH do Rio Paranaíba.

Figura 28 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrogênio Orgânico

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Nitrogênio orgânico (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Nitrogênio orgânico (mg/L) no Estado de Minas Gerais

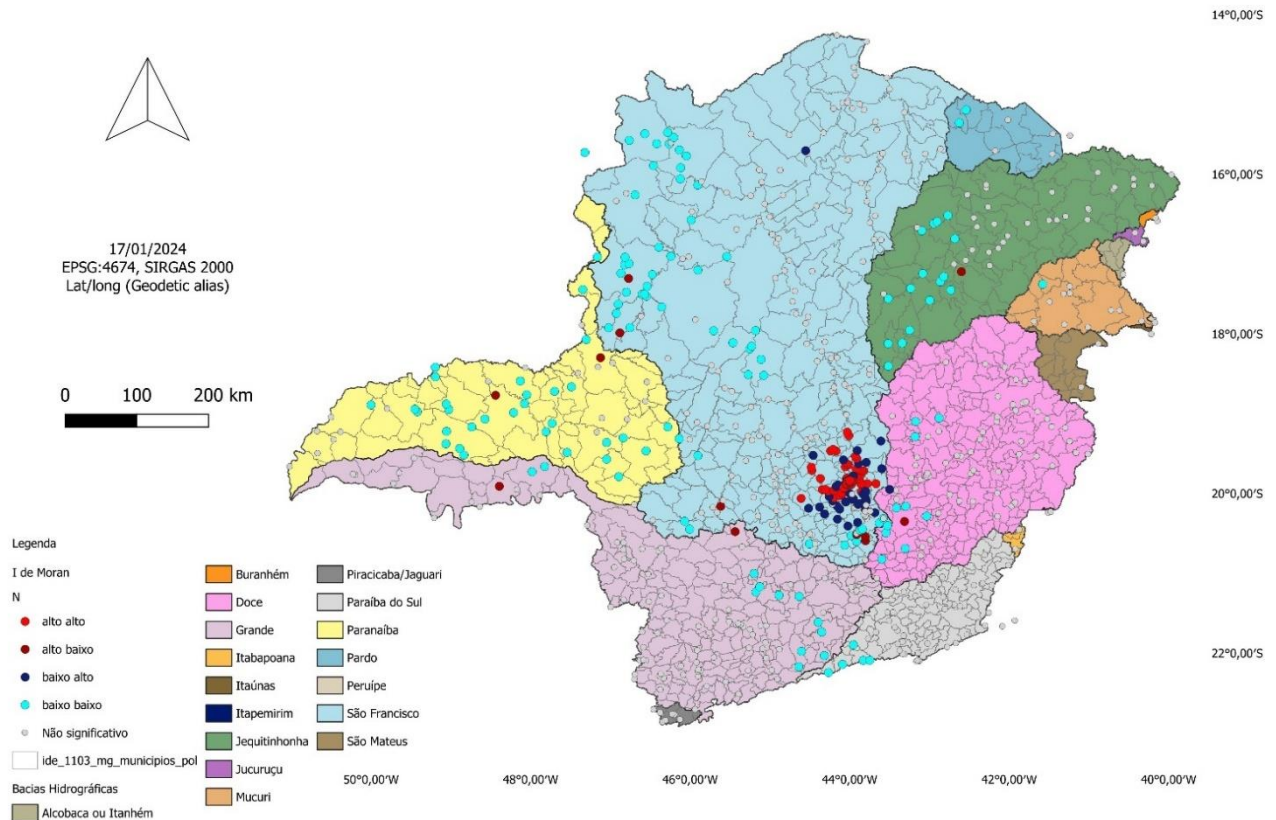
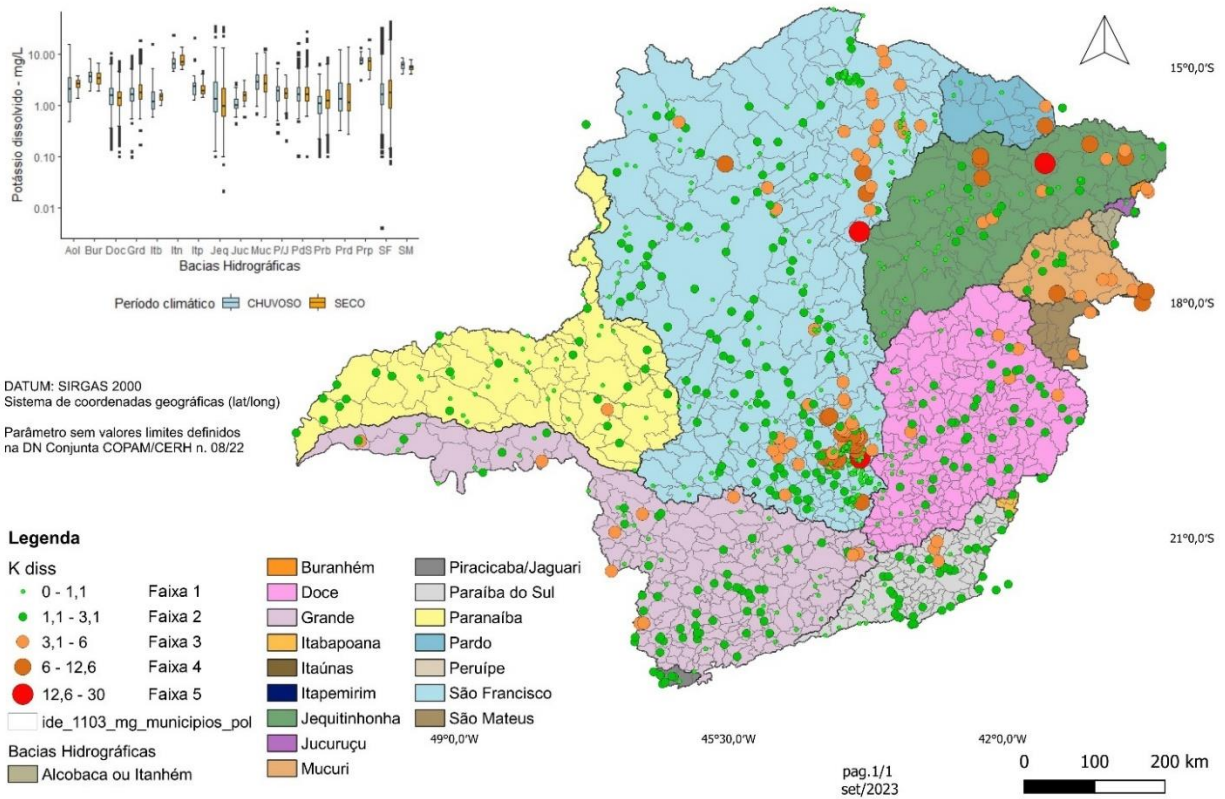
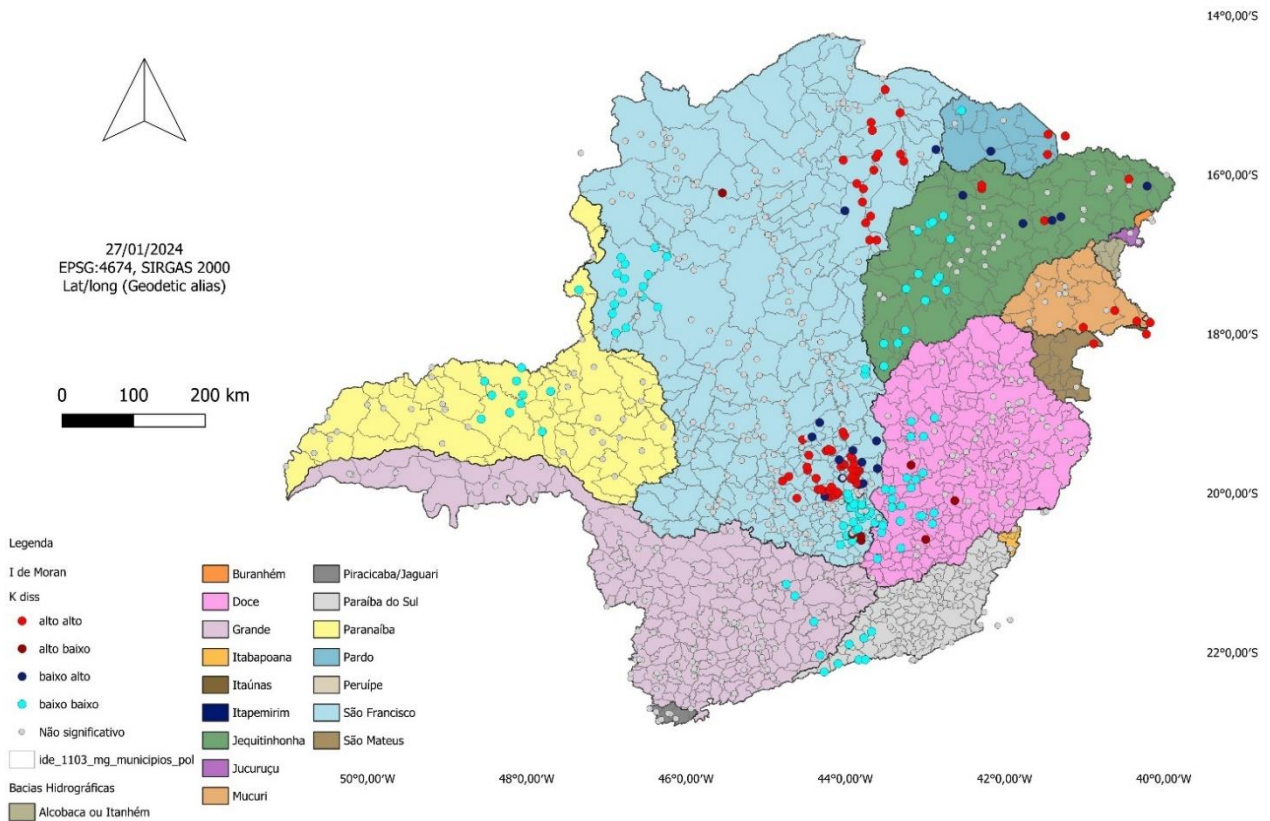


Figura 29 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Potássio Dissolvido

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Potássio dissolvido (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Potássio dissolvido (mg/L) no Estado de Minas Gerais



O *box-plot* que representa a distribuição dos valores do parâmetro Sódio dissolvido (Figura 30) em todas as estações amostrais estudadas indica que a variação entre bacias é grande, com medianas que vão de 1 a 50 mg/l. Nas bacias dos rios Grande, Doce e São Francisco, há grande número de *outliers* superiores, que atingem valores acima de 1000 mg/l de Sódio dissolvido.

Os valores de Sódio nas águas superficiais estão associados às características geológicas locais e variam de <1 mg/l a >10 mg/l. O aumento dos valores de Sódio na água pode ser consequência de lançamentos de esgotos domésticos ou de efluentes industriais, de modo que águas superficiais que recebem efluentes têm níveis de até 50 mg/l (CETESB, 2016). A distribuição espacial das medianas históricas deste parâmetro no estado mostra que grande parte das estações apresentam valores até 20,09 mg/l. Existem 30 estações com valores acima de 20,09 mg/l, as quais ocorrem nas bacias dos rios Doce, Grande, Itaúnas, Jequitinhonha, Mucuri, São Mateus e São Francisco.

O cálculo do I de Moran local retornou seis *clusters* do tipo alto-alto, sendo três deles *clusters* unitários nas bacias dos rios Pardo, Jequitinhonha e Grande. Na BH do Rio Mucuri formou-se um *cluster* alto-alto que se estende ocupando as bacias dos rios Itaúnas e São Mateus, todas vizinhas. Há dois *clusters* alto-alto na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições do rio das Velhas do rio Paraopeba e na circunscrição do rio Verde Grande. Nenhum destes *clusters* apresenta-se circundado por *outliers* do tipo baixo-alto, não apresentando delimitação exata da área de degradação da água considerando os valores de Sódio dissolvido. Há, ainda, alguns poucos *outliers* do tipo alto-baixo.

O parâmetro Sólidos totais tem grande variação de valores, conforme sua distribuição no gráfico *box-plot* (Figura 31). As medianas, que estão entre 70 e 150 mg/l, têm maiores valores em período chuvoso em comparação ao seco. As bacias hidrográficas dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco tem grande presença de *outliers* superiores, que chegam a valores de 10.000 mg/l. A distribuição espacial das medianas históricas por estação mostra concentração de valores nas faixas 4 e 5 na BH do Rio São Francisco, nas regiões central, sobre o rio das Velhas e adjacências e na região norte, próximo a Montes Claros. Ainda, há estações com valores mais altos na porção norte da bacia do Jequitinhonha.

Figura 30 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sódio Dissolvido

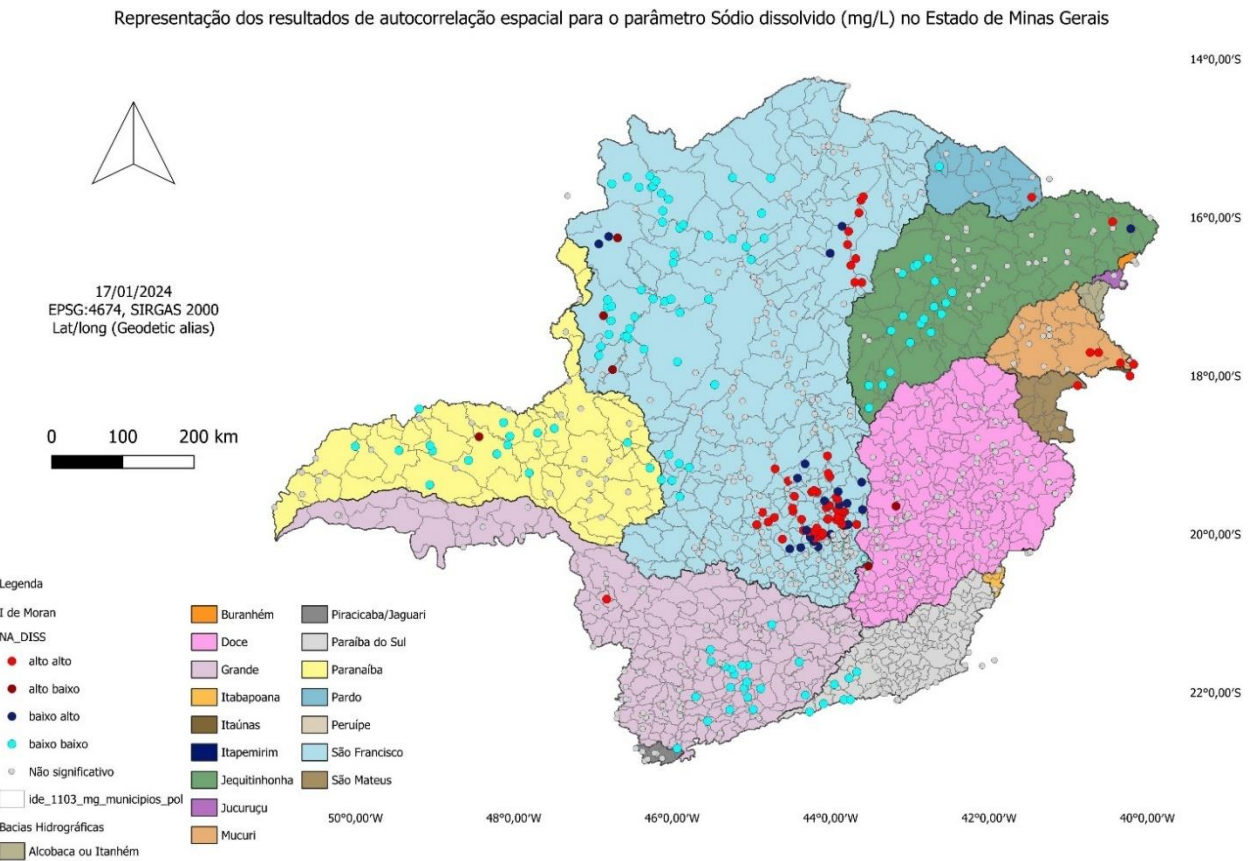
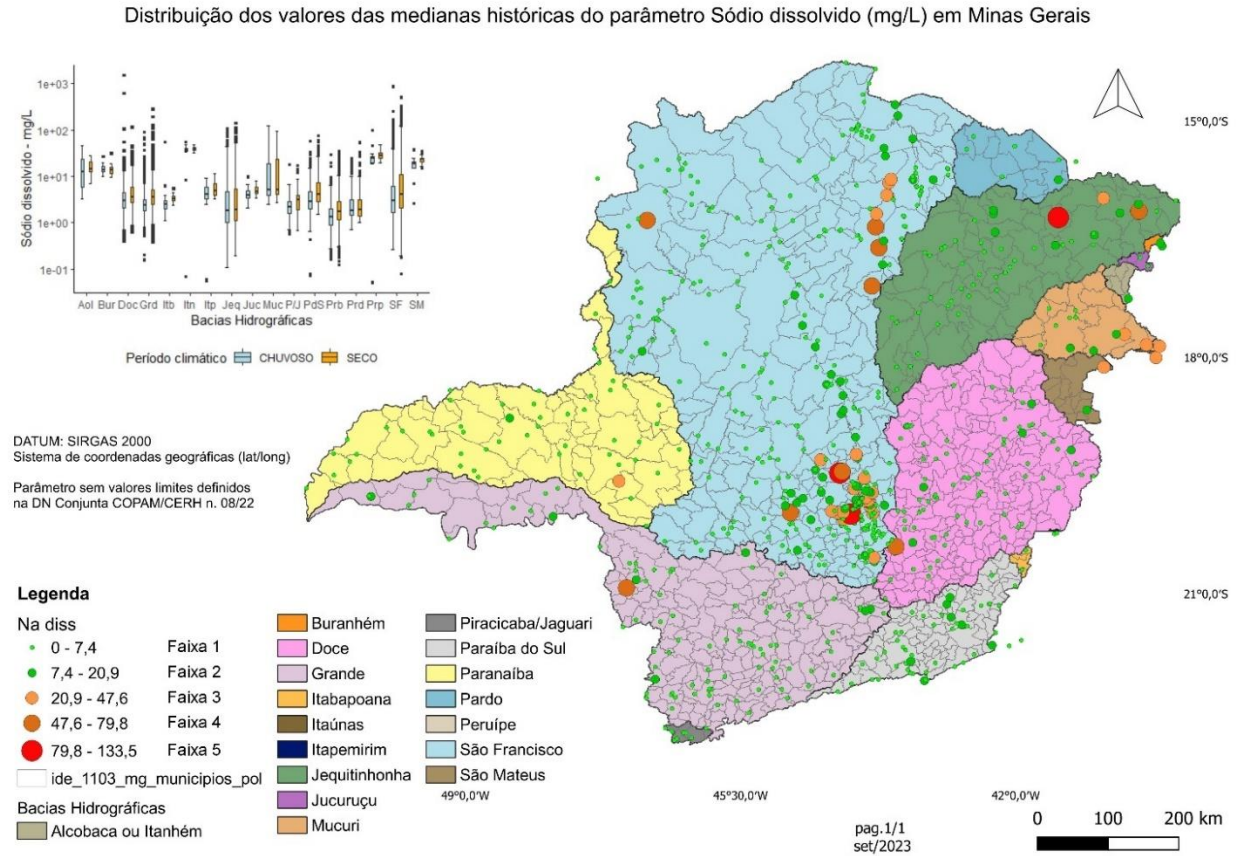
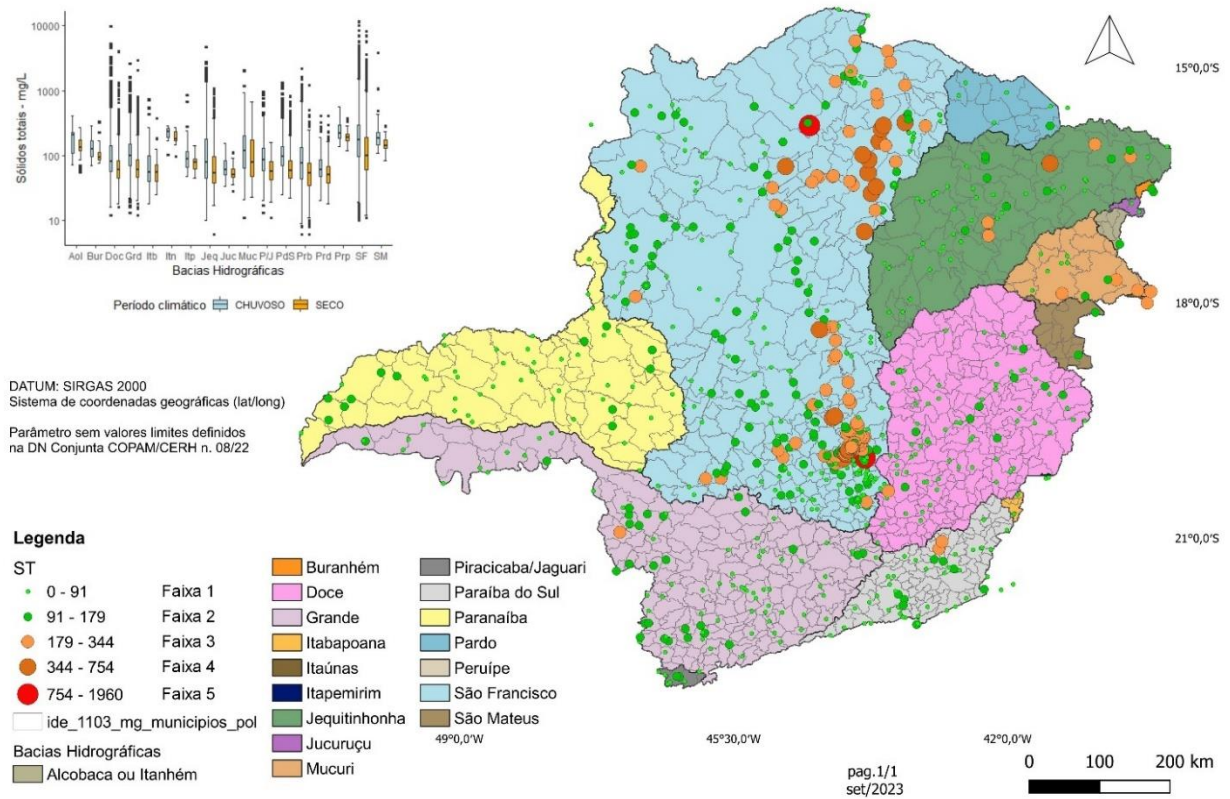
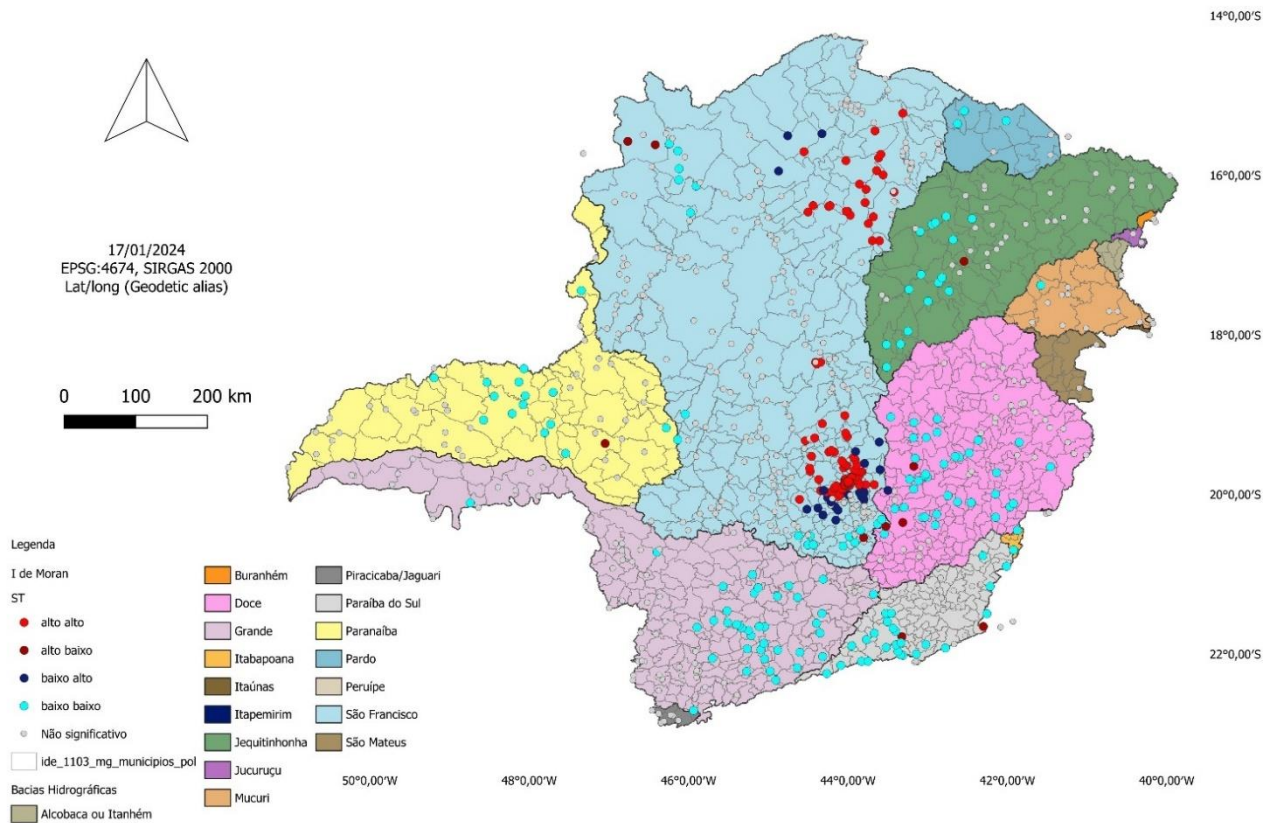


Figura 31 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sólidos totais

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Sólidos totais (mg/L) em Minas Gerais



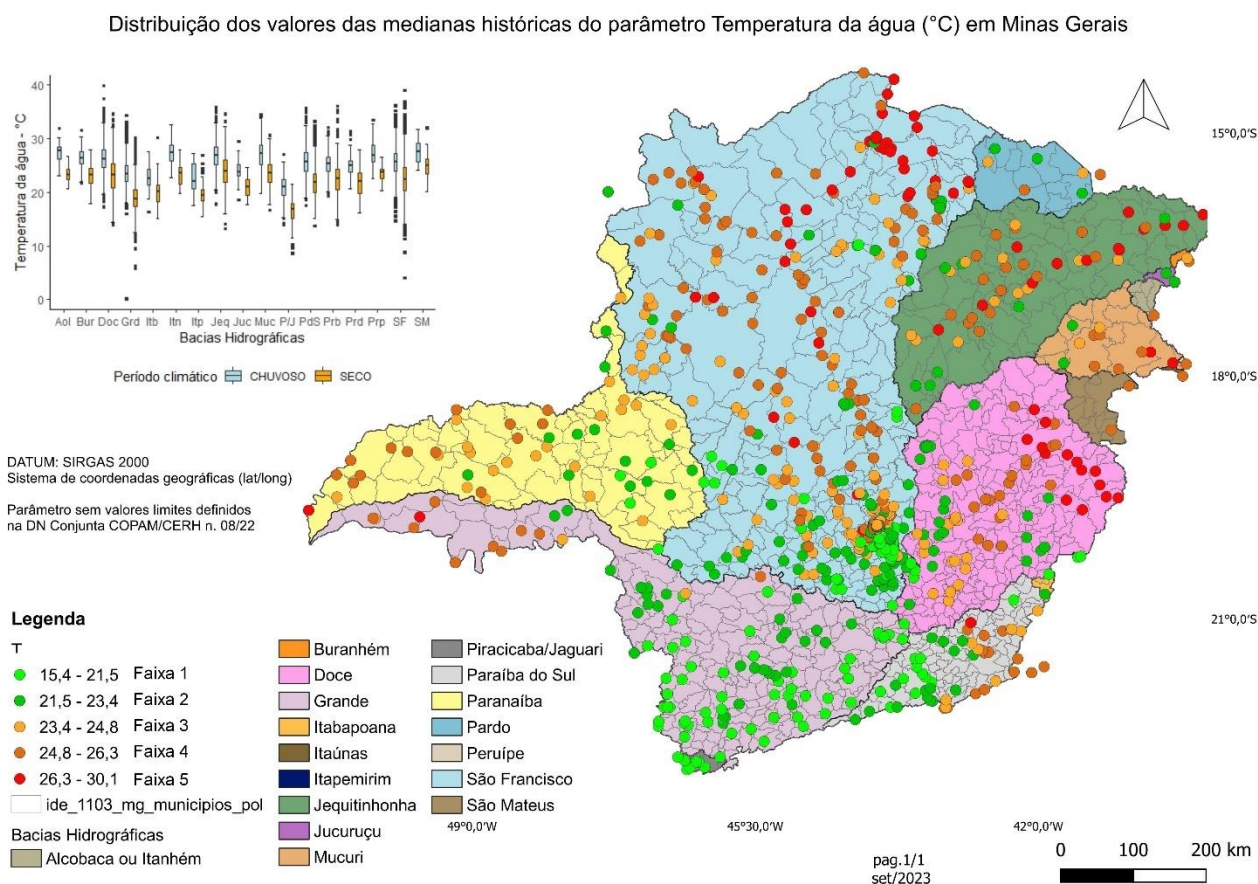
Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Sólidos totais (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Os resultados do I de Moran local para Sólidos totais mostram a formação de dois *clusters* do tipo alto-alto. Um destes está localizado nas CHs do rio Verde Grande, dos rios Jequitaí e Pacuí e do rio Pandeiros, onde é limitado por *outliers* do tipo baixo-alto. Outro, está na região da RMBH e adjacências, nas circunscrições dos rios das Velhas, Paraopeba e Pará, sendo também limitado ao sul por este tipo de *outlier*. Há, ainda, alguns poucos *outliers* do tipo alto-baixo, indicando pontos focais de atenção quanto à degradação da água por Sólidos totais.

Por fim, a temperatura da água (Figura 32) apresenta variação em até 10 °C entre as estações de monitoramento do estado de Minas Gerais. Observa-se que as menores temperaturas estão na região sul do estado, estendendo-se ao centro e ao leste, enquanto as maiores temperaturas estão na porção norte, também estendendo-se ao leste. A BH do Rio São Francisco apresenta estações em todas as faixas de valores de temperatura e, junto das bacias dos rios Doce, Paraíba do Sul e Paranaíba, contém estações na faixa de menor valor e na de maior, ou seja, são bacias com grande amplitude térmica em suas águas.

Figura 32 - Mapa de distribuição espacial das medianas históricas de Temperatura da água



5.2.2. Parâmetros com limites legais estabelecidos

A Figura 33 apresenta a matriz que resume a ocorrência de valores por faixa em cada bacia hidrográfica.

Figura 33 - Ocorrência de estações considerando a maior faixa de valor observada por bacia hidrográfica para parâmetros com limites legais

Parâmetro/ Bacia Hidrográfica	Al diss t	As t	Ba t	B t	Cd t	Pb t	CN livre	Cl t	Cu diss	Cr t	Fe diss	Hg t	Mn t	Ni t	Se t	Zn t	Cor	Cl a	DC	DBO	P t	IF	NO ₃ -	NO ₂ -	NH ₄ ⁺	OD	pH	pH lab.	SDT	SST	SO ₄ t	S t	Turb	Fen t	O/G	MBAS		
Alcobaça ou Itanhém																																						
Buranhém																																						
Doce																																						
Grande																																						
Itabapoana																																						
Itapemirim																																						
Itaúnas																																						
Jequitinhonha																																						
Jucuruçu																																						
Mucuri																																						
Paraíba do Sul																																						
Paranaíba																																						
Pardo																																						
Perúpe																																						
Piracicaba / Jaguari																																						
São Francisco																																						
São Mateus																																						

	Medianas < o limite legal menos restritivo
	Medianas > o limite legal mais restritivo e < o menos restritivo
	Medianas > o limite legal menos restritivo
	Não explorado espacialmente

Legenda: Al diss. = Alumínio dissolvido, As t = Arsênio total, Ba t = Bário total, B t = Boro total, Cd t = Cádmio total, Pb t = Chumbo total, CN l = Cianeto livre, Cl t = Cloro total, Cu diss. = Cobre dissolvido, Cr t = Cromo total, Fe diss. = Ferro dissolvido, Hg t = Mercúrio total, Mn t = Manganês total, Ni t = Níquel total, Se t = Selênio total, Zn t = Zinco total, Cor = cor verdadeira, Cl-a = Clorofila a, DC = Densidade de cianobactérias, DBO = demanda bioquímica de oxigênio, P t = Fósforo total, IF = indicador fecal, NO₃- = nitrato, NO₂- = nitrito, NH₄⁺ = nitrogênio amoniacal, OD = oxigênio dissolvido, pH = pH in loco, pH lab = pH em laboratório, SDT = Sólidos dissolvidos totais, SST = Sólidos suspensos totais, SO₄ t = Sulfato total, S t = Sulfeto total, Turb. = Turbidez, Fen t = Fenóis totais, O/G = óleos e graxas e MBAS = Substância tensoativas.

As bacias hidrográficas em que reiteradamente observam-se estações com medianas de valores nas faixas 4 e 5 são as dos rios Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco, sendo assim as que apresentam águas superficiais mais degradadas em comparação às demais. Os parâmetros com valores acima dos limites legais em várias bacias são Cor verdadeira, DBO, Fósforo total e Indicador fecal, sendo estes os mais impactantes para as águas superficiais de Minas Gerais dentre aqueles medidos e com limites legais estabelecidos.

A seguir, estão dispostos os mapas com a visualização espacial das faixas de valores medianos de cada parâmetro por estação de monitoramento.

O parâmetro Alumínio dissolvido (Figura 34), cujos valores limites da DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 variam de 0,1 mg/l Al (mais restritivo) a 0,2 mg/l Al (menos restritivo), tem medianas por bacia hidrográfica em torno de 0,1 mg/l Al, com *outliers* em todas as bacias. A maior amplitude de valores ocorre nas bacias hidrográficas dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco. Ressalta-se a ocorrência de medianas com maiores valores no período chuvoso em 15 das 17 bacias estudadas,

comportamento esperado considerando-se a associação deste parâmetro a partículas de solo.

A distribuição das medianas históricas do parâmetro Alumínio dissolvido mostra que há ocorrência de estação com valor acima de 0,2 mg/l (limite menos restritivo da norma) nas BHs dos rios Jequitinhonha, São Francisco e Rio Doce, onde se tem o maior valor (1,67 mg/l). Os resultados de I de Moran local mostram a formação de um *cluster* do tipo alto-alto formado na BH do Rio Jequitinhonha (Figura 35) e limitado ao sul por *outliers* do tipo baixo-baixo. A estação com mediana na faixa 5 foi classificada como *outlier* do tipo alto-baixo na bacia do Rio Doce (Figura 36), sendo assim ponto focal de poluição da água superficial por Alumínio dissolvido.

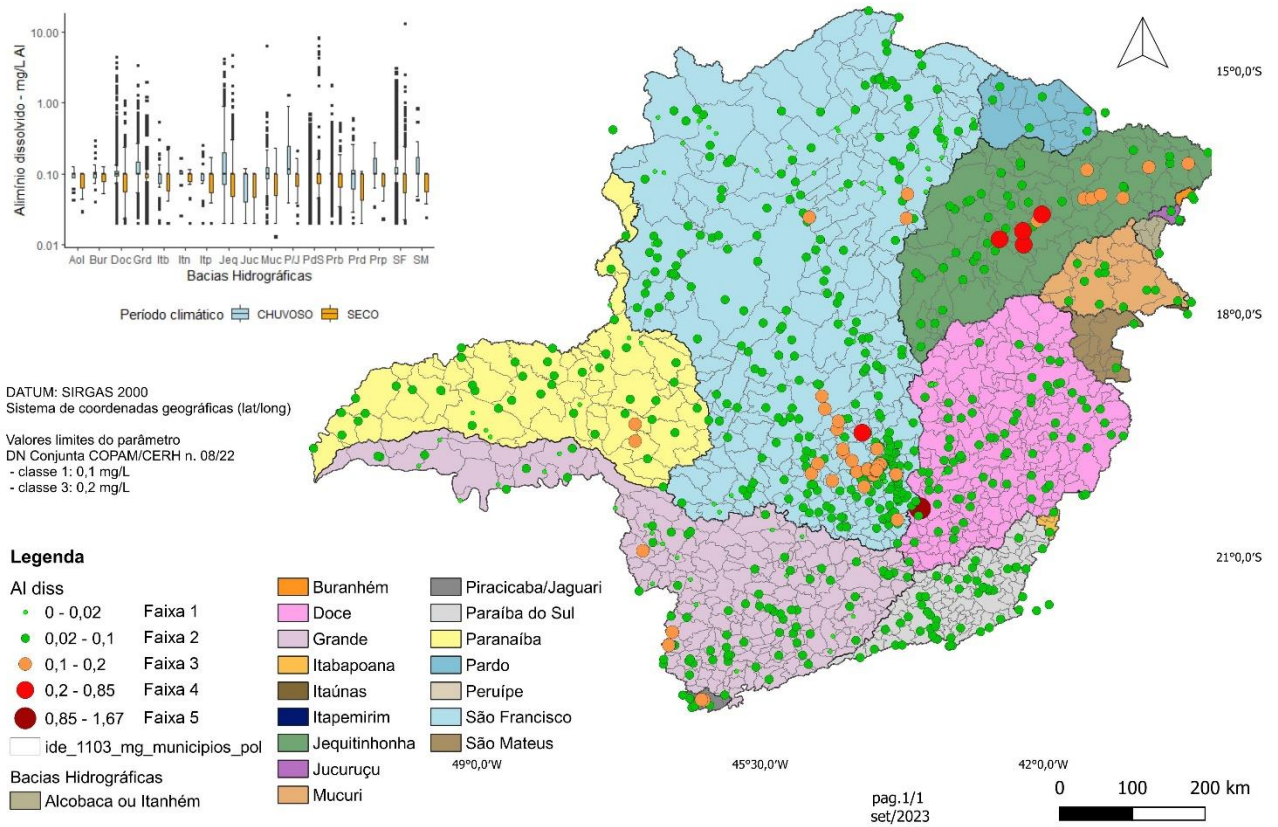
O Alumínio nas águas pode estar associado a alguns fatores, como pH ácido e o intemperismo dos solos ricos em minerais de argila, como óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio. Neste caso, o *cluster* está sobre mancha de Argissolo vermelho-amarelo. Campos et al. (1997), ao pesquisarem a gênese pedológica local no Rio Jequitinhonha, encontraram solos com caráter álico em subsuperfície na região do Médio Jequitinhonha, de modo que os altos teores de alumínio são, portanto, associado às argilas.

A Viglio (2018), ao elaborar o atlas geoquímico da Bacia do Rio São Francisco, encontrou o elemento Alumínio com valores anômalos em um terço das amostras de solo na BH do Rio São Francisco, agrupando-se principalmente na cabeceira da bacia, no Quadrilátero Ferrífero, na Faixa Brasília (porção oeste) e próximo à Serra do Espinhaço no limite leste, nas proximidades de Montes Claros. Entretanto, neste estudo, os valores acima dos limites legais foram encontrados na mesma bacia apenas na região da cabeceira e do Quadrilátero Ferrífero.

A mesma pesquisa da CPRM (Viglio, 2018) indica que as amostras de água coletadas apresentavam grandes concentrações de Al a oeste da represa de Três Marias, entre Matutina e São Gonçalo do Abaeté, no alto curso do Rio das Velhas, em São Joaquim de Bicas e Conselheiro Lafaiete, e entre Manga e Miravânia, no extremo norte da bacia sem relação. Contudo, estes valores não têm relação aparente com os resultados de solo e de sedimento. A principal ocorrência de valores de até 81 mg/l, muito acima do limite máximo permitido de 0,2 mg/l, está a oeste da represa de Três Marias.

Figura 34 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Alumínio dissolvido (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Alumínio dissolvido (mg/L) no Estado de Minas Gerais

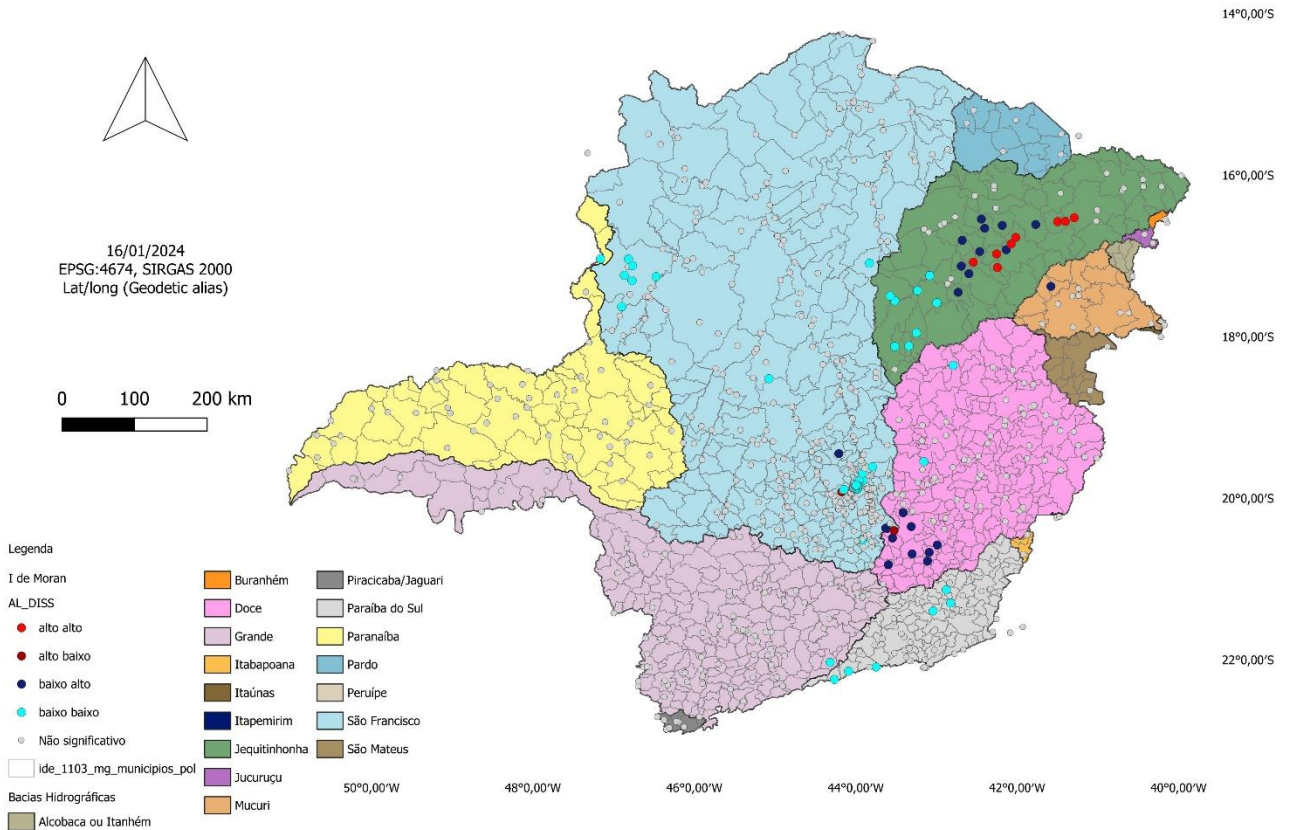
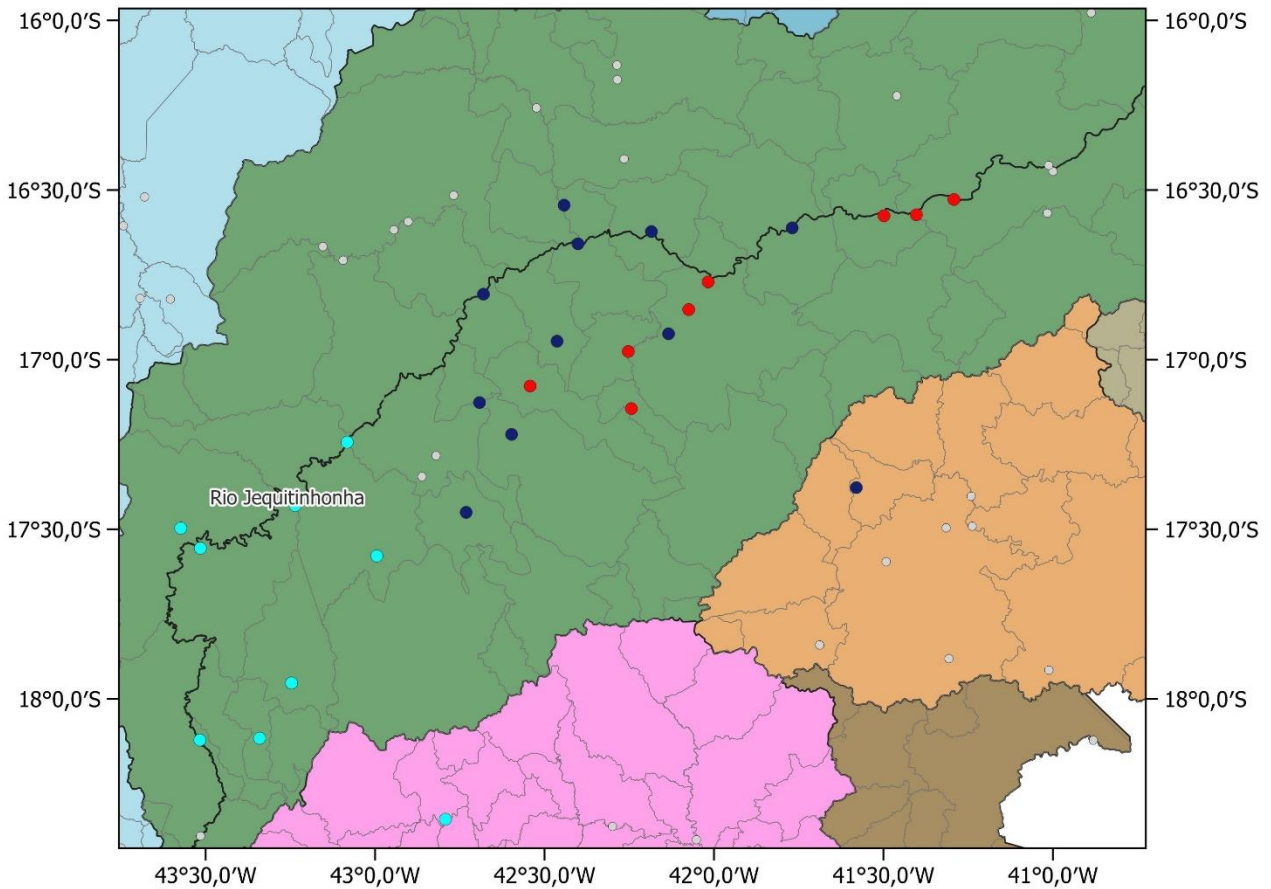


Figura 35 – Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido (Jequitinhonha)

Vista em detalhe do cluster alto-alto formado na Bacia Hidrográfica do Jequitinhonha para o parâmetro Alumínio dissolvido (mg/L)



Legenda

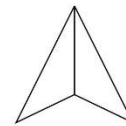
I de Moran

AL_DISS

- alto alto
- baixo alto
- baixo baixo
- Não significativo
- rio jequitinhonha
- ide_1103_mg_municipios_pol

Bacias Hidrográficas

- Alcobaca ou Itanhém
- Doce
- Jequitinhonha
- Mucuri
- Pardo
- São Francisco
- São Mateus

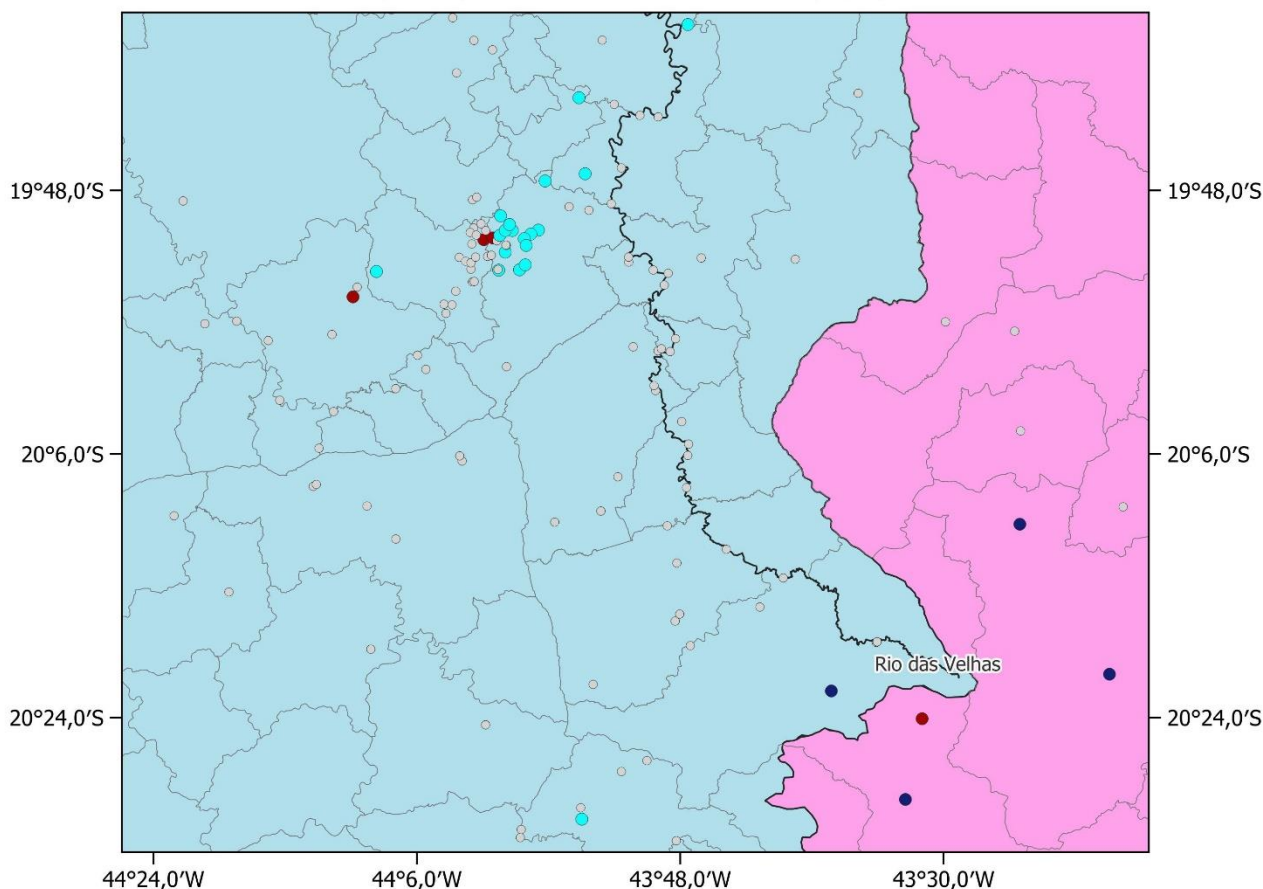


27/01/2024
 EPSG:4674, SIRGAS 2000
 Lat/long (Geodetic alias)



Figura 36 - Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Alumínio dissolvido (São Francisco)

Vista em detalhe dos outliers alto-baixo formados na Bacia Hidrográfica do São Francisco para o parâmetro Alumínio dissolvido (mg/L)



Legenda

I de Moran

AL_DISS

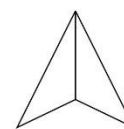
- alto baixo
- baixo alto
- baixo baixo
- Não significativo

— rio das velhas

□ ide_1103_mg_municipios_pol

Bacias Hidrográficas

- Doce
- São Francisco



27/01/2024
EPSG:4674, SIRGAS 2000
Lat/long (Geodetic alias)

0 25 50 km



O parâmetro Arsênio total (Figura 37), cujos limites na norma estadual variam de 0,01 a 0,033 mg/l, apresenta valores do terceiro quartil iguais aos valores do segundo em quase todas as bacias, exceto nas dos rios Doce (período chuvoso), Prado (chuvoso) e São Francisco. Isto evidencia a baixa variabilidade de valores, tanto na própria bacia, quanto entre bacias. As medianas são quase todas iguais a 0,001 mg/l, ou seja, dez vezes menor que o limite mais restritivo da DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22. No entanto, há *outliers* superiores com valores entre 0,01 e 1 mg/l nas bacias hidrográficas dos rios Doce, Grande,

Jequitinhonha, Paranaíba e São Francisco. Nota-se que não há diferença dos valores das medianas entre os períodos seco e chuvoso.

A distribuição das medianas históricas deste parâmetro segue um padrão: algumas estações na RMBH exibem valores de medianas na faixa 5 (acima de 0,033 mg/l); seguindo a jusante, ao longo da calha do rio das Velhas, as estações apresentam valores de medianas decrescentes, nas faixas 4 e 3 (acima de 0,1 mg/l). A estação com maior valor de mediana (0,0667 mg/l As) é a BV062, na cidade de Nova Lima, na foz do Ribeirão Água Suja, afluente do Rio das Velhas. Trindade (2016), ao realizar análise de *cluster* (AC) para as estações na bacia do rio das Velhas, concluiu que esta estação apresenta comportamento diferente das demais.

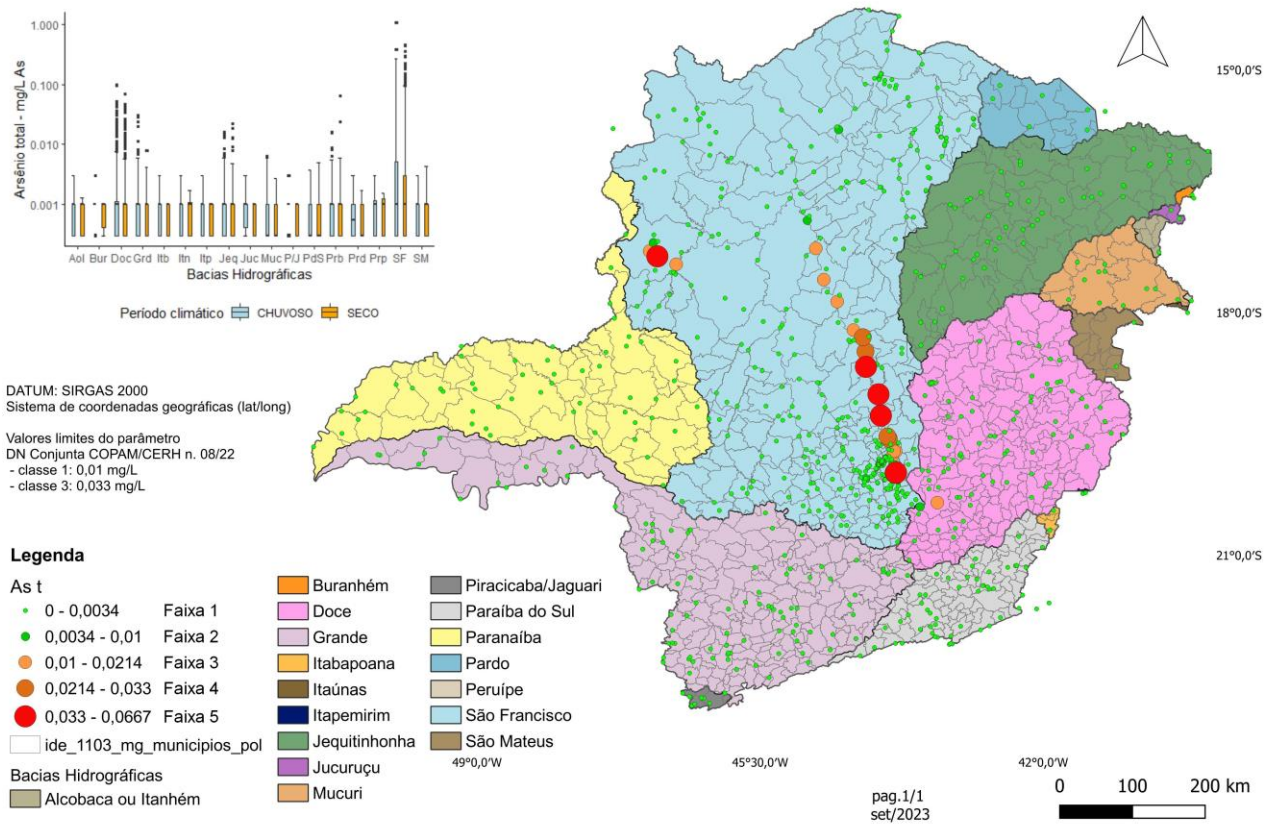
Destaca-se a presença de atividades de mineração de ouro ao longo da calha do Rio das Velhas e em seu entorno, conforme dados da Agência Nacional de Mineração consultados no IDE Sisema. Ademais, a cidade de Nova Lima tem histórico de mineração desta substância desde o século XIX até os dias atuais (Da Costa e Rios, 2022). Além disso, existem três estações com valores nas faixas 3 e 4 na região do município de Paracatu. Barbosa (2015) encontrou violações aos limites de arsênio total na BH do Rio Paracatu, especificamente na calha do córrego Rico, que fica geograficamente próximo ao maior empreendimento de mineração da bacia do rio Paracatu.

Os resultados de I de Moran local para o parâmetro Arsênio total reforçam o padrão visualizado com a distribuição espacial das medianas históricas por faixas de valores, observando-se a formação de um *cluster* do tipo alto-alto precisamente delimitado na CH do Rio das Velhas (Figura 38), com estações no entorno classificadas como *outliers* do tipo baixo-alto. Há ainda um *cluster* do tipo alto-alto no município de Paracatu, onde está localizada a mina Morro do Ouro, uma das maiores jazidas de ouro do Brasil em termos de reservas, que teve sua exploração a nível industrial iniciada no final dos anos 70 (Da Costa e Rios, 2022).

No Atlas Geoquímico da BH do Rio São Francisco, a Viglio (2018) mostra grande anomalia de Arsênio em todos os meios, evidenciando as ocorrências auríferas de Morro do Ouro em Paracatu e do Quadrilátero Ferrífero, e contaminações antropogênicas após a confluência do Rio das Velhas. Ressalta-se que após esta confluência, não são mais observadas estações com medianas nas faixas de valores 4 e 5, ou ainda formando *clusters* alto-alto.

Figura 37 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Arsênio total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Arsênio total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Arsênio total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

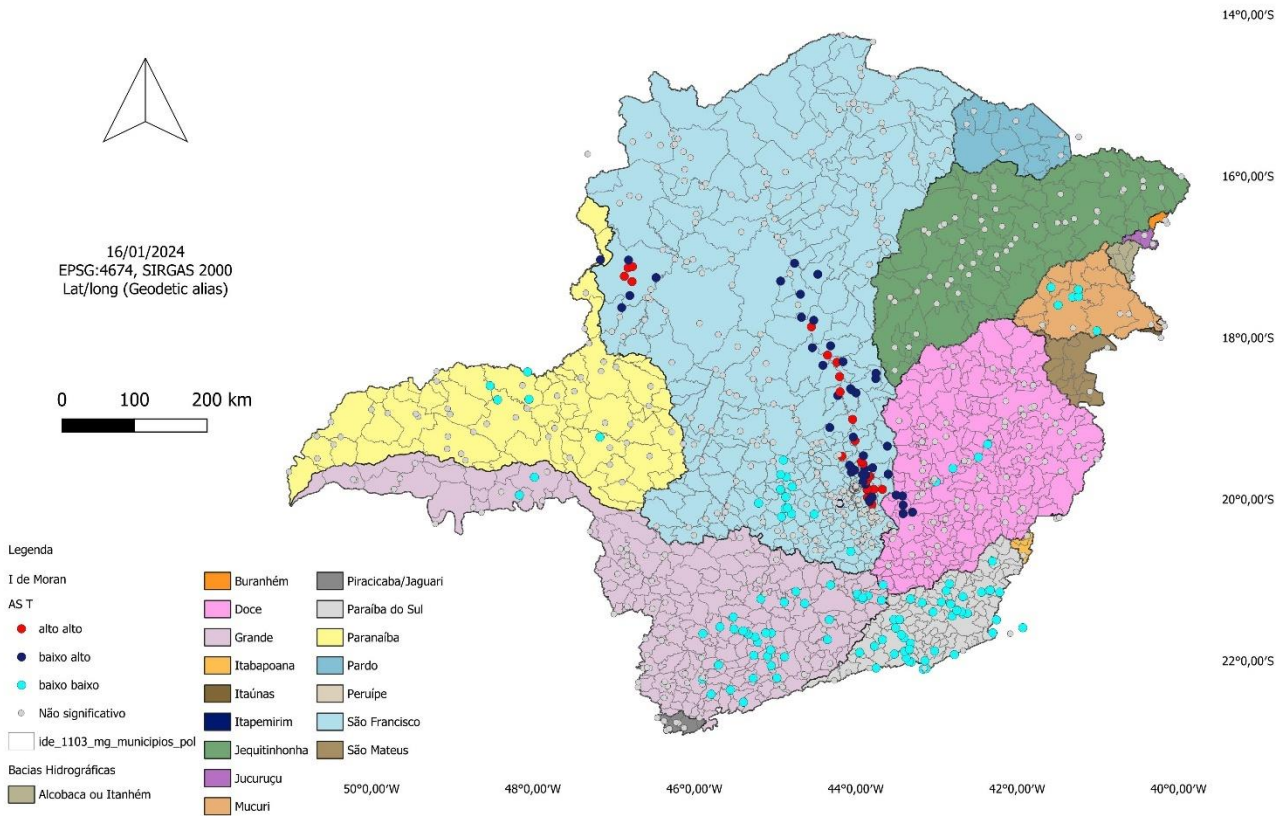
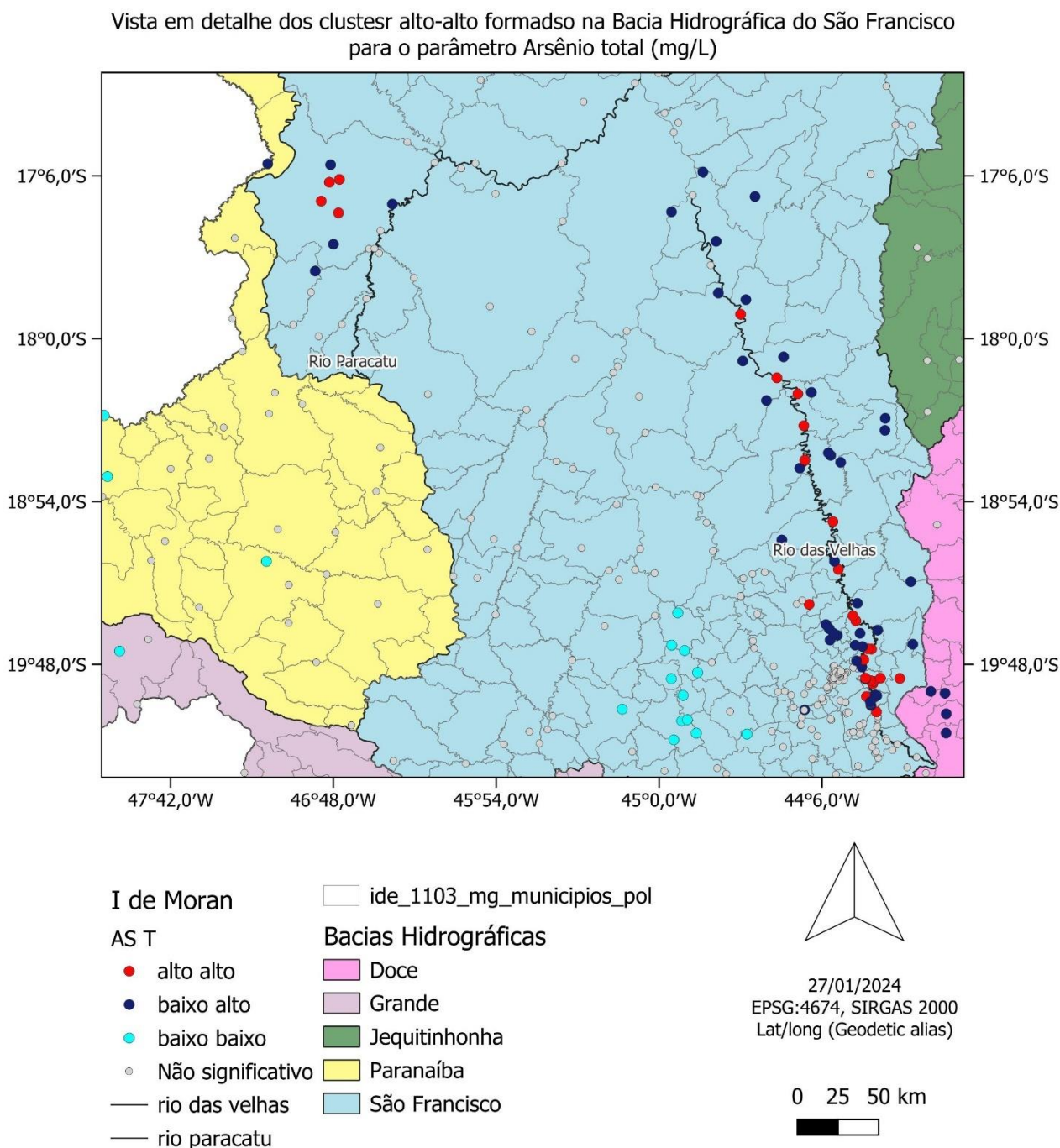


Figura 38 - Mapa em detalhe do resultado da análise estatística espacial das medianas históricas de Arsênio total (São Francisco)



Os valores das medianas históricas de Chumbo total (Figura 39) estão predominantemente nas faixas 1 e 2, até 0,005 mg/l. Este parâmetro tem como limites legais valores entre 0,01 e 0,033 mg/l; assim, nenhuma estação em todo o estado apresenta mediana histórica acima do limite menos restritivo. Apenas duas estações estão na faixa 4, acima do limite mais restritivo: a SC38, no Córrego Matadouro, próximo ao rio das Velhas, no município de Corinto; e a BG090, na ponte sobre rio Muzambo, município de Monte Belo.

Os valores do parâmetro Chumbo total por estação apresentam intervalo interquartil igual a zero em todas as bacias hidrográficas, ou seja, 75% dos valores do parâmetro são iguais em cada uma das bacias. Ainda, estes valores têm limites inferior e superior coincidentes com o Q1, Q2 e Q3, apontando para uma variância igual a zero. Isto porque pouco mais de 86% dos dados são iguais a 0,005 mg/l, que é o limite de detecção do método. Apesar disso, o I de Moran global para o parâmetro foi igual a 0,18, o que permitiu a análise do I de Moran local.

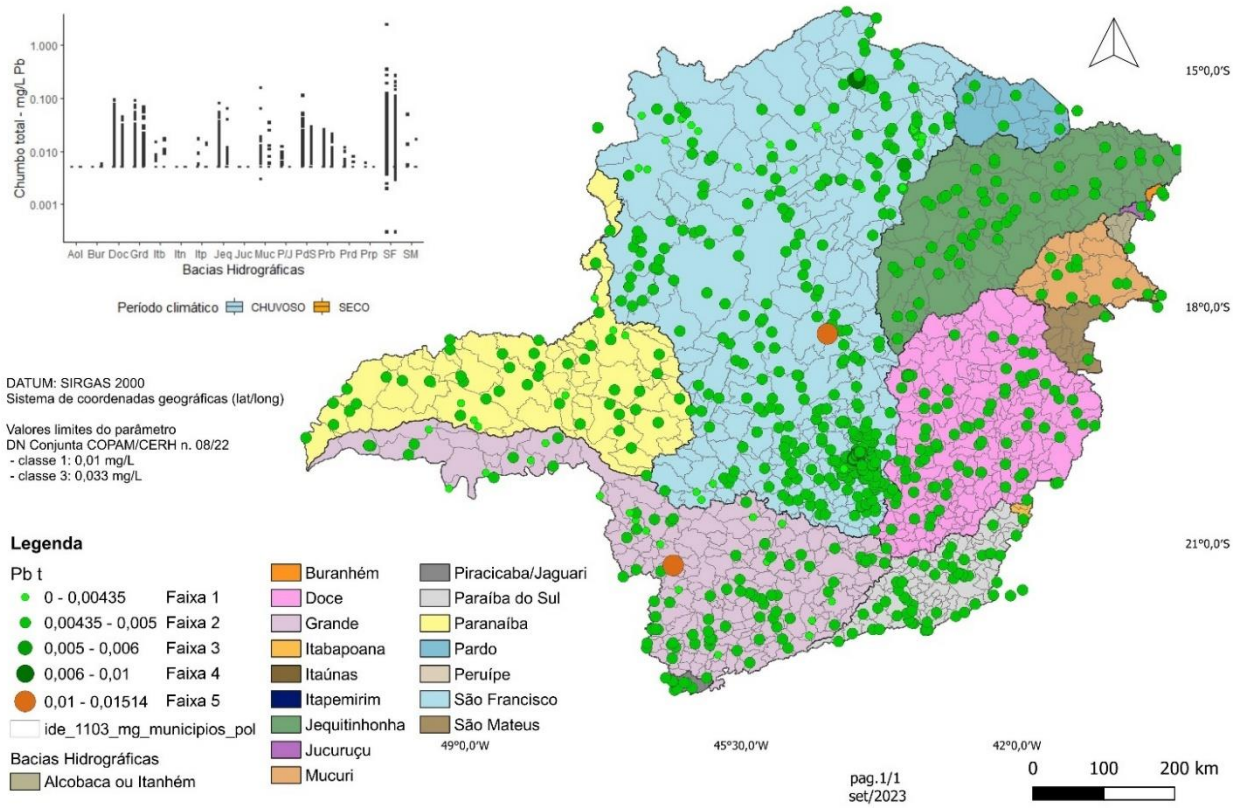
Considerando a baixa variabilidade, o resultado do I de Moran local para o parâmetro deve ser avaliado com cautela. Nenhum *cluster* do tipo alto-alto foi formado, havendo apenas *outliers* do tipo alto-baixo na BH do Rio São Francisco, na circunscrição do rio das Velhas, nas circunscrições dos rios Verde Grande e Pandeiros e na bacia do rio Grande, na circunscrição chamada Entorno do reservatório de Furnas. São estes, justamente, os locais onde estão as únicas estações com valores nas faixas 4 e 5.

Os valores do parâmetro Cianeto Livre (Figura 40) têm primeiro quartil coincidente com o segundo na maior parte das bacias, excluindo-se as dos rios Itaúnas e Peruípe. Isto porque o limite de detecção do método de análise é igual a 0,002 mg/l e 14.399 dentre 20.109 dados (71,60%) apresentam este valor. Nas Bacias Hidrográficas dos rios Grande e São Francisco, há alto número de *outliers* superiores. Os limites legais deste parâmetro estabelecidos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 vão de 0,005 a 0,022 mg/l. Assim, a maior parte dos valores está abaixo do limite legal mais restritivo.

Com relação à distribuição das medianas históricas, nota-se que esta corrobora com o apresentado no *box-plot*, uma vez que existem apenas 10 estações com medianas nas faixas de valor 4 e 5 (entre 0,005 e 0,013 mg/l), ainda abaixo do valor menos restritivo da norma. Estas estão nas Bacias Hidrográficas dos rios Grande e São Francisco. O I de Moran local mostra a formação de dois *clusters* alto-alto que correspondem às estações na região central do estado e na porção leste da bacia do Grande, ambos delimitados por *outliers* baixo-alto. A estação na porção oeste desta mesma bacia foi classificada como *outlier* alto-baixo.

Figura 39 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Chumbo total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Chumbo total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Chumbo total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

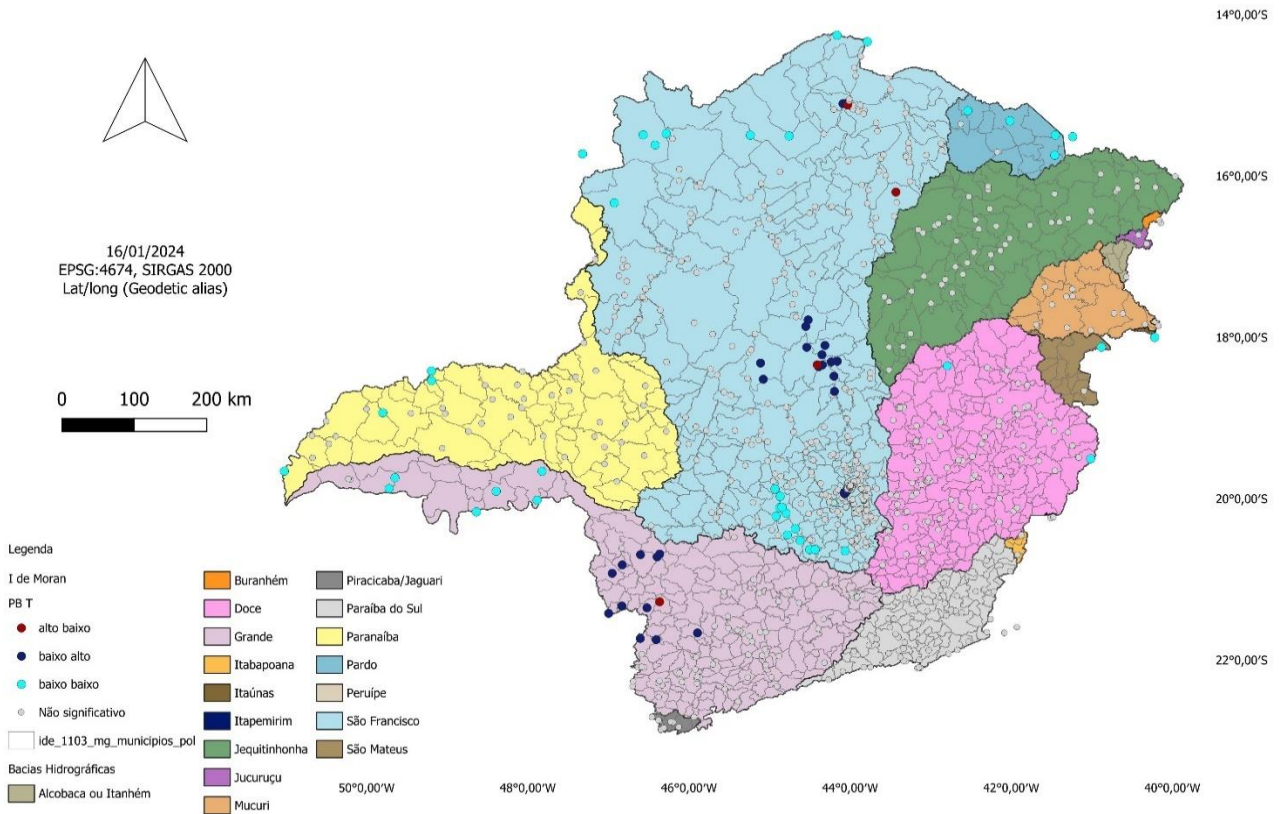
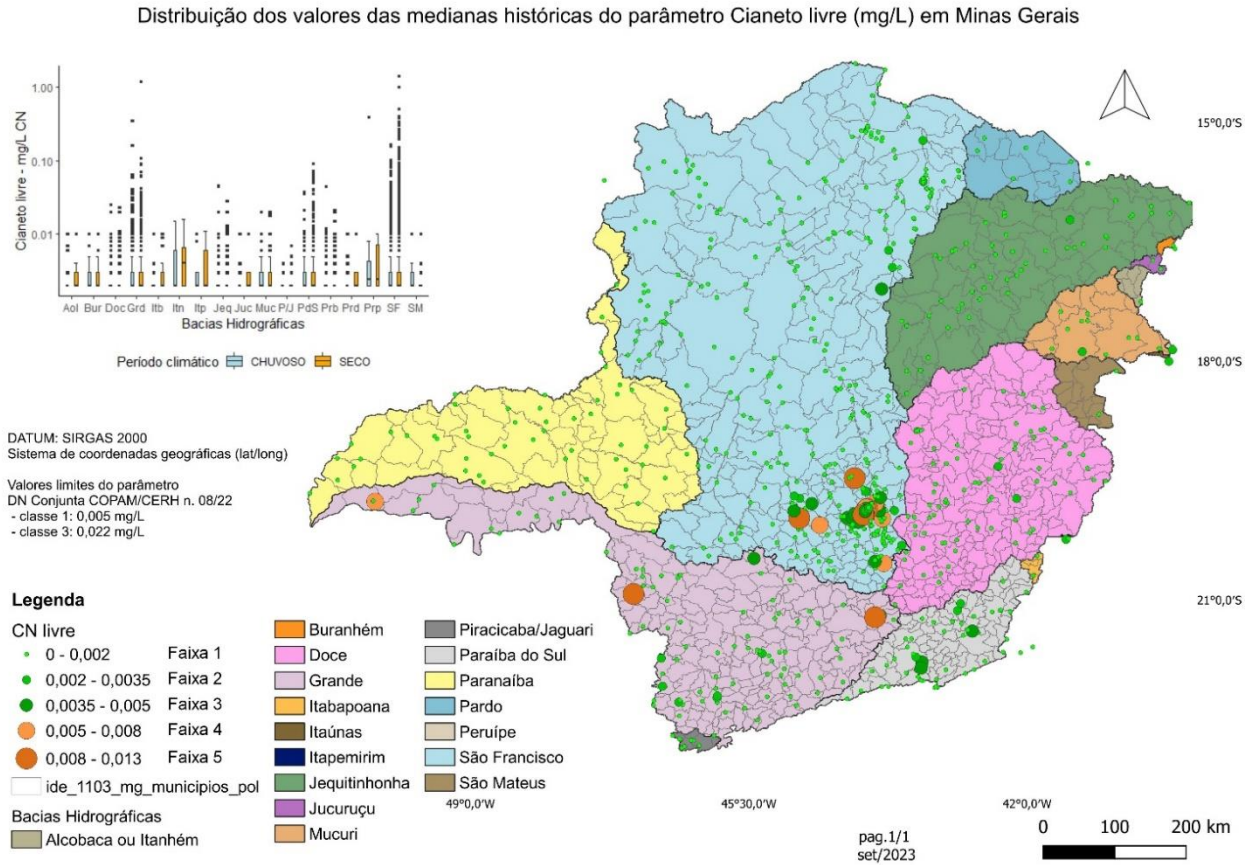
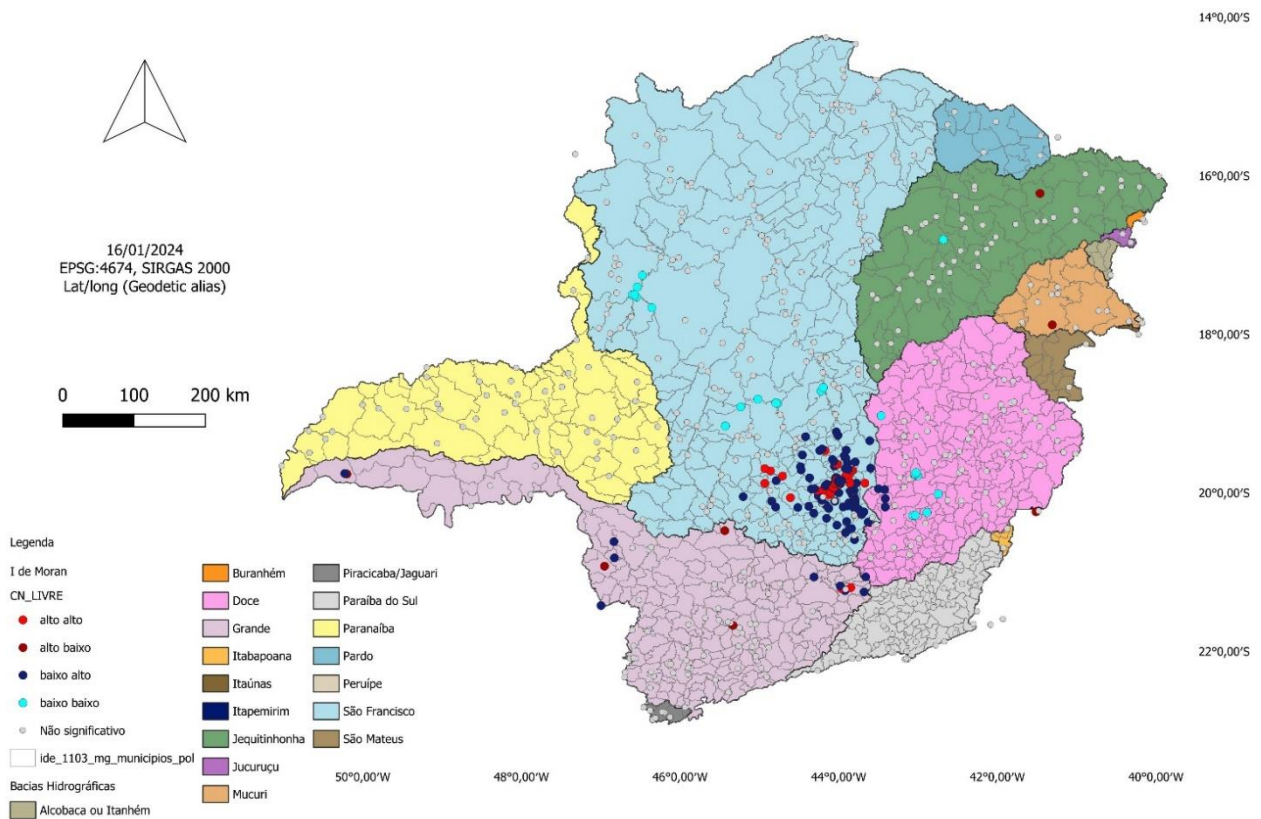


Figura 40 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cianeto livre



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Cianeto Livre (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Os valores por estação para o parâmetro Cloreto total (Figura 41), cujo limite legal é de 250 mg/l Cl, têm distribuição bastante heterogênea entre as Bacias Hidrográficas. Os valores de medianas históricas por estação estão abaixo do limite normativo mesmo na faixa 5. Os destaques de maiores concentrações de Cloreto total estão nas Bacias Hidrográficas dos rios São Francisco, Jequitinhonha, Mucuri, Itaúnas e Grande. Observa-se que a distribuição destas na bacia do Rio São Francisco está especificamente na região central, RMBH, e no extremo norte do estado.

O resultado do I de Moran local para este parâmetro mostra a formação de cinco *clusters* alto-alto. Dois estão localizados na BH do Rio São Francisco: um *cluster* alto-alto está nas CHs dos rios das Velhas e Paraopeba, e o outro, na CH do Rio Verde Grande, sendo ambos limitados por *outliers* baixo-alto. O terceiro trata-se de um *cluster* alto-alto nas bacias do Jequitinhonha e Pardo, também limitado por *outliers* baixo-alto. Os *clusters* restantes encontram-se na BH do Rio Buranhém e nas bacias do Alcobaça, Itaúna, Mucuri e São Mateus. Estes dois últimos não apresentam delimitações por *outliers*.

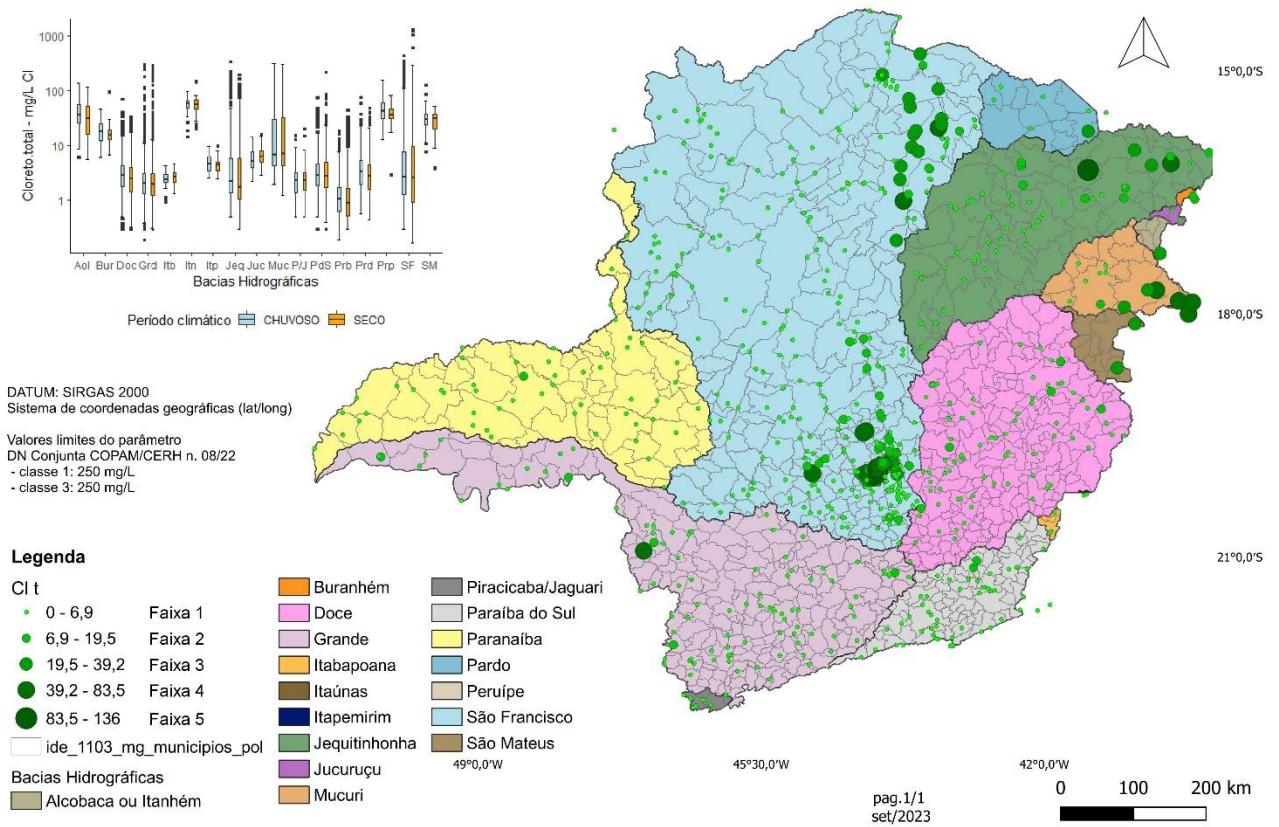
As principais fontes antrópicas de Cloreto nas águas superficiais são efluentes domésticos, parâmetro que já foi considerado indicador da contaminação biológica devido à associação da elevação do nível de cloreto em um rio com o lançamento de esgotos sanitários. Ainda, alguns efluentes industriais apresentam concentrações de cloreto elevadas, como os da indústria do petróleo, farmacêuticas e curtumes (CETESB, 2016).

O *box-plot* para o parâmetro Ferro dissolvido (Figura 42), cujos limites dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 variam de 0,3 a 5,0 mg/l, mostra que seus valores estão distribuídos heterogeneamente entre as bacias hidrográficas, com medianas na faixa de valor entre 0,2 e 1,0 mg/l e *outliers* superiores que chegam a mais de 10 mg/l na BH do Rio São Francisco.

A distribuição das medianas históricas do parâmetro Ferro dissolvido apresenta dispersão de estações com medianas na faixa 3, em que os valores superam o limite mais restritivo da norma, em várias bacias. Estações com valores nas faixas 4 e 5, esta acima do limite menos restritivo da mencionada deliberação, ocorrem apenas na porção central do estado, na BH do Rio São Francisco, especificamente na RMBH e em dois pontos na parte norte da mesma bacia. A única estação com o valor acima do limite menos restritivo da norma é a PV030, que fica no município de Contagem, na calha do córrego do aterro do Perobas, antes da confluência com o córrego Sarandi.

Figura 41 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cloreto total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Cloreto total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Cloreto total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

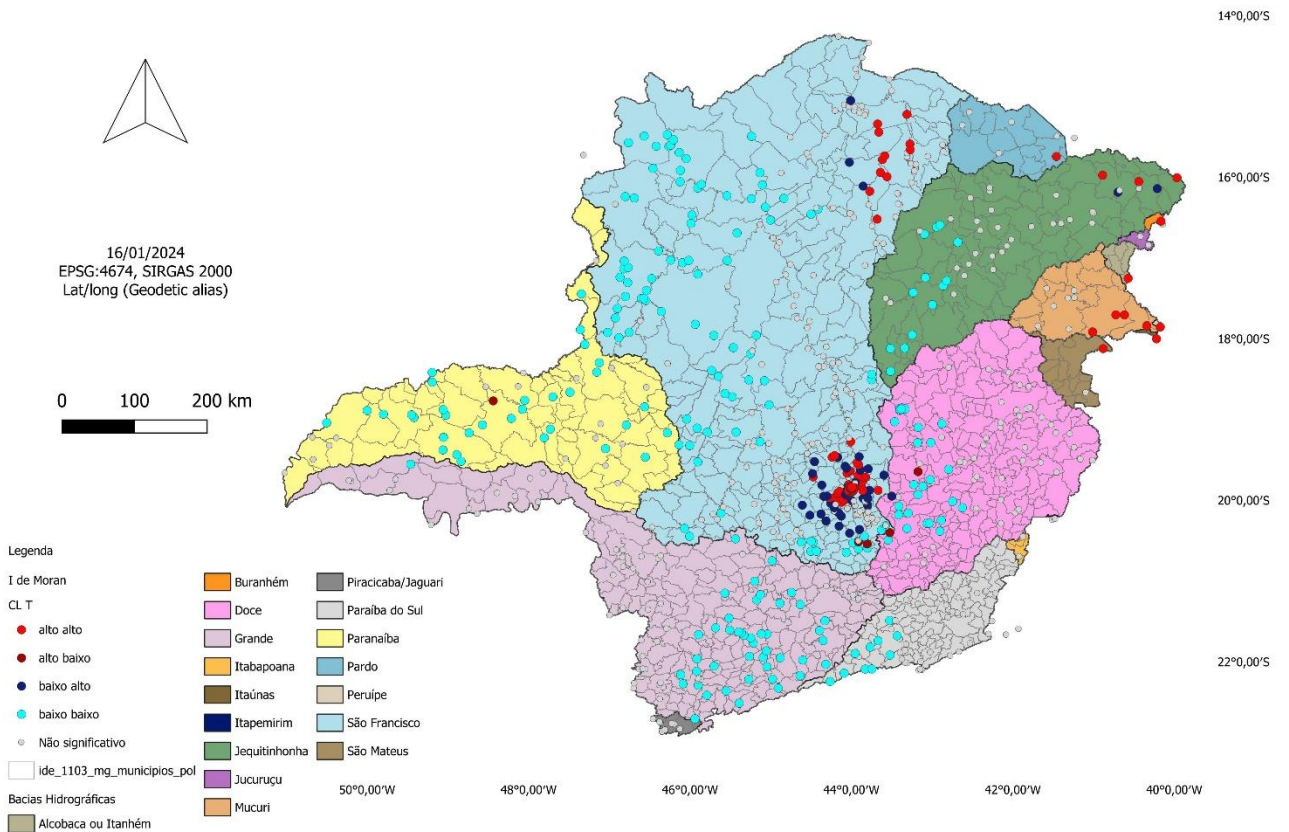
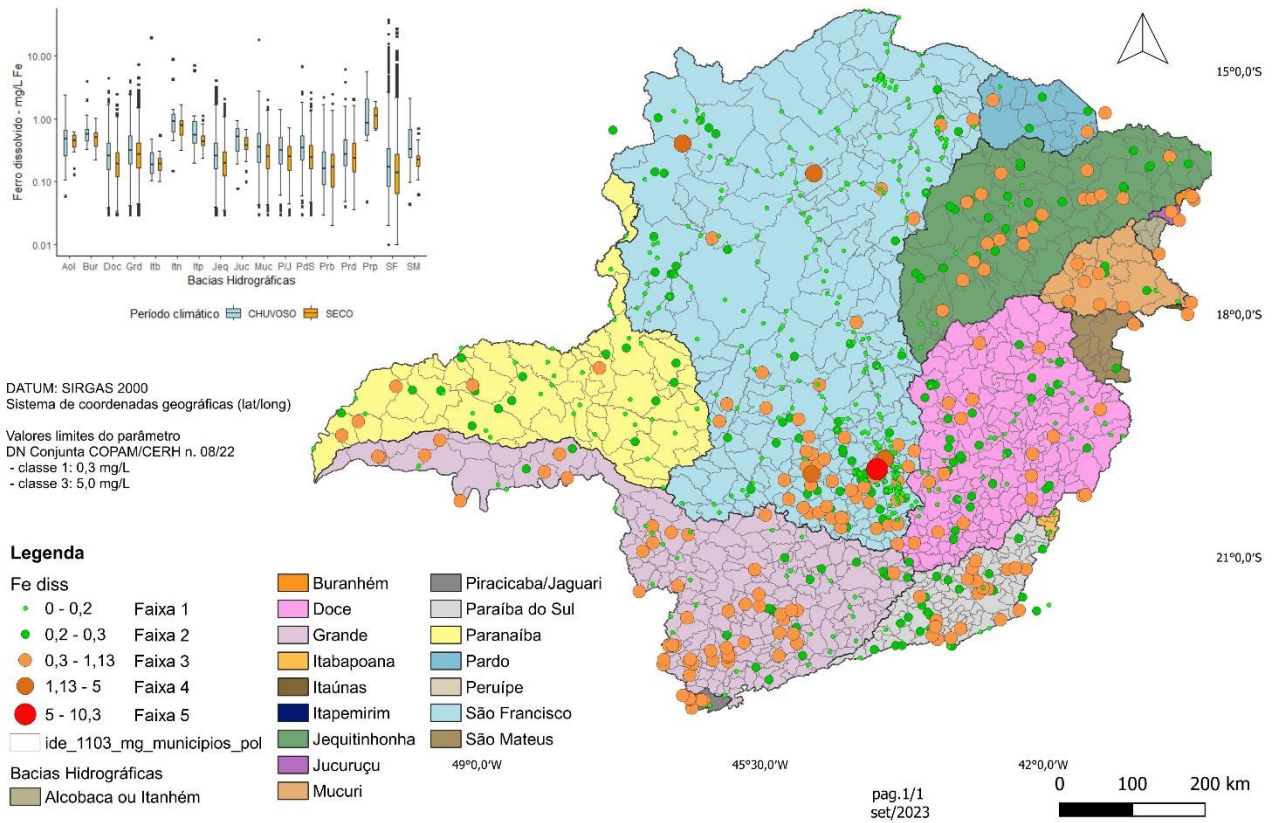
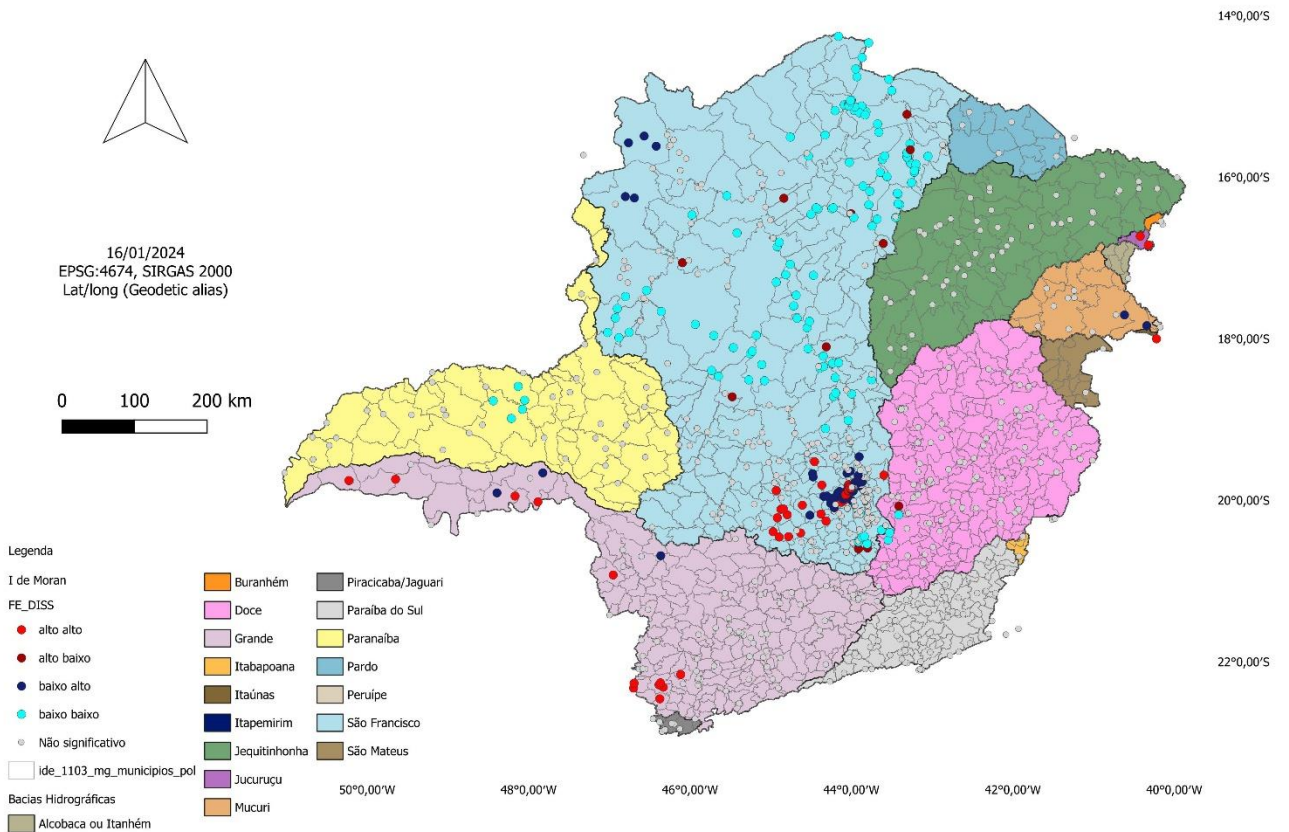


Figura 42 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Ferro dissolvido

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Ferro dissolvido (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Ferro dissolvido (mg/L) no Estado de Minas Gerais



A análise de estatística espacial resultou na formação de seis *clusters* do tipo alto-alto. Dois deles são vizinhos e estão na BH do Rio São Francisco, um nas CHs dos rios das Velhas, Paraopeba e Pará e outro, unitário, isolado na CH do Rio das Velhas. Este primeiro *cluster* tem boa parte das estações no município de Contagem, seguindo a oeste para a região do Paraopeba. Esta, sabe-se, é de ocorrência de minério de ferro e bastante explorada comercialmente, o que pode explicar a formação do *cluster*. Há uma grande quantidade de *outliers* do tipo baixo-alto entre o Rio Paraopeba e o Rio das Velhas, que separa os dois *clusters* desta região.

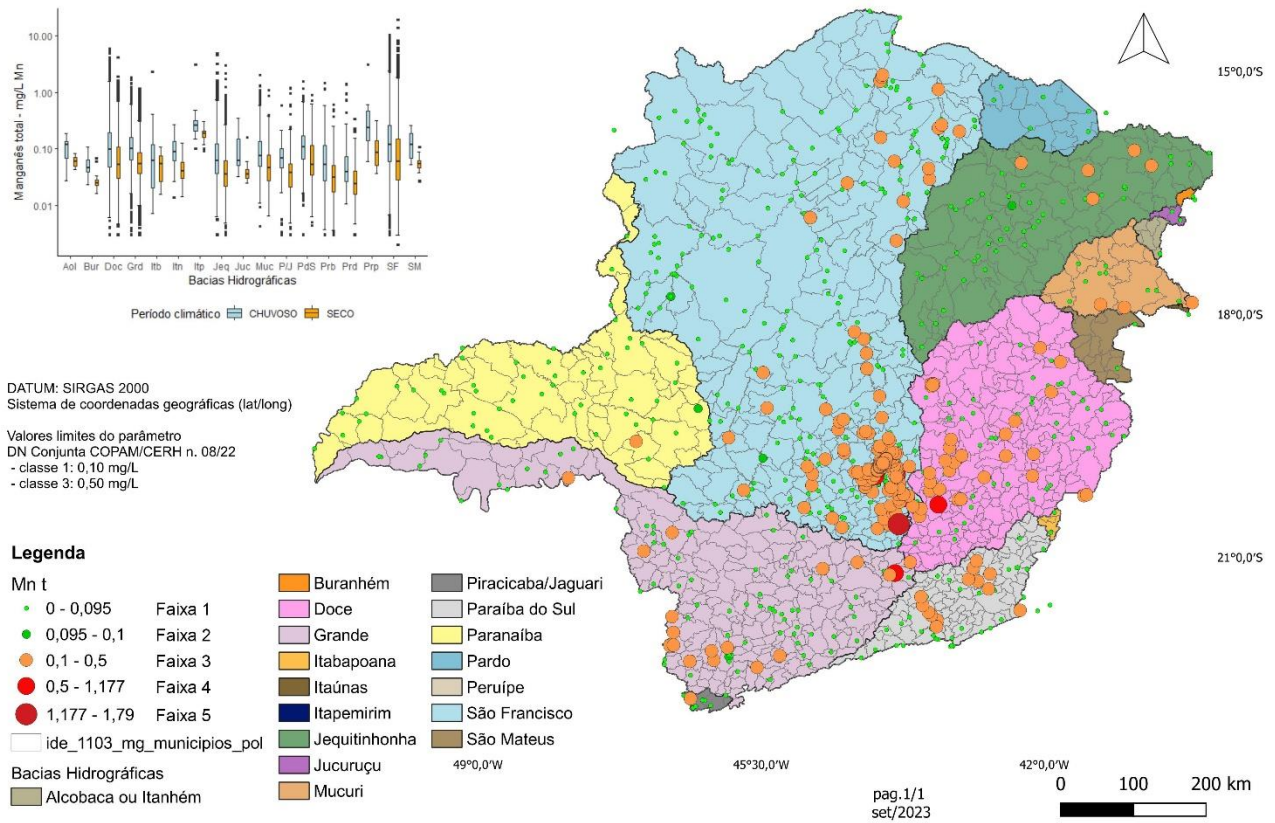
Há outro *cluster* unitário na bacia do rio Itaúnas e, ainda, um *cluster* com duas estações na bacia do Rio Jucuruçu e dois na do Rio Grande, separados por *outliers* do tipo baixo-alto. Existem ainda alguns *outliers* espalhados, do tipo alto-baixo, que podem indicar problemas pontuais, como a degradação da água sob o aspecto da ocorrência de Ferro dissolvido.

O *box-plot* com os valores do parâmetro Manganês total (Figura 43) mostra que estes estão distribuídos heterogeneamente entre as bacias hidrográficas, com grande número de *outliers* superiores nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha e São Francisco. Quanto à distribuição espacial, nota-se ocorrência generalizada de estações com valores até 0,5 mg/l, concentração que está acima do limite mais restritivo (de 0,1 mg/l Mn) e abaixo do menos restritivo (0,5 mg/l), estabelecidos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22. Já as estações com valores de medianas históricas acima do limite menos restritivo ocorrem apenas na região central do estado, abrangendo as bacias dos rios Doce (região de Ouro Preto), Grande (região de Conselheiro Lafaiete) e São Francisco (RMBH).

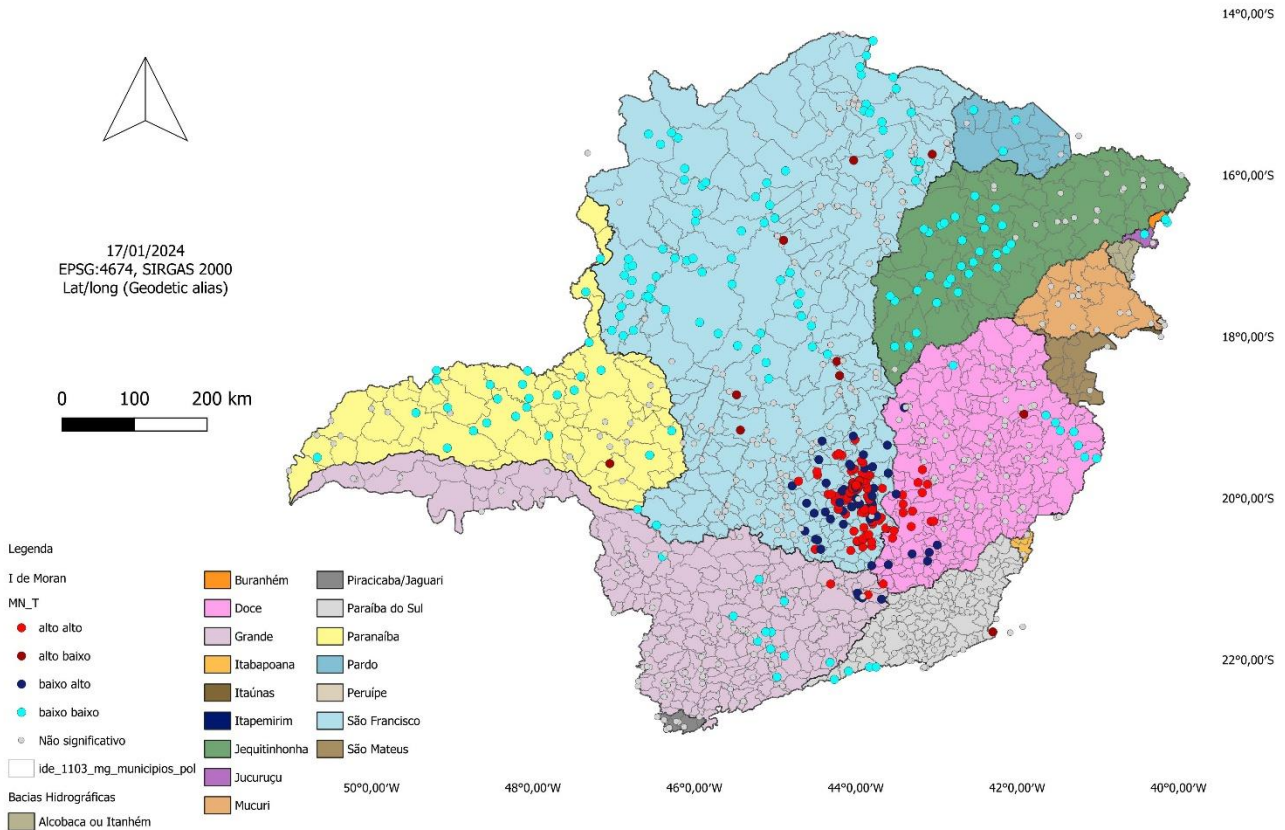
Com a aplicação do I de Moran, tem-se a formação de apenas um grande *cluster* do tipo alto-alto entremeado por *outliers* do tipo baixo-alto nas Bacias Hidrográficas dos rios São Francisco, nas circunscrições dos rios das Velhas e Paraopeba, Doce, nas CHs dos rios Piracicaba, Piranga e Grande, e na CH do Rio das Mortes. O Manganês ocorre naturalmente na água superficial, raramente atingindo concentrações maiores ou iguais a 1,0 mg/l, mas também pode ser inserido por ação antrópica, sendo largamente utilizado em atividades industriais como fabricação de aço, ligas metálicas, baterias, vidros, oxidantes para limpeza, fertilizantes, vernizes e suplementos veterinários (CETESB, 2016).

Figura 43 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Manganês total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Manganês total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Manganês total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



No estado de Minas Gerais, a região metropolitana de Belo Horizonte abriga diversas indústrias siderúrgicas e metalúrgicas, o que pode explicar a ocorrência de estações com valores acima dos limites legal nestas regiões. Ademais, há depósitos minerais de manganês na província mineral do Quadrilátero Ferrífero, sendo o Morro da Mina, na cidade de Conselheiro Lafaiete, considerado o de maior importância (Dias e Caxito, 2018).

Assim como observado na distribuição de outros parâmetros classificados como metais, os valores por estação amostral do parâmetro Níquel total (Figura 44), cujo limite estabelecido na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 é de 0,025 mg/l, estão distribuídos de modo que os limites inferior, superior e os quartis um, dois e três são coincidentes. Isto significa que a variabilidade é igual a zero, exceto para o período chuvoso na BH do Rio São Francisco. Este resultado se dá por conta do alto número de estações com valores iguais ao limite de detecção do método de análise do parâmetro, que, neste caso, é de 0,004 mg/l, seis vezes menor que o limite legal.

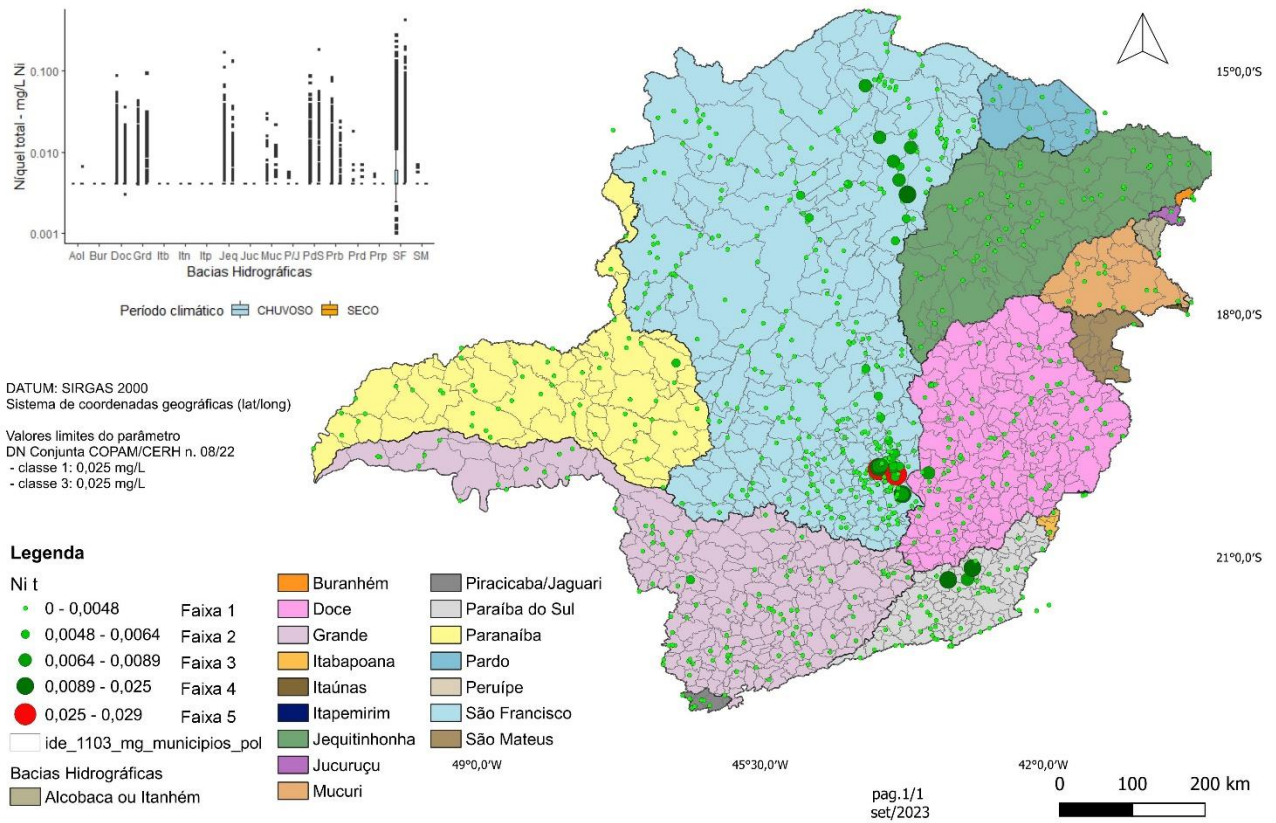
A distribuição das medianas históricas do parâmetro Níquel total apresenta quase que a totalidade das estações com valores até 0,0089 mg/l. Há, no entanto, na BH do Rio São Francisco, especificamente na RMBH, duas estações com valores de medianas históricas acima do limite legal: a PV015, no córrego Sarandi, município de Contagem; e a AV320, no córrego da Mina em Nova Lima.

A partir do cálculo do I de Moran local, tem-se a formação de três *clusters* alto-alto; dois na BH do Rio Francisco, nas regiões central (RMBH) e norte (região de Montes Claros), estes mal delimitados e entremeados de *outliers* baixo-alto; e outro na BH do Rio Paraíba do Sul, bem delimitado pela ocorrência de *outliers* baixo-alto em seu entorno.

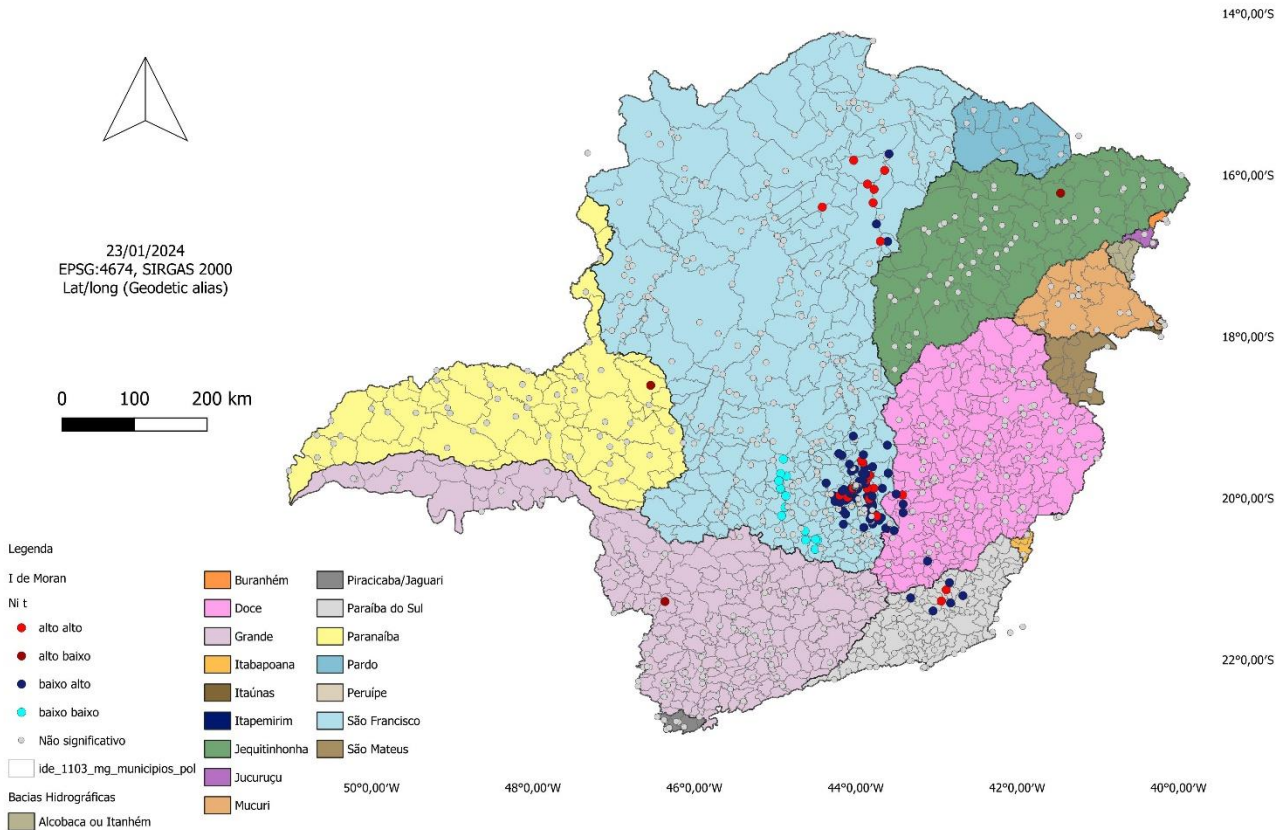
No já mencionado estudo da Viglio (2018), foram detectadas grandes áreas anômalas do elemento níquel sobre o Quadrilátero Ferrífero e a região de Onça do Pitangui. Além disso, quase todas as amostras de sedimento apresentam níquel em áreas anômalas bem definidas, incluindo a cabeceira do São Francisco, interflúvio dos rios Pará e Paraopeba em seus médios cursos, e em toda a cabeceira do rio das Velhas, sobre a região do Quadrilátero Ferrífero.

Figura 44 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Níquel total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Níquel total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Níquel total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



A distribuição dos valores unitários medidos para o parâmetro Zinco total, apresentada no *box-plot* (Figura 45), mostra baixa variabilidade, com coincidência entre quartis em quase todas as bacias hidrográficas. As medianas das bacias têm valores próximos, todos em torno de 0,05 mg/l, não havendo diferença clara entre os períodos seco e chuvoso. O limite legal deste parâmetro, estabelecido dn DN Conjunta COPAM/CERH 08/22, é de 0,18 a 5,0 mg/l Zn. Portanto, nenhuma bacia hidrográfica apresenta mediana que ultrapasse sequer o limite mais restritivo da norma. No entanto, a BH do Rio São Francisco apresenta grande quantidade de *outliers* acima do limite superior, que ultrapassam 10 mg/l.

A espacialização das medianas históricas por estação mostra que não houve superação do valor para o padrão menos restritivo (classe III), mas somente para o padrão de águas doces classes I e II, que é de 0,18 mg/l. A estação PV015 tem mediana igual a 4,5 mg/l, que ultrapassa o mencionado limite em 25 vezes; esta é a mesma estação na qual houve superação do limite legal para o parâmetro Níquel total, situada no córrego Sarandi, município de Contagem.

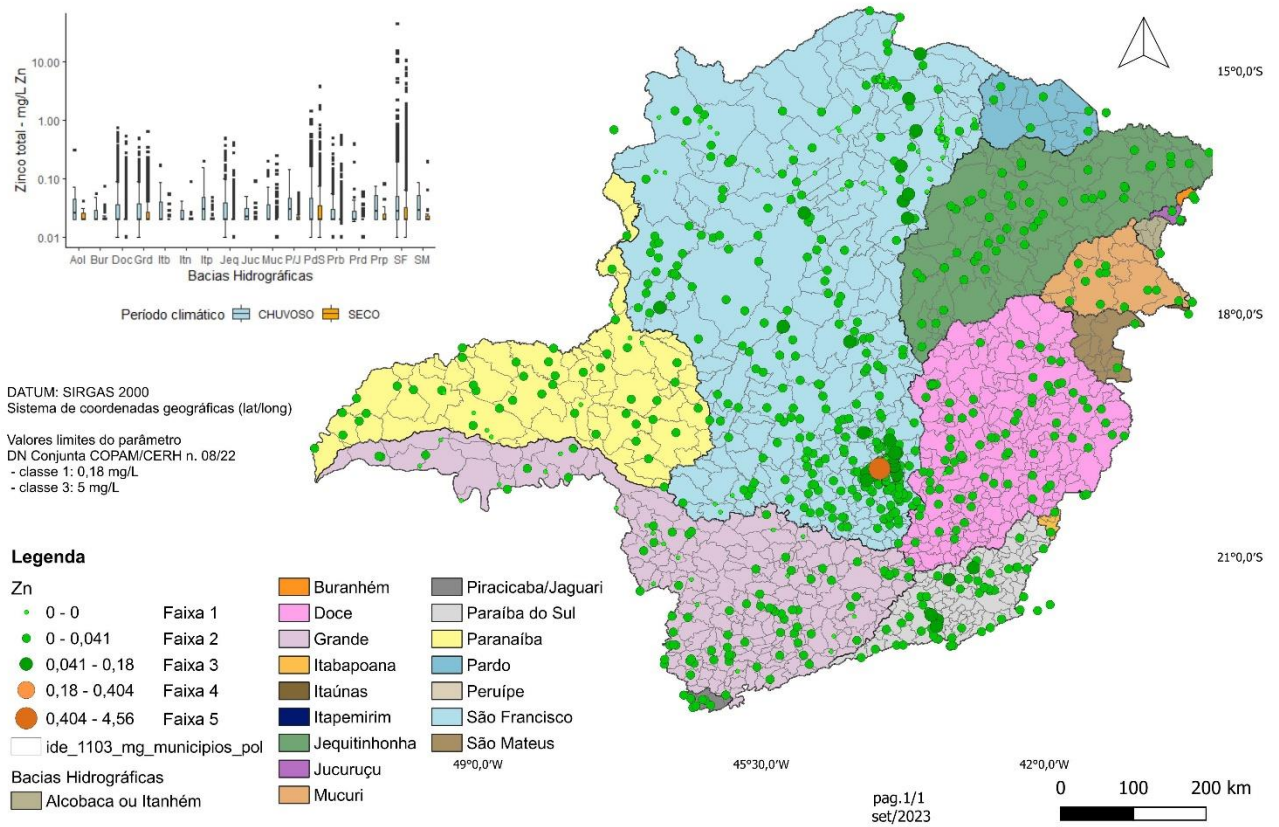
A análise de autocorrelação espacial mostra a formação de apenas um *cluster* do tipo alto-alto, localizado na estação PV015 e seu entorno. Isto indica que o problema, apesar de parecer centrado em uma estação, pode ser difuso, afetando toda a área deste *cluster* limitada pelos *outliers* do tipo baixo-alto. Há ainda um outlier do tipo alto-baixo na BH do Paranaíba. Segundo a Viglio (2018), os principais locais de ocorrências de zinco no estado estão nas regiões de Vazante, no oeste; Montalvânia, no norte; e na região metropolitana de Belo Horizonte, associados a rochas carbonáticas do Grupo Bambuí.

As medianas por bacia hidrográfica do parâmetro Cor verdadeira (Figura 46) apresentam variações de 20 a 110 uH, com aumento nos períodos chuvosos. Quatro bacias apresentam muitos *outliers* superiores; são as bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha e São Francisco, as quais atingem valores de 10.000 uH. O limite estabelecido para Cor verdadeira na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 varia da cor natural do curso d'água, para águas doces de classe I, a 75 mg Pt/L, para as de classe II e classe III. Segundo Libânio (2010), os valores de cor verdadeira de águas naturais estão entre 0 e 200 uH, e, quando o valor é inferior a 10 uH, a cor verdadeira é praticamente imperceptível.

A distribuição espacial das medianas históricas do parâmetro Cor verdadeira mostra muitas estações na faixa 3, dentro do limite legal menos restritivo. As estações que ultrapassam totalmente este limite estão nas bacias dos rios Grade, Itaúnas, Jequitinhonha, Mucuri e São Francisco.

Figura 45 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Zinco total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Zinco total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Zinco total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

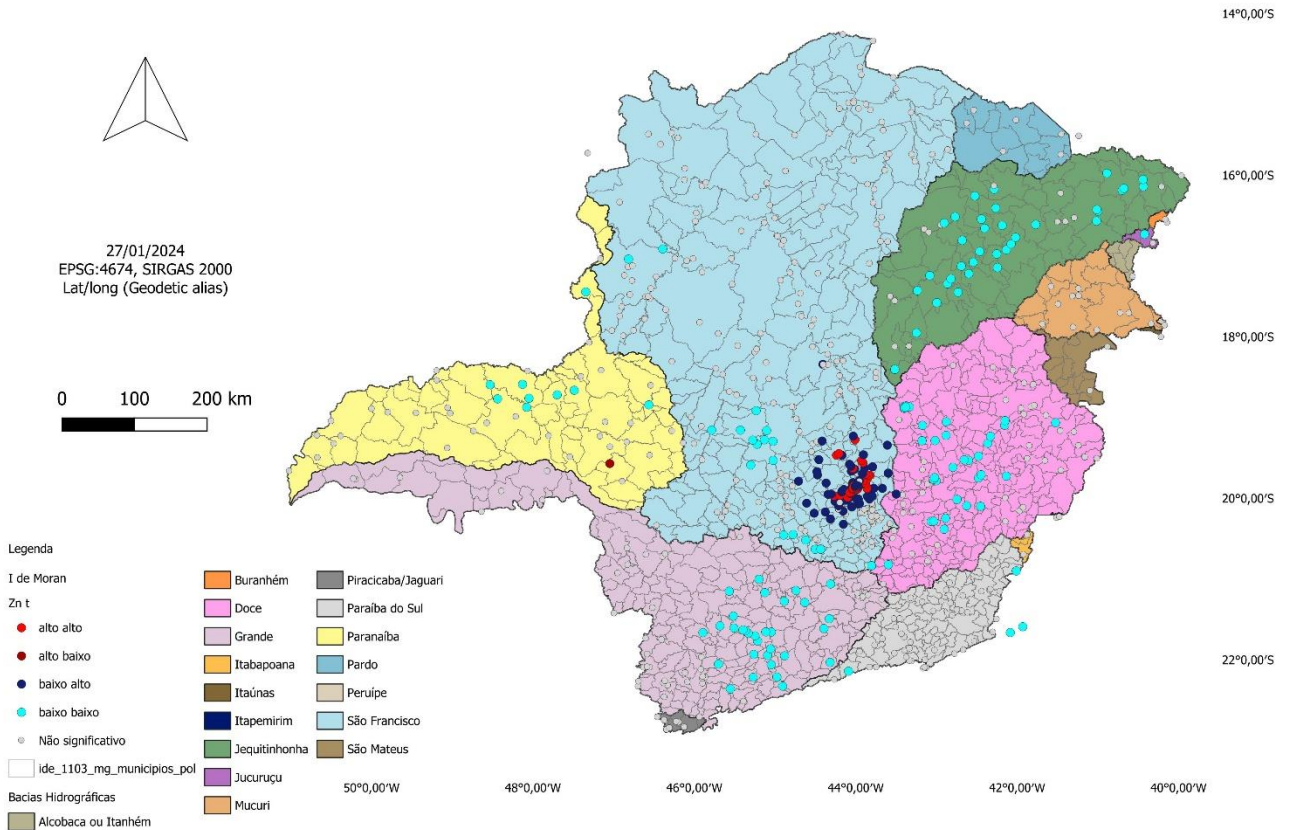
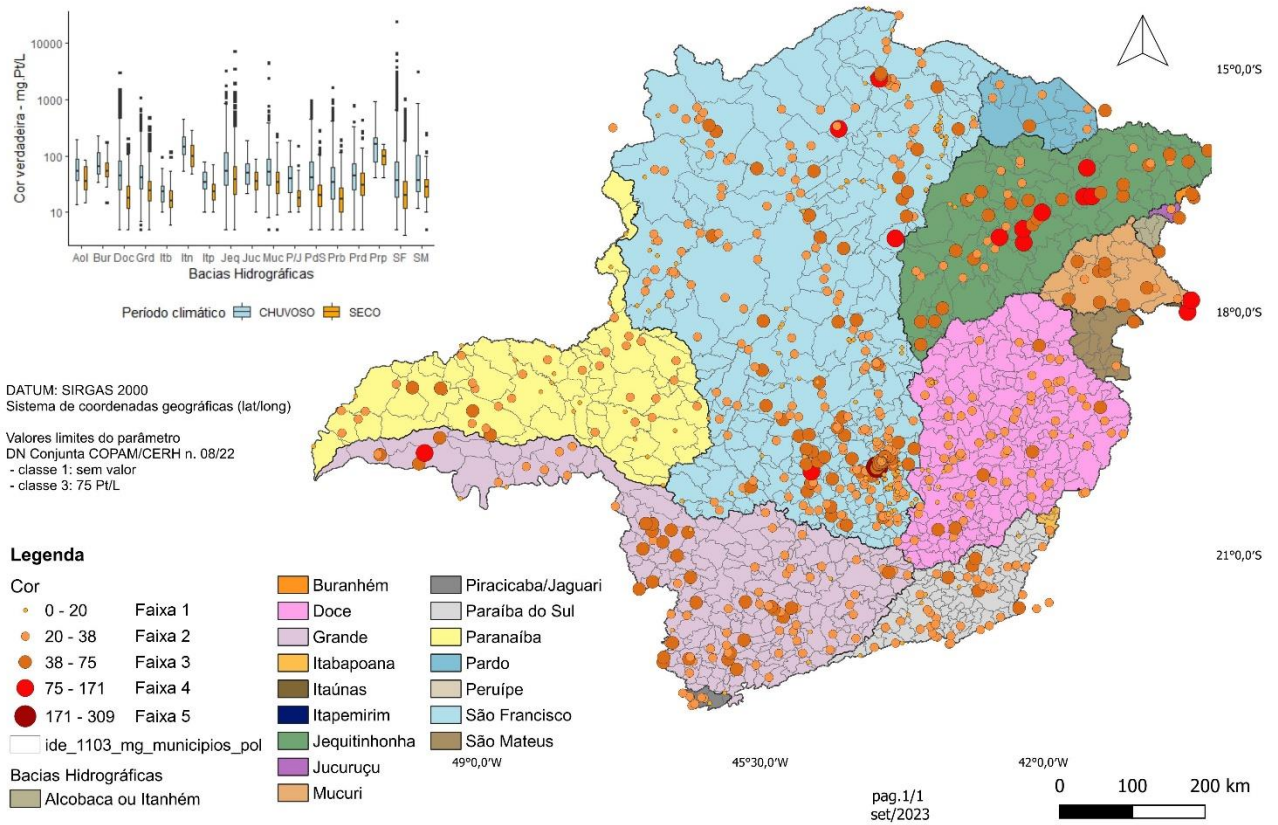
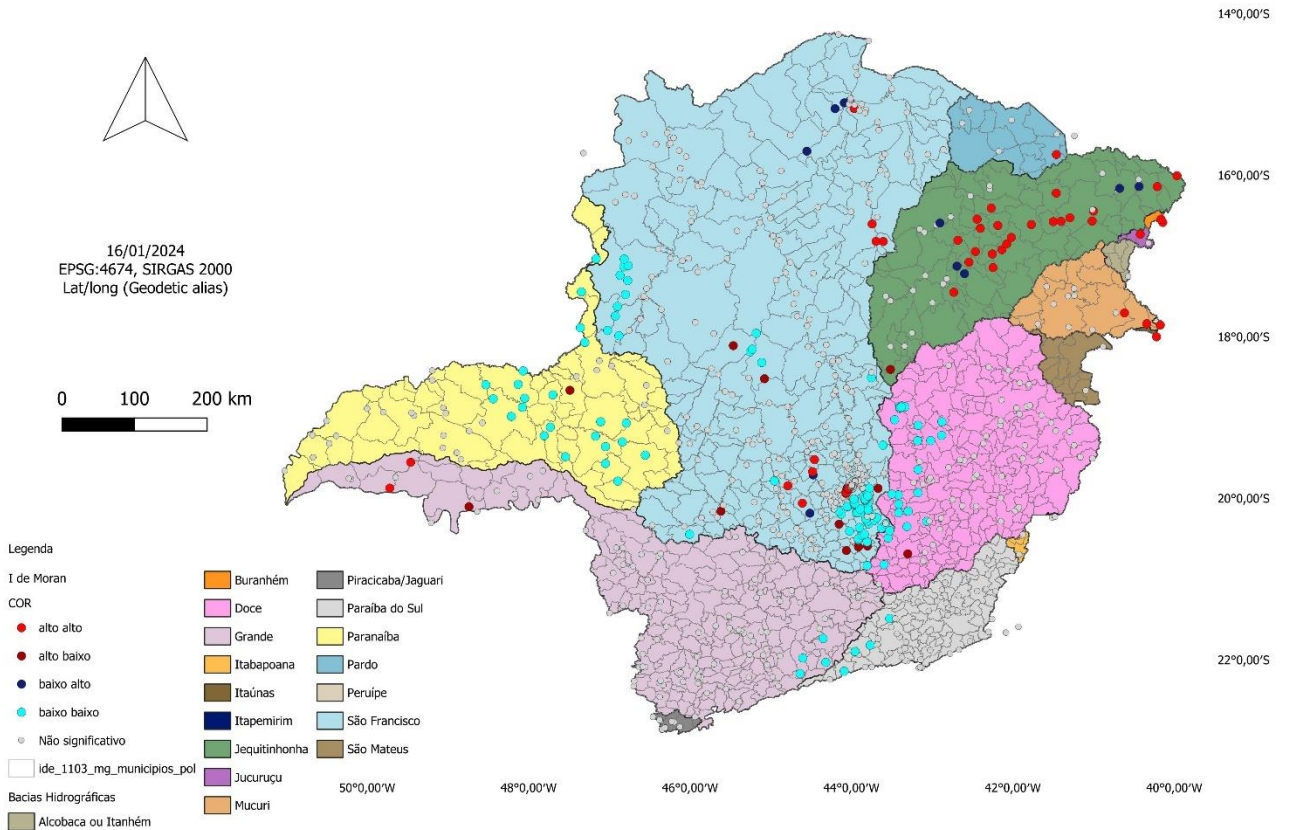


Figura 46 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Cor verdadeira

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Cor verdadeira (Pt/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Cor verdadeira (mg/L) no Estado de Minas Gerais



A autocorrelação espacial encontrou diversos *clusters* alto-alto, em especial nas áreas de ocorrência das estações com medianas na faixa 5. Na BH do Rio Grande, o *cluster* alto-alto tem duas estações e está na CH do Baixo Rio Grande; nas BHs dos rios Itaúnas e Mucuri, formou-se um *cluster* alto-alto no extremo leste; na BH do Jequitinhonha, formou-se um grande *cluster* que toma quase a totalidade de sua extensão; por fim, na BH do rio São Francisco, há dois *clusters*, um na CH rio das Velhas e outro na CH Rio Verde Grande.

Muitas são as fontes do aumento de cor verdadeira da água, podendo-se citar substâncias naturais resultantes da decomposição parcial de compostos orgânicos, efluentes domésticos, efluentes industriais que contêm taninos, anilinas, lignina e celulose, compostos inorgânicos como óxidos de ferro e manganês, que são abundantes em diversos tipos de solo e ainda alguns metais presentes em efluentes industriais (CETESB, 2016).

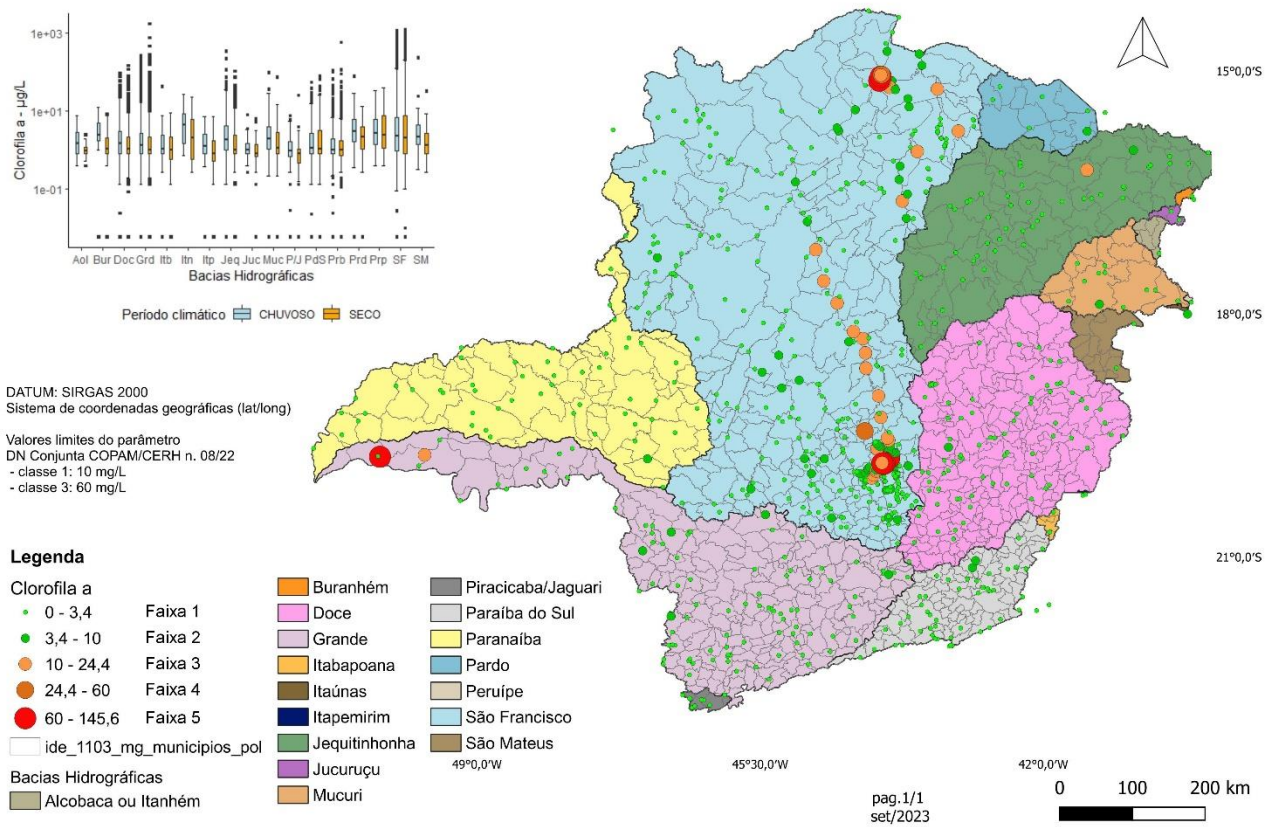
Os valores por estação amostral do parâmetro Clorofila a (Figura 47) têm amplitude semelhante entre as Bacias Hidrográficas, e alto número de *outliers* superiores nas bacias dos rios Doce, Grade, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco. Os limites legais deste parâmetro estabelecidos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 vão de 10 a 60 µg/L. Sendo assim, a amplitude interquartil em todas as Bacias hidrográficas está dentro destes valores, enquanto os *outliers* atingem 1000 µg/L nas bacias dos rios Grande e São Francisco.

Corroborando os resultados do *box-plot*, os maiores valores de medianas históricas estão distribuídos apenas nas bacias dos rios Grande e São Francisco. Neste, encontra-se um padrão antes visto para o parâmetro Arsênio total, em que uma estação com mediana na faixa 5, de maior valor, está na RMBH, na calha do rio das Velhas, e as estações que seguem à jusante decrescem de faixa, até atingir o menor valor (de 3,4 a 10 µg/L). Ainda nesta bacia, há uma concentração de duas estações nas faixas 4 e 5 no extremo norte. Na BH do Rio Grande, a única estação com mediana na faixa 5 é a BG086, que fica na calha do rio Santa Rosa, afluente do rio Verde, à jusante da cidade de Iturama.

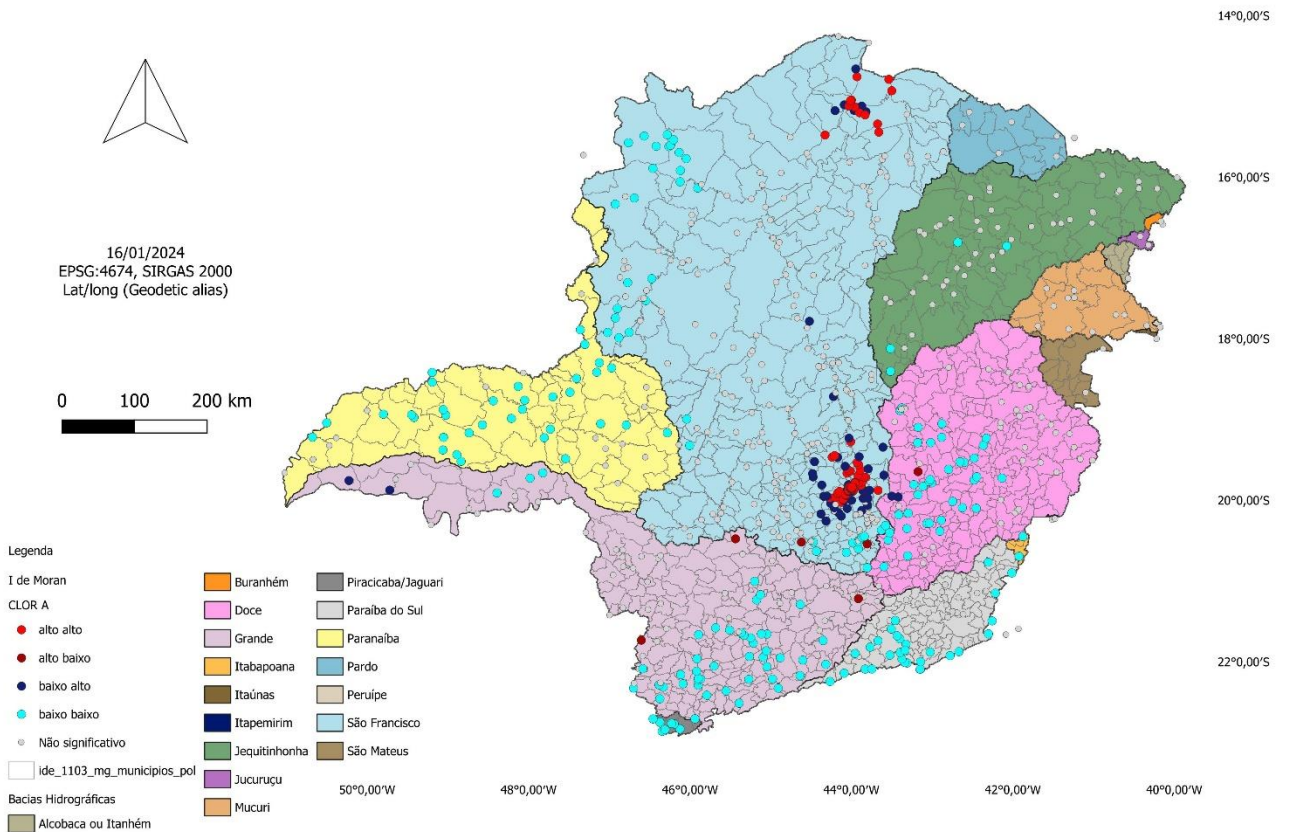
O parâmetro Clorofila a (Figura 47) apresenta um *cluster* alto-alto na porção central do estado, na CH do Rio das Velhas, e um segundo pequeno *cluster* no extremo norte, nas cidades de Jaíba e Matias Cardoso, CH do Rio Verde Grande. Nota-se que o *cluster* formado na CH do Rio das Velhas é limitado ao norte por uma estação classificada como *outlier* do tipo baixo-alto, o que limita os altos valores de clorofila a ao primeiro terço do rio, tornado o resultado de distribuição espacial das medianas mais preciso.

Figura 47 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Clorofila a

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Clorofila a ($\mu\text{g/L}$) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Clorofila a ($\mu\text{g/L}$) no Estado de Minas Gerais



A clorofila a é um indicador da biomassa algal e a principal variável indicadora de estado trófico dos ambientes aquáticos (CETESB, 2016). Assim, entende-se que há degradação difusa no estado trófico dos corpos d'água na CH Rio das Velhas, e pontual nas demais circunscrições mencionadas.

Os valores por estação para o parâmetro Densidade de Cianobactérias (Figura 48) mostra grande variabilidade dos dados e poucos *outliers*. As medianas das bacias hidrográficas têm valores próximos da ordem de 5.000 cel/mL, exceto para a BH do Rio São Francisco, que apresenta valor maior, especialmente no período seco comparado ao chuvoso. Neste caso, Libânio (2010) explica que longos períodos de estiagem em reservatórios de água, especialmente em regiões de maior insolação, favorecem o aumento da salinidade e da condutividade elétrica, que contribui para a floração de cianobactérias, que pode ainda ser intensificada pelo lançamento de esgotos ou outras fontes de aporte de nutrientes ao corpo d'água.

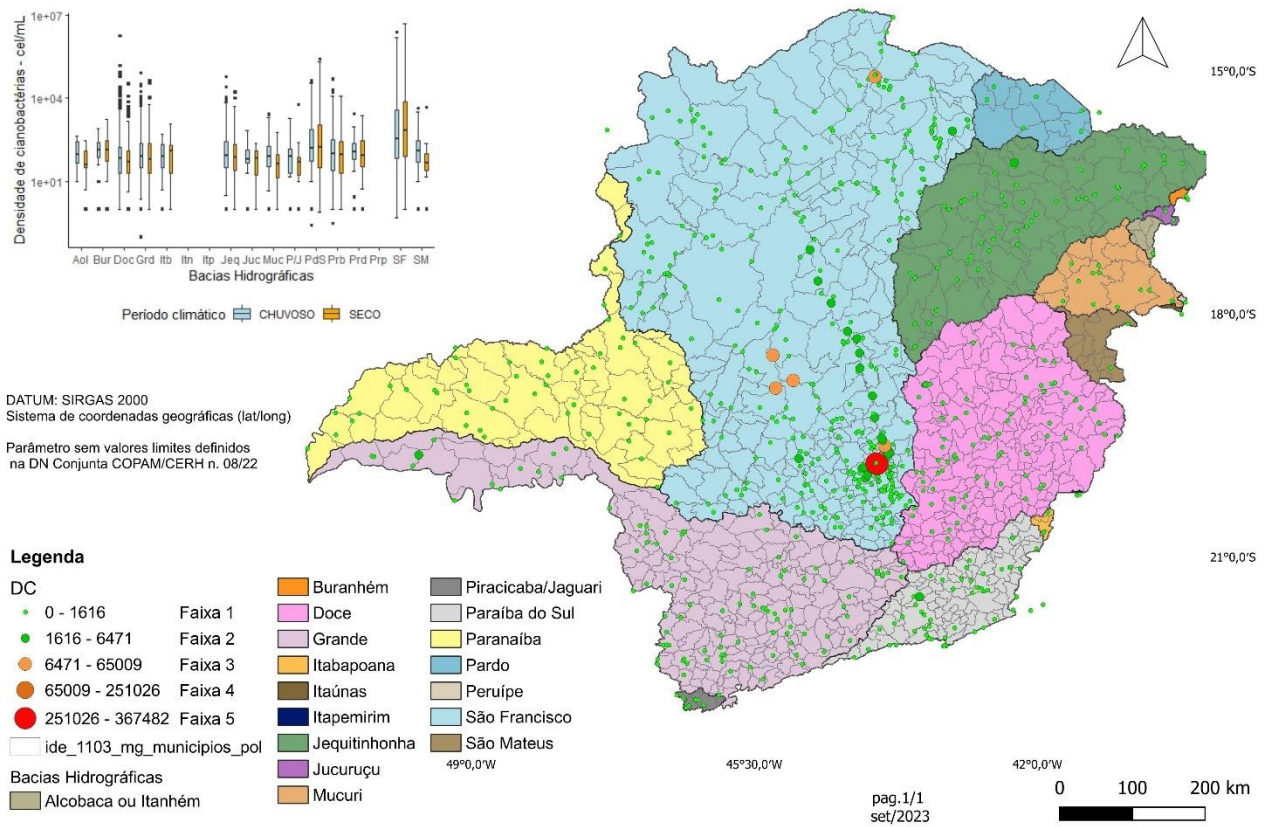
A distribuição das medianas históricas mostra que 99% das estações amostrais apresentam valores até 4153,4 cel/mL de cianobactérias, enquanto os limites dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 variam de 20.000 a 100.000 cel/mL, com exceções. Há, na BH do Rio São Francisco, especificamente na RMBH, estações com valores superiores a 6.471 cel/mL, chegando a 347.531 cel/mL na estação PV235, que fica na lagoa na Pampulha, Belo Horizonte, bem acima do limite menos restritivo da norma.

A estatística espacial mostra a formação de um único *cluster* do tipo alto-alto com seis estações, sendo três delas localizadas na lagoa da Pampulha. Há uma correlação conhecida entre os parâmetros Clorofila a e Densidade de cianobactérias; o coeficiente de *Spearman* calculado com base em pouco mais de 11.000 dados entre os parâmetros foi de 0.429638, uma correlação moderada. Alguns países europeus utilizam esta dupla de parâmetros para determinar a balneabilidade de lagos e reservatórios (Pronin, 2021).

O gráfico que apresenta os valores por estação amostral do parâmetro DBO (Figura 49) , cujos limites dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 variam de 3 a 10 mg/l O₂, têm primeiro quartil coincidente com o segundo nas Bacias Hidrográficas dos rios Buranhém, Itabapoana, Itaúnas, Paraíba do Sul, Peruípe e São Francisco, mostrando a baixa variabilidade destes dados, já que 50% deles apresentam o mesmo valor. Já nas bacias dos rios Alcobaça, Jucuruçu, Mucuri Piracicaba, Paranaíba, Pardo e São Mateus, o intervalo interquartil é igual a zero, o que significa que 75% dos valores do parâmetro por estação são iguais.

Figura 48 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Densidade de Cianobactérias

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Densidade de cianobactérias (cel/mL) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Densidade de cianobactérias (cel/mL) no Estado de Minas Gerais

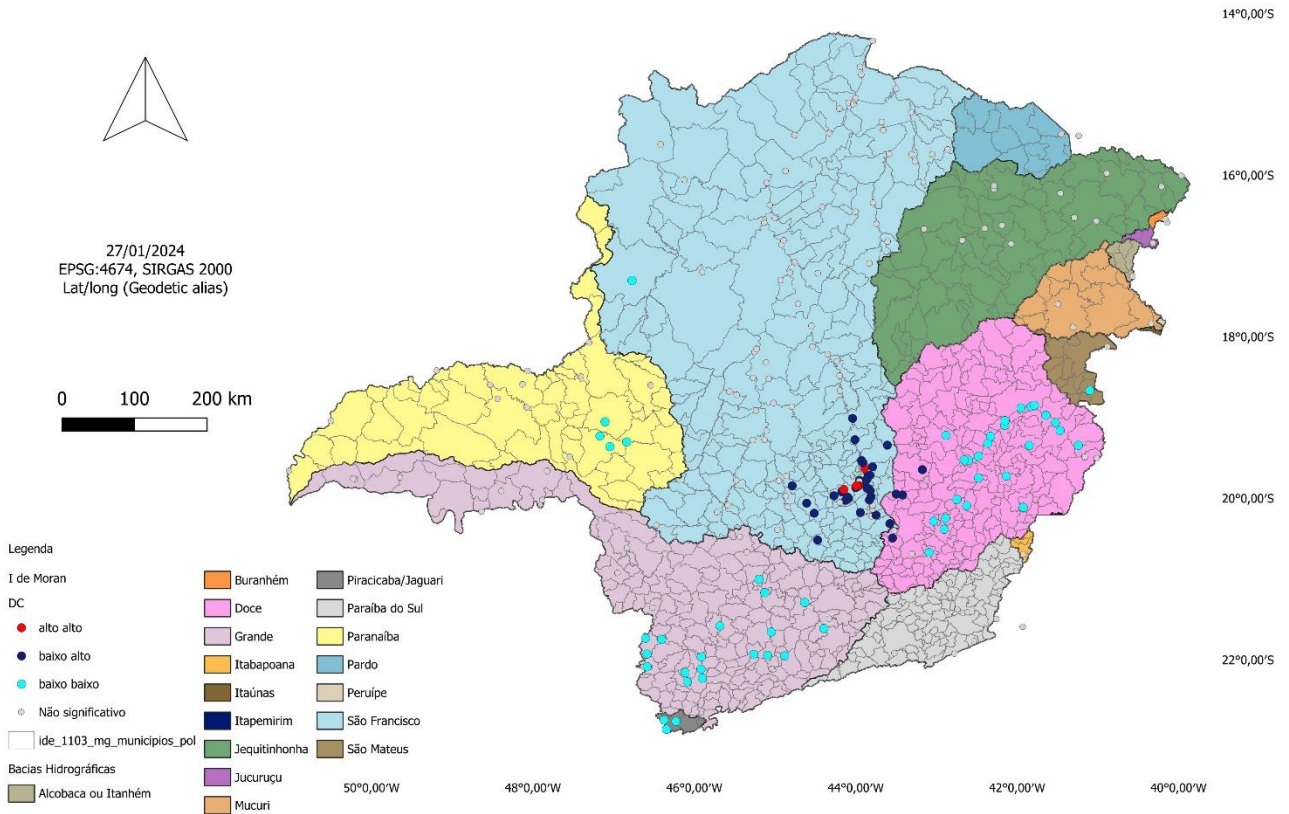
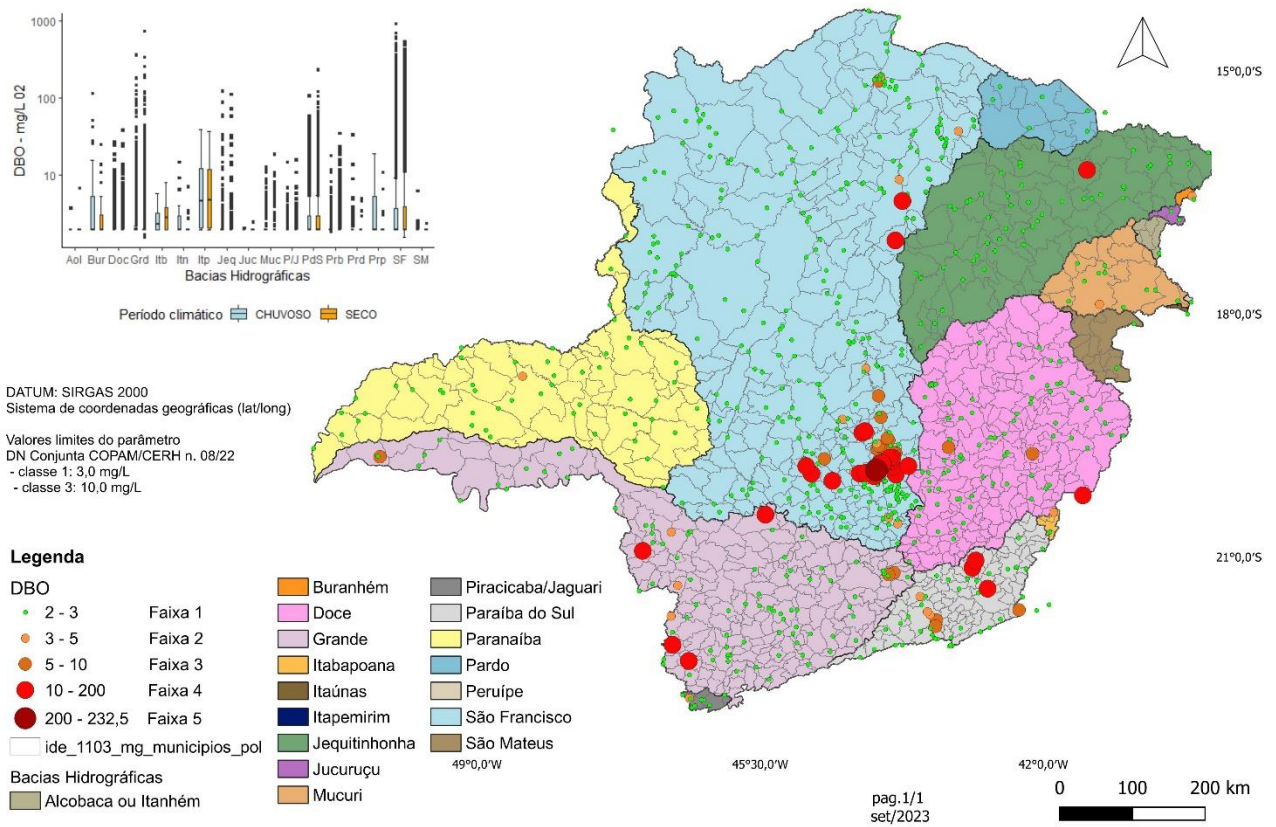
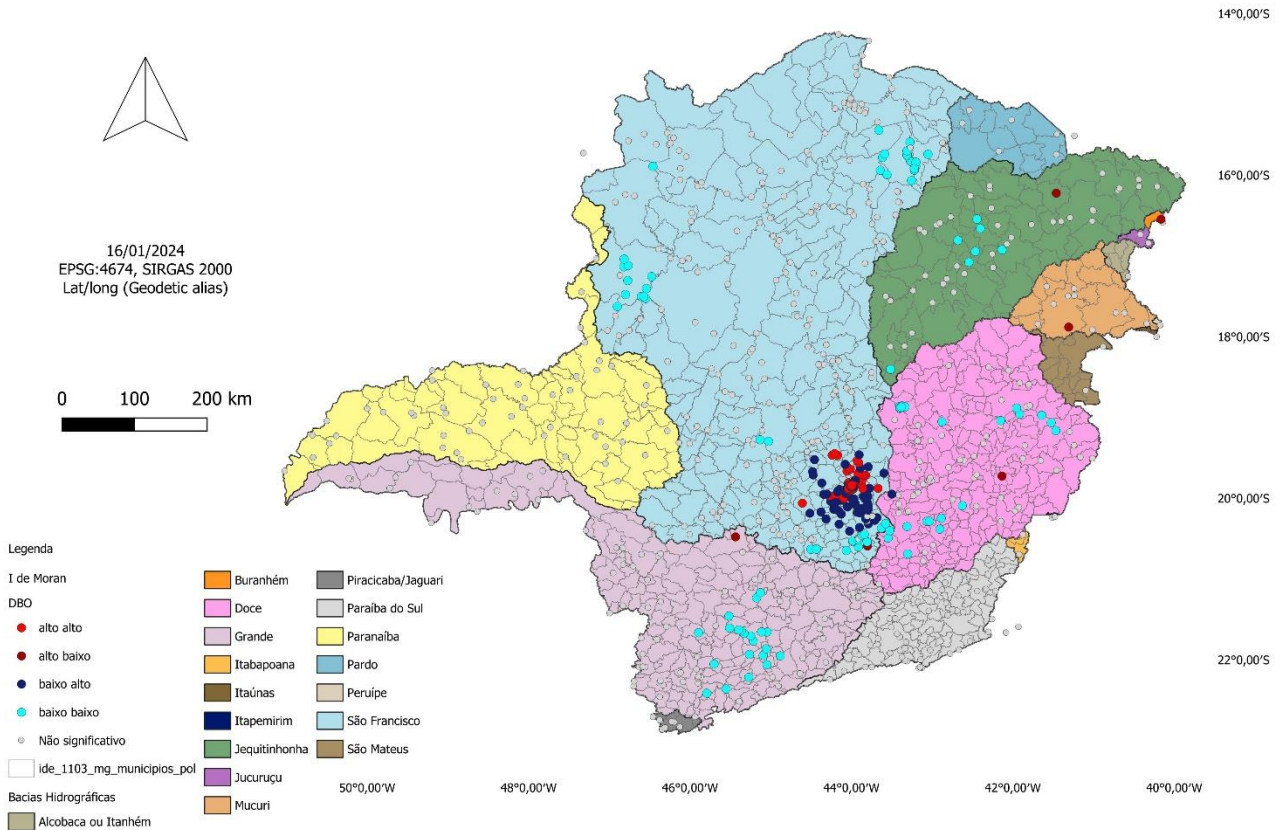


Figura 49 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de DBO

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (mg/L) no Estado de Minas Gerais



A distribuição das medianas históricas deste parâmetro apresenta quase todas as estações com valores até 3 mg/l, abaixo do limite menos restritivo da DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22. Há um agrupamento de estações com valores de medianas nas faixas 4 e 5, as mais altas, na BH do Rio São Francisco, especificamente na RMBH. Ainda, há estações com mediana de valor acima de 10 mg/l nas Bacias Hidrográficas dos Rios Grande, Itapemirim, Jequitinhonha e Paraíba do Sul.

O aparente agrupamento de estações com altos valores de DBO nas CHs dos rios das Velhas e Paraopeba confirma-se com o resultado da autocorrelação espacial, em que se forma neste local um *cluster* do tipo alto-alto entre as calhas dos rios principais. Este, por sua vez, é limitado por *outliers* do tipo baixo-alto. Algumas estações com valores nas faixas 3 e 4 formam *outliers* do tipo alto-baixo em suas respectivas localidades, e indicam degradação pontual da qualidade da água sob o aspecto da DBO.

Os dados do parâmetro Fósforo total (Figura 50) mostram alta variabilidade entre as Bacias Hidrográficas estudadas, com valores de limites superiores bem diferentes entre si. O maior valor é atingido na BH do Rio São Francisco, onde se aproxima de 10 mg/l P. Há grande quantidade de *outliers* nas bacias dos rios Grande, Jequitinhonha e São Francisco. Os valores limites estabelecidos para Fósforo total na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 dependem do tipo de ambiente. Considerando ser interessante entender a ordem de grandeza dos valores do parâmetro, indica-se nesta pesquisa o limite para ambientes lóticos, em que estão inseridas a maioria das estações amostrais, que varia de 0,10 a 0,15 mg/l.

A distribuição das medianas históricas mostra que boa parte das estações tem medianas com valores na faixa 1, até 0,1 mg/l, abaixo do limite mais restritivo. Observa-se a ocorrência de estações com valores de medianas nas faixas 4 e 5 nas bacias hidrográficas dos rios Doce, Grande, Itapemirim, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco. Nesta, estes valores concentram-se, como para diversos outros parâmetros, na RMBH, com estações na faixa 5 no início do Rio das Velhas, seguindo a jusante com estações nas faixas 4 e 3, e na região de Montes Claros, CH do rio Verde Grande. Na bacia do rio Jequitinhonha, na região de Salinas, uma estação apresenta valor na faixa 5 (de 0,94 a 1,4 mg/l), ou seja, pelo menos seis vezes maior que o limite menos restritivo.

Com um resultado muito semelhante ao de DBO, a autocorrelação espacial para o Fósforo total retornou um *cluster* do tipo alto-alto, localizado nas CHs dos rios das Velhas e Paraopeba, circundado por estações classificadas como *outliers* baixo-alto. Outro *cluster*

unitário foi identificado na BH do Rio Grande, município de Iturama. Apesar da estação JE029, na bacia do rio Jequitinhonha, ter sido classificada como não significativa, na autocorrelação, o valor de fósforo 10 vezes maior que o limite legal menos restritivo demanda análises pormenorizadas para identificação de poluição por fósforo pontual no corpo hídrico.

Altos valores de fósforo estão associados ao despejo de efluentes domésticos, mas podem ser provenientes também de efluentes industriais e de atividades agrícolas (CETESB, 2016), estas menos comuns na RMBH.

A série nitrogenada composta por Nitrato, Nitrito e Nitrogênio amoniacal apresenta padrões diferentes de distribuição dos dados por bacia hidrográfica e de distribuição espacial das medianas históricas por estação de monitoramento.

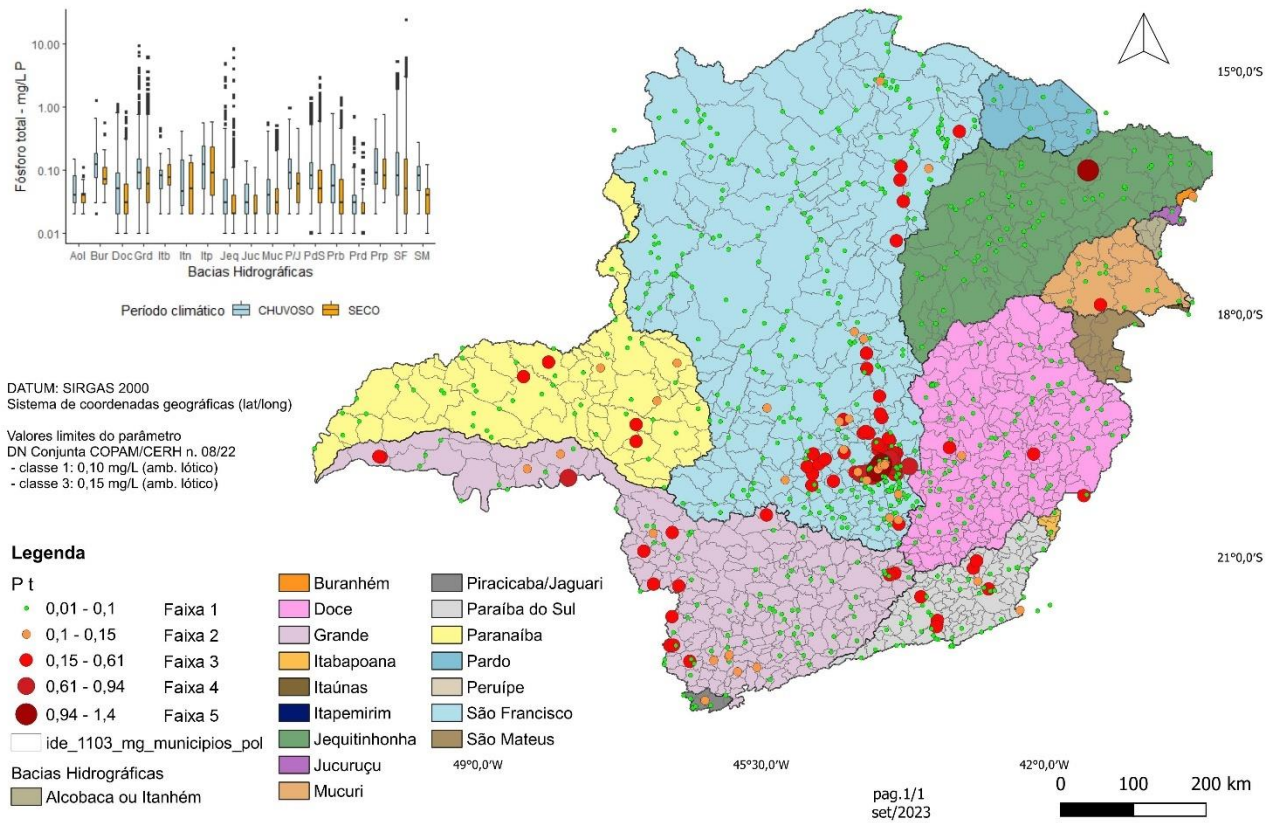
As medianas do parâmetro Nitrato (Figura 51) variam bastante entre bacias, com valores que vão de 0,1 mg/l a 1,0 mg/l, e são maiores no período seco. Ademais, há poucos *outliers* de modo geral, sendo que alguns chegam a mais de 10 mg/l nas bacias dos rios Doce, Grande, Paraíba do Sul e São Francisco. O limite legal do parâmetro estabelecido na DN Conjunta CPRAM/CEHR 08/22 é igual a 10,0 mg/l N para águas de classes I, II e III. A distribuição espacial mostra que todas as estações têm medianas abaixo deste valor.

Uma fonte antrópica do Nitrato na água superficial é a lixiviação de fertilizantes em solos agrícolas; porém, a assimilação do nitrato pelas plantas faz com que as concentrações deste parâmetro sejam usualmente baixas nas águas superficiais, permanecendo inferiores a 2 mg/l (Libânio, 2010). Nota-se que nas bacias dos rios Jequitinhonha e São Francisco, existem estações com medianas que chegam a 4,7 mg/l N, o que indica uma parcela de origem antrópica do Nitrato nestas águas.

Os resultados de autocorrelação espacial para Nitrato mostram a formação de cinco *clusters* do tipo alto-alto. Dois destes na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições Rio das Velhas e Paraopeba e Verde Grande. Aquele que está nas CHs rio das Velhas e Paraopeba não está bem delimitado, pois estão mescladas as estações que formam o *cluster* alto-alto com as estações que formam *outliers* do tipo baixo-alto. Entretanto, é possível notar que ele segue ao longo das calhas dos rios principais, saindo de Congonhas até a altura do município de Curvelo.

Figura 50 – Mapas de análise espacial das medianas históricas de Fósforo total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Fósforo total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Fósforo total (mg/L) no Estado de Minas Gerais

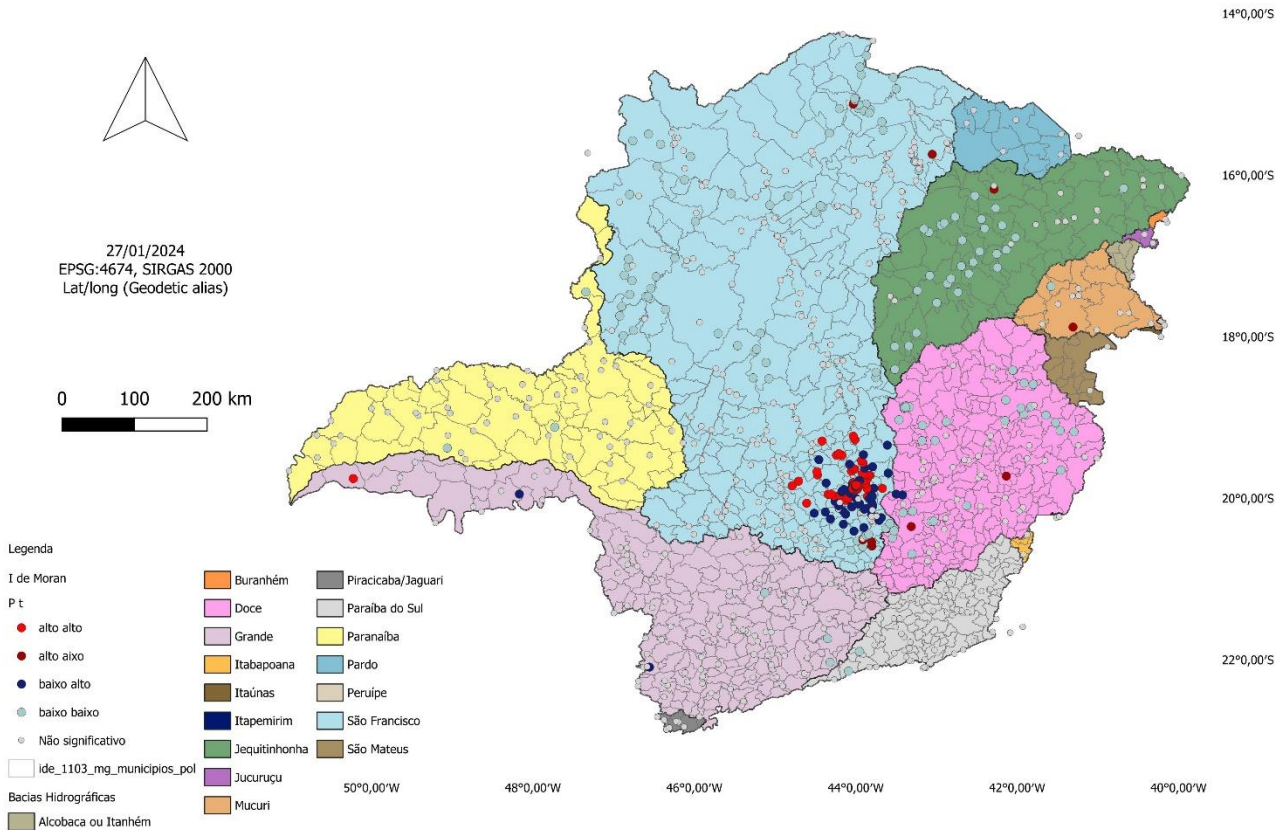
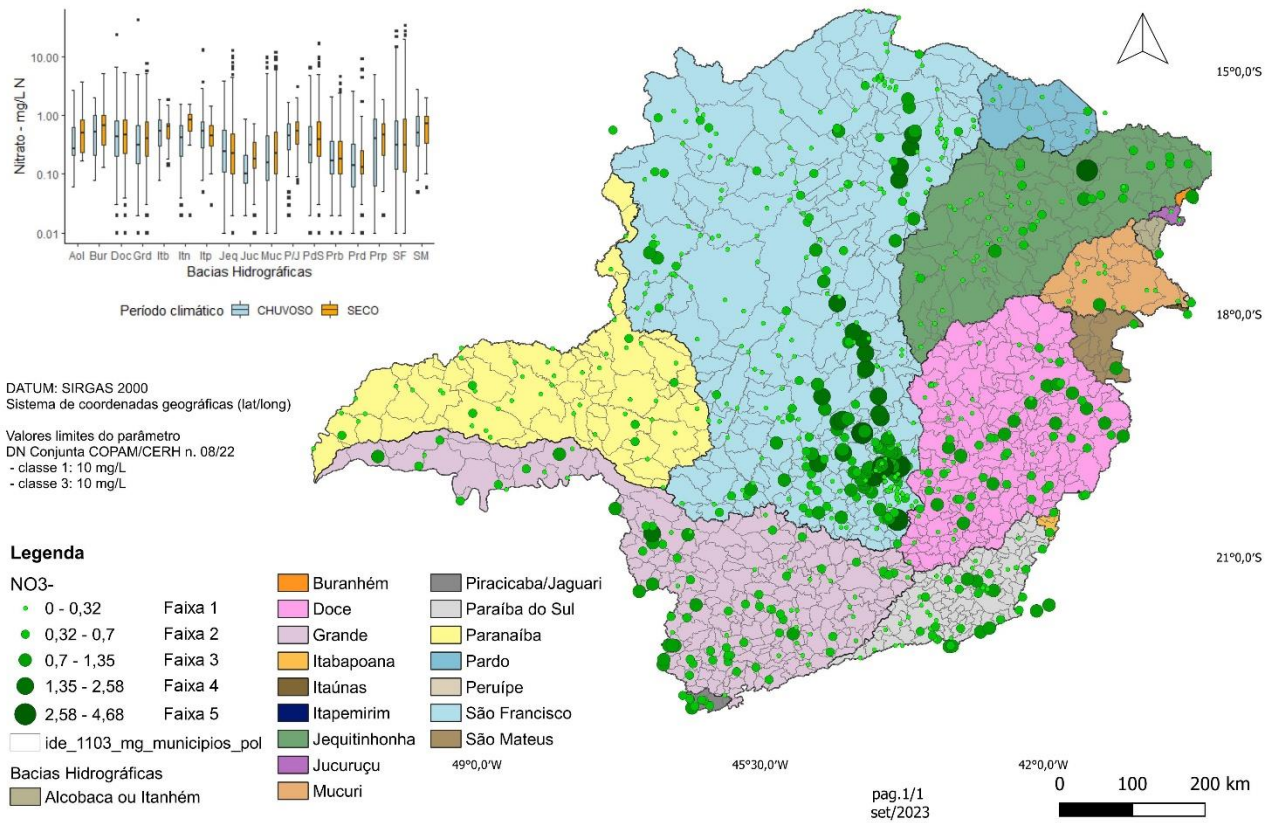
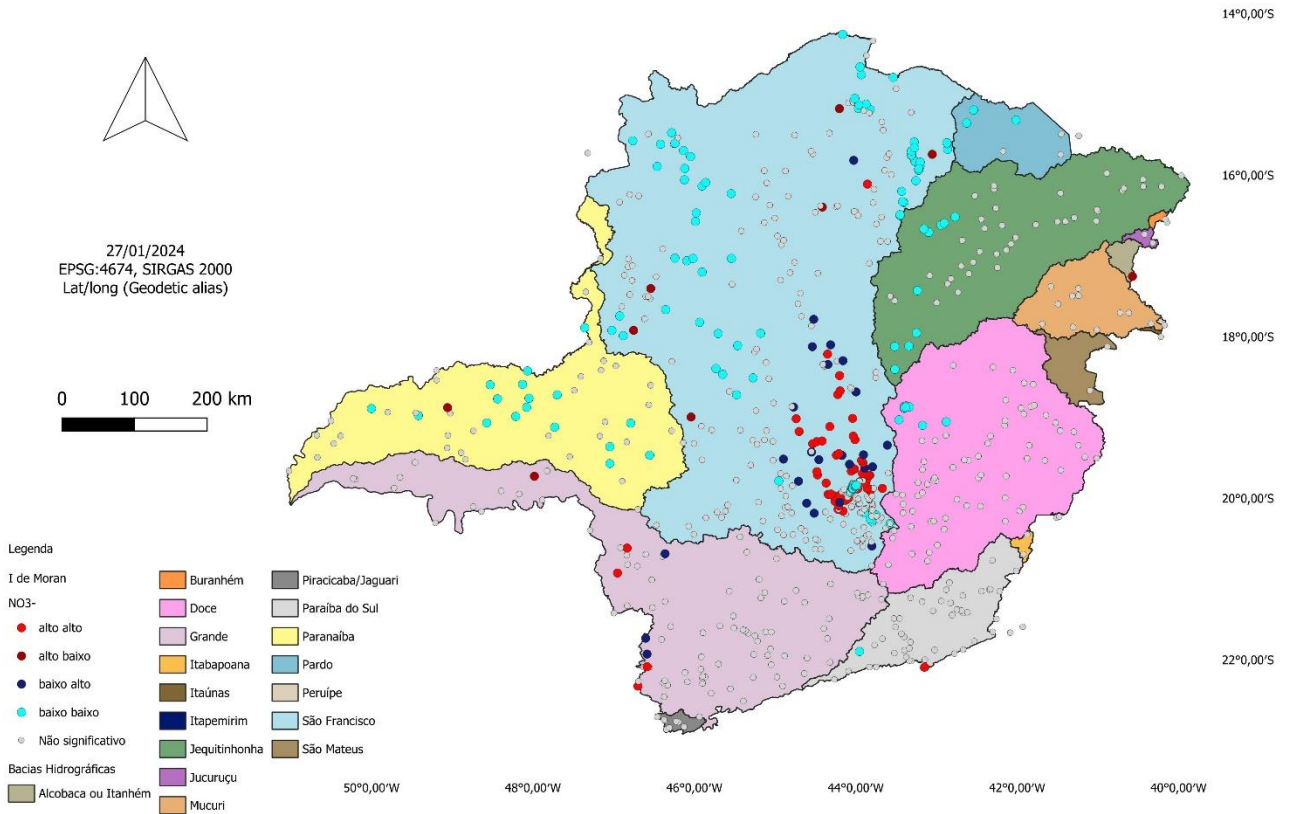


Figura 51 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrato

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Nitrato (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Nitrato (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Os outros dois *clusters* alto-alto estão localizados na BH do Rio Grande, nas CHs do Médio Rio Grande e afluentes dos rios Mogi-Guaçu e Pardo. Ainda há outro *cluster* na BH do Rio Paraíba do Sul, unitário, sobre a calha do rio Paraibuna.

O Nitrito (Figura 52), por sua vez, é rapidamente oxidado a Nitrato, de modo que é encontrado em concentrações insignificantes sob condições aeróbias (Libânio, 2010). Assim, nota-se que quase todas as medianas das bacias hidrográficas em ambos os períodos climáticos apresentam valores entre 0,01 e 0,03 mg/l, à exceção da BH do Rio Itaúnas, que fica no nordeste do estado. O limite legal do parâmetro estabelecido na DN Conjunta CPRAM/CEHR 08/22 é igual a 1,0 mg/l para águas de classes I, II e III, este ultrapassado apenas por alguns *outliers* nas bacias do Jequitinhonha e São Francisco. A distribuição espacial das medianas históricas por estação mostra que nenhuma dela supera o limite legal, sendo as de maior valor localizadas na porção central do estado, abrangendo as bacias dos rios Doce, Grande e São Francisco.

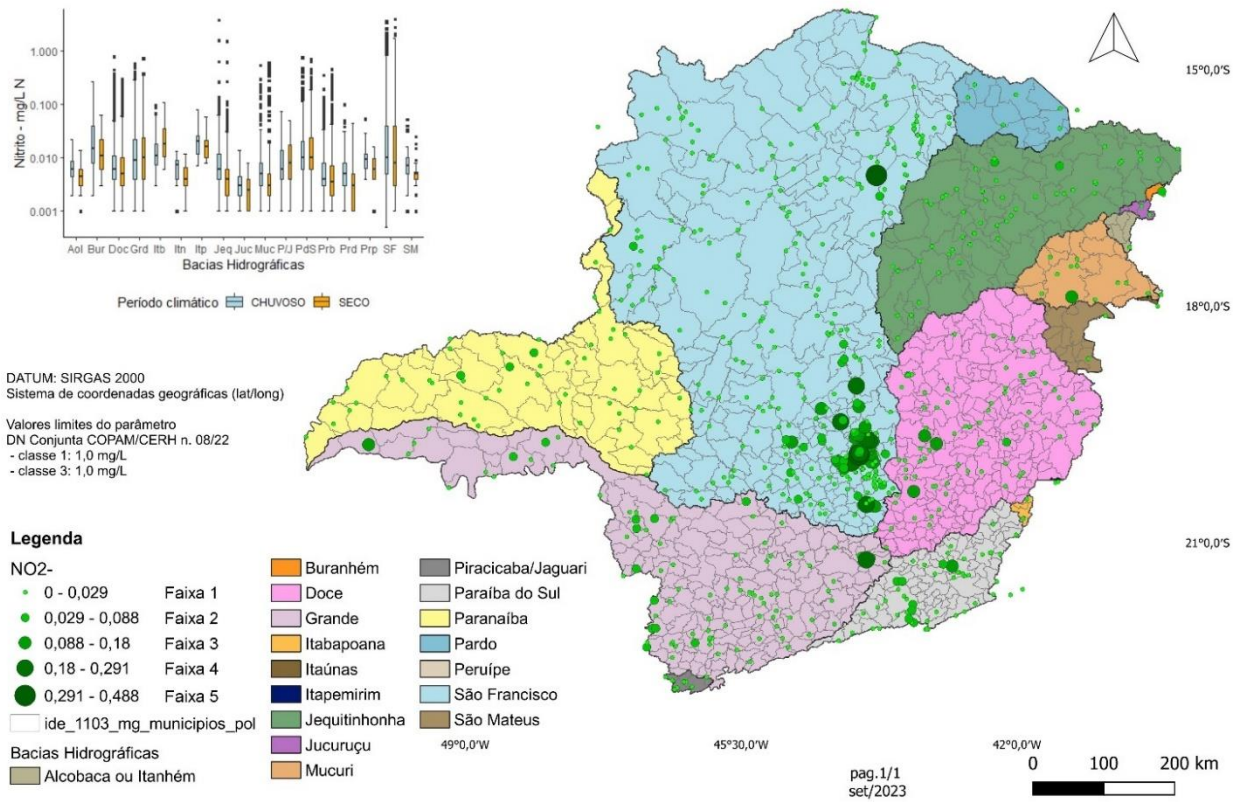
Os resultados de autocorrelação espacial para Nitrito também mostram a formação de cinco *clusters* do tipo alto-alto, novamente sendo dois na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições Rio das Velhas, Paraopeba e Verde Grande. O primeiro é também mal delimitado, pois é entremeado de *outliers* do tipo baixo-alto. Nota-se que ele segue ao longo das calhas dos rios principais, de Conselheiro Lafaiete até Curvelo. Ainda, há *clusters* unitários na bacia do rio Doce, na CH Rio Piracicaba, e outros dois na do rio Grande.

O Nitrogênio amoniacal total (Figura 53), diferente das duas formas anteriores, é uma forma reduzida do Nitrogênio e, quando encontrado em águas superficiais, denota poluição recente, pois ainda não passou pelo processo de oxidação. Os efluentes domésticos são a principal fonte deste parâmetro nas águas superficiais, pois são ricos em ureia; contudo, efluentes industriais de atividades como indústrias químicas, petroquímicas e siderúrgicas também podem ser fontes de nitrogênio amoniacal. O limite legal do parâmetro estabelecido na DN Conjunta CPRAM/CEHR 08/22 varia de acordo com o pH da água.

Considerando que a presente pesquisa encontrou águas com pH variando majoritariamente entre 6,25 e 7,35, para fins de comparação, considerar-se-ão os limites entre 3,7 e 5,6 mg/l N. Nota-se que as medianas por bacia hidrográfica não ultrapassam 1,0 mg/l N, exceto na BH do Rio Itapemirim. Entretanto, há grande quantidade de *outliers* acima do limite superior da caixa nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco.

Figura 52 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrito

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Nitrito (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Nitrito (mg/L) no Estado de Minas Gerais

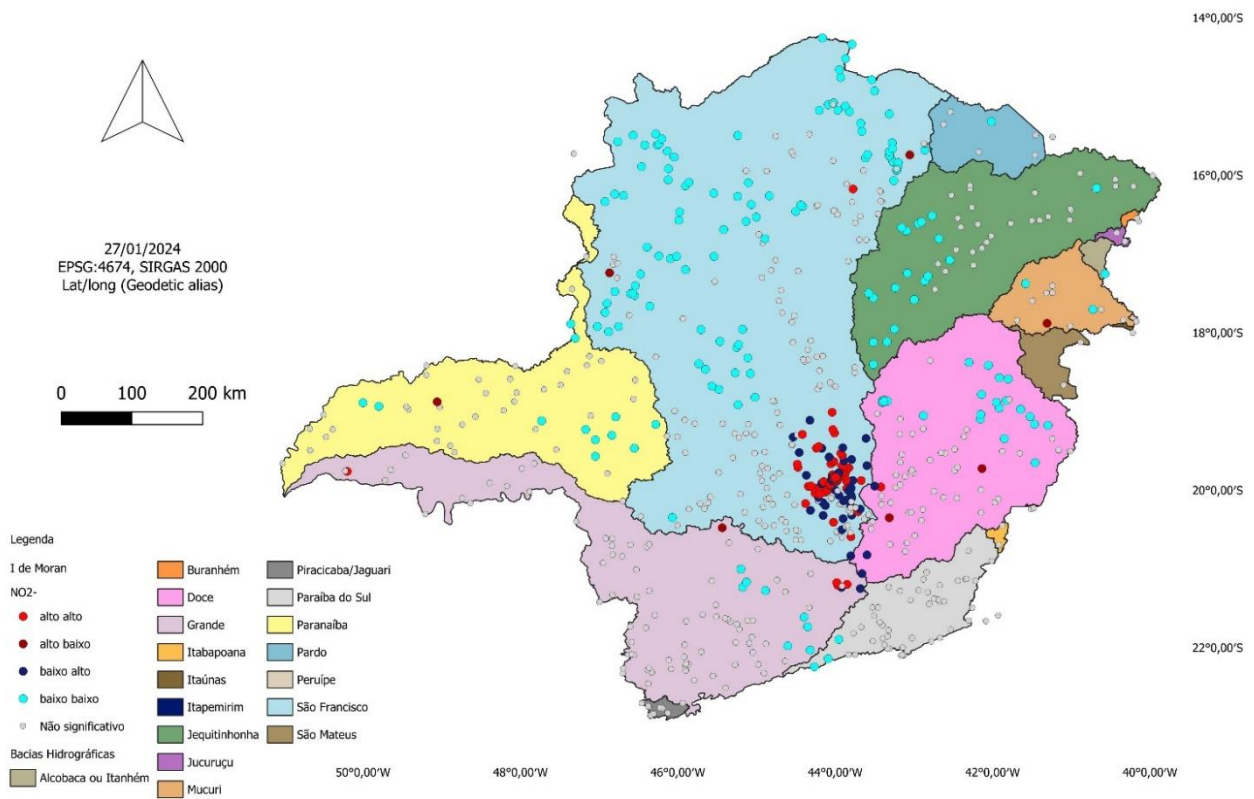
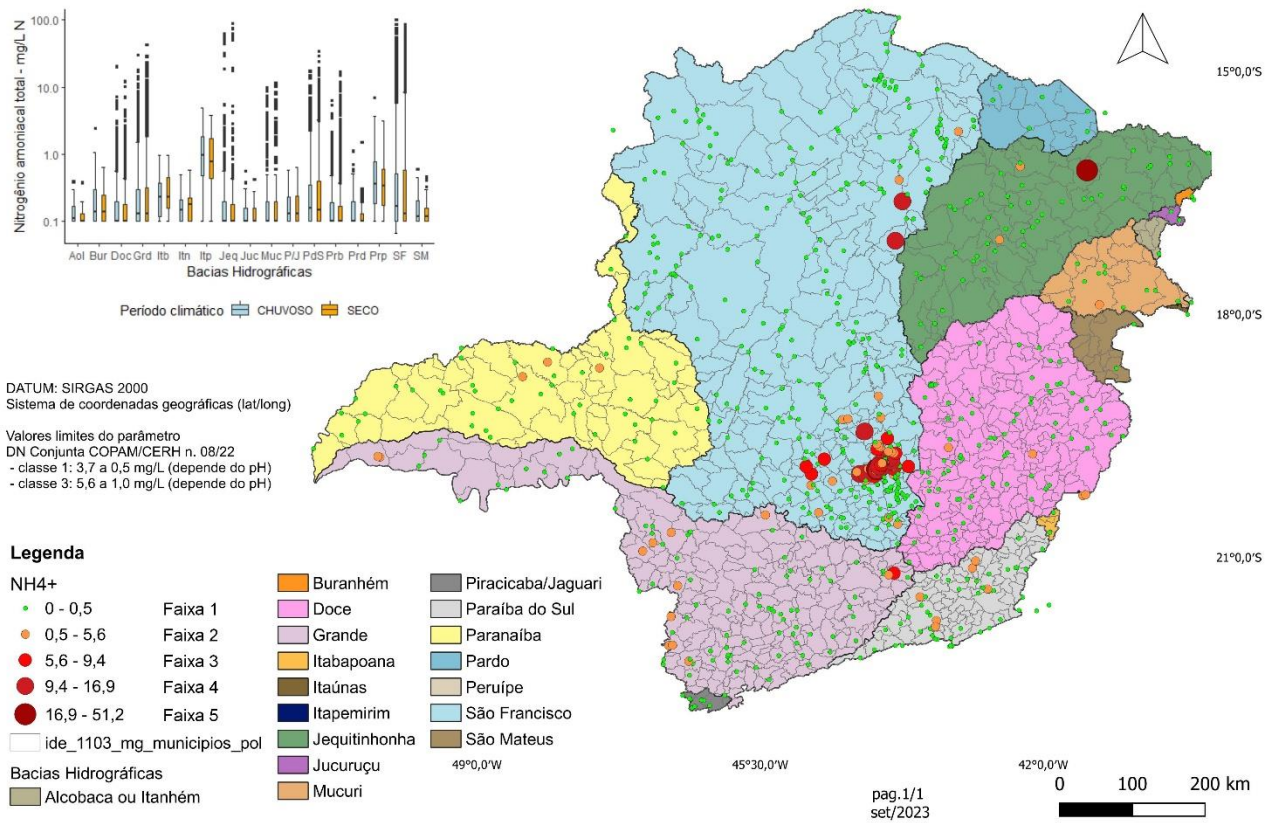
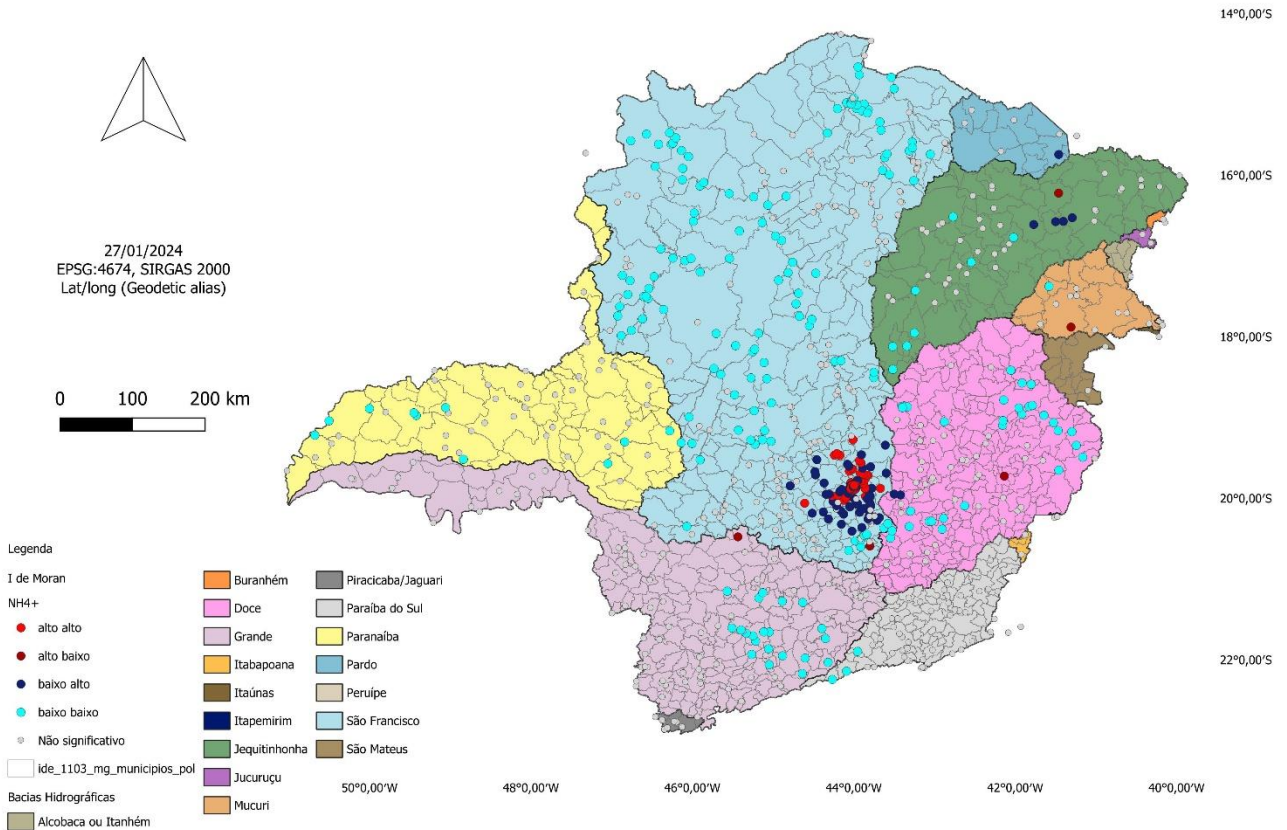


Figura 53 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Nitrogênio Amoniacal total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Nitrogênio amoniacal total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Nitrogênio Amoniacal total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



A distribuição espacial das medianas históricas apresenta quase todas as estações com valores considerados baixos (até 1,37 mg/l N). Ressalta-se que o pH é maior que 8,0 (quando o padrão de Nitrogênio amoniacal diminui) em poucas estações, concentradas nas bacias do São Francisco e Jequitinhonha. Valores acima do limite menos restritivo são encontrados em estações nas bacias do Grande, São Francisco e Jequitinhonha.

O resultado de autocorrelação mostra a formação de um único *cluster* alto-alto na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições Rio das Velhas e Paraopeba. Diferente dos anteriores, este *cluster* está bem limitado pelos *outliers* do tipo baixo-alto e não ocorre sobre a calha do Rio Paraopeba, que na verdade limita-o. Ademais, ocupa menor espaço, iniciando-se em Nova Lima e terminando na altura de Sete Lagoas.

A estação JE0029, com mediana na faixa 5, localizada na BH do Rio Jequitinhonha, no município de Medina, foi classificada como *outlier* do tipo alto-baixo, o que indica degradação pontual da água.

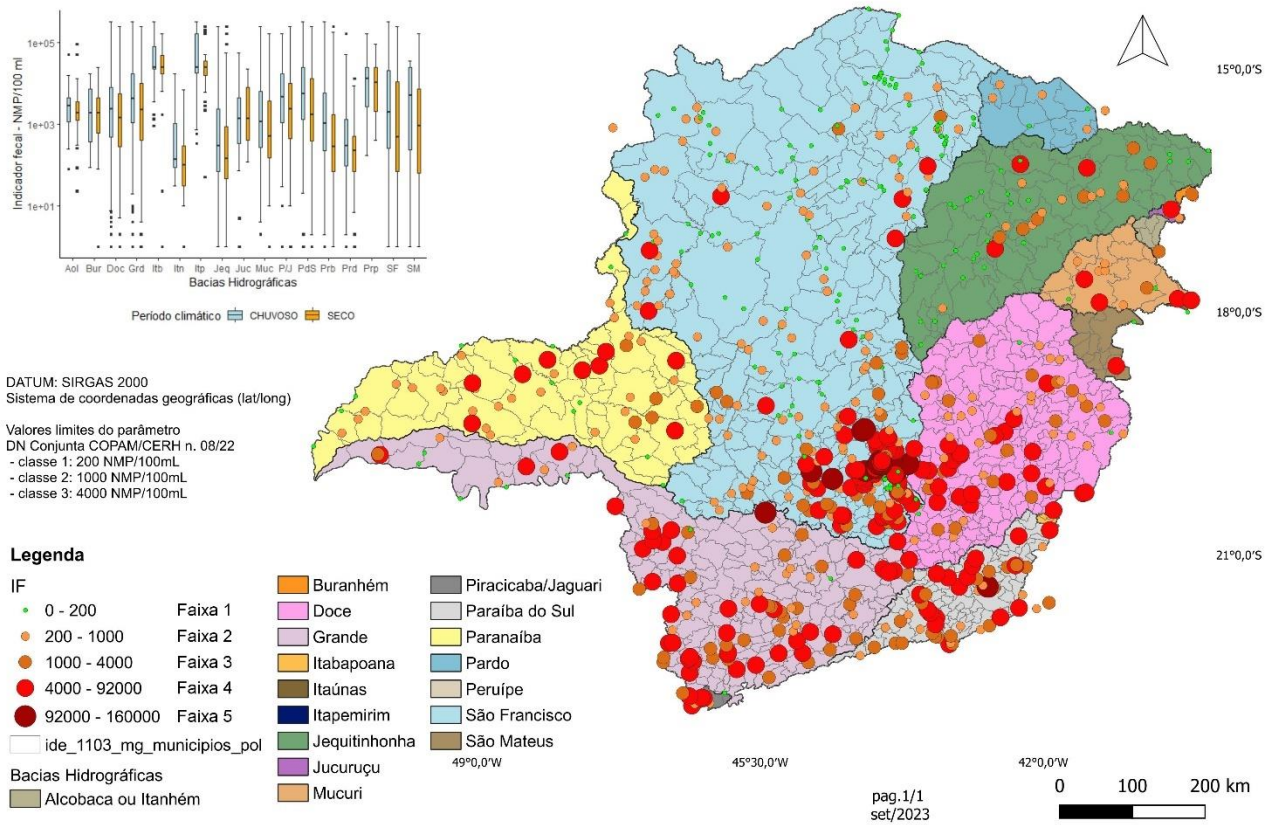
O *box-plot* com a distribuição dos valores do parâmetro Indicador Fecal (Figura 54) mostram grande variabilidade dos dados e poucos *outliers*. As medianas em ambos os períodos climáticos nas Bacias Hidrográficas dos rios Itabapoana e Itapemirim têm os maiores valores dentre as bacias. Os valores limites de Indicador fecal adotados são aqueles dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 para coliformes termotolerantes, e variam de 200 a 4.000 NMP/100 mL. Estes limites são superados em aproximadamente 20% das estações, ressaltando-se que os valores apresentados são de medianas obtidas a partir dos dados coletados ao longo de 20 anos.

Especialmente, nota-se um padrão diferente de todos os demais parâmetros estudados, pois há ampla distribuição de estações com medianas nas faixas 4 e 5 e estações que chegam a valores de 160.000 NMP/100 ml. Ocorrem também estações na faixa de valor 3 em quase todas as bacias, exceto Buranhém, Itaúnas e Itapemirim.

A distribuição espacial das medianas do parâmetro Indicador Fecal na BH do Rio São Francisco está disposta na Figura 55. A análise de autocorrelação espacial obteve como resultado a formação de um *cluster* alto-alto na RMBH entremeado por *outliers* do tipo baixo-alto (Figura 56**Figura 55**), o que torna desafiadora a delimitação da área em que a água superficial é afetada.

Figura 54 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Indicador Fecal

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Indicador fecal (NMP/100mL) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Indicador Fecal (NPM/100 mL) no Estado de Minas Gerais

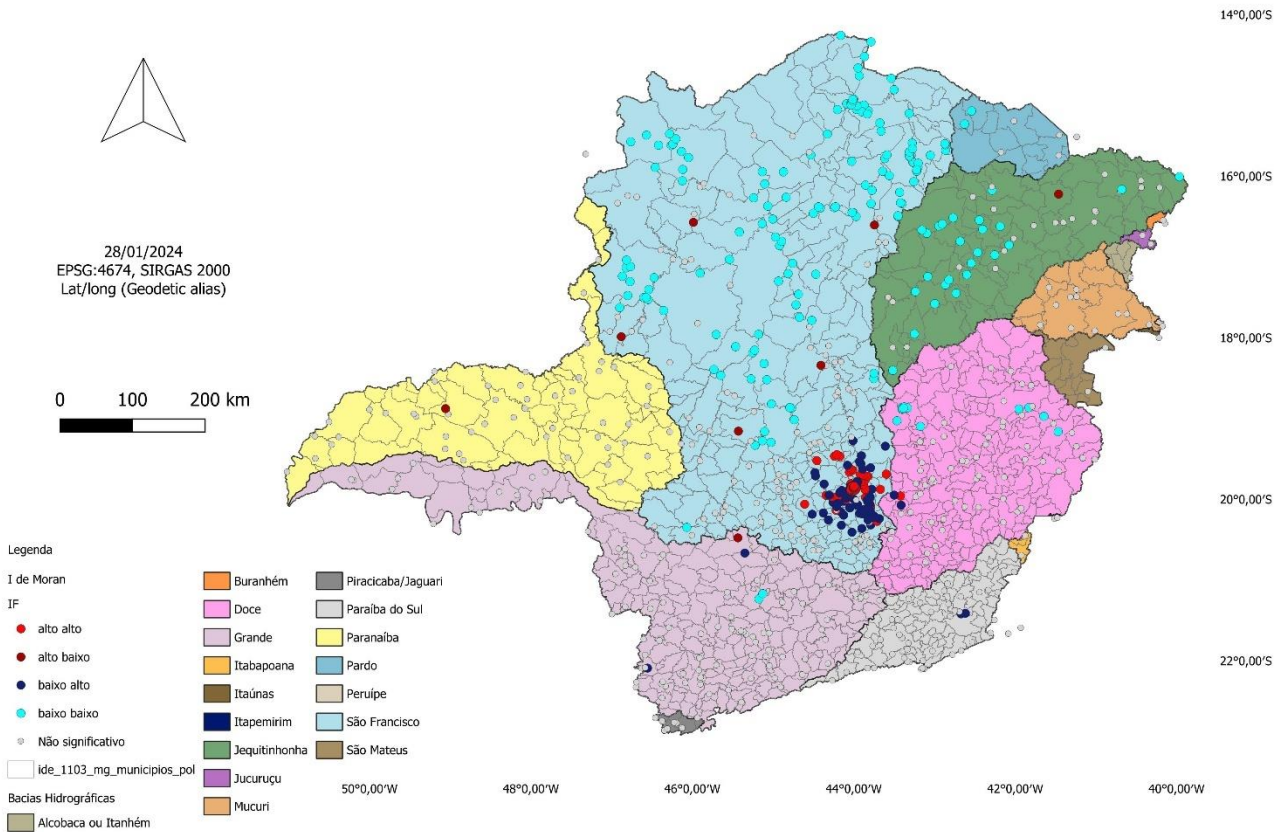


Figura 55 – Mapa em detalhe da distribuição espacial das medianas do parâmetro Indicador Fecal (São Francisco)

Vista em detalhe da distribuição das medianas por estação na na Bacia Hidrográfica do São Francisco para o parâmetro Indicador Fecal (NMP/100 mL)

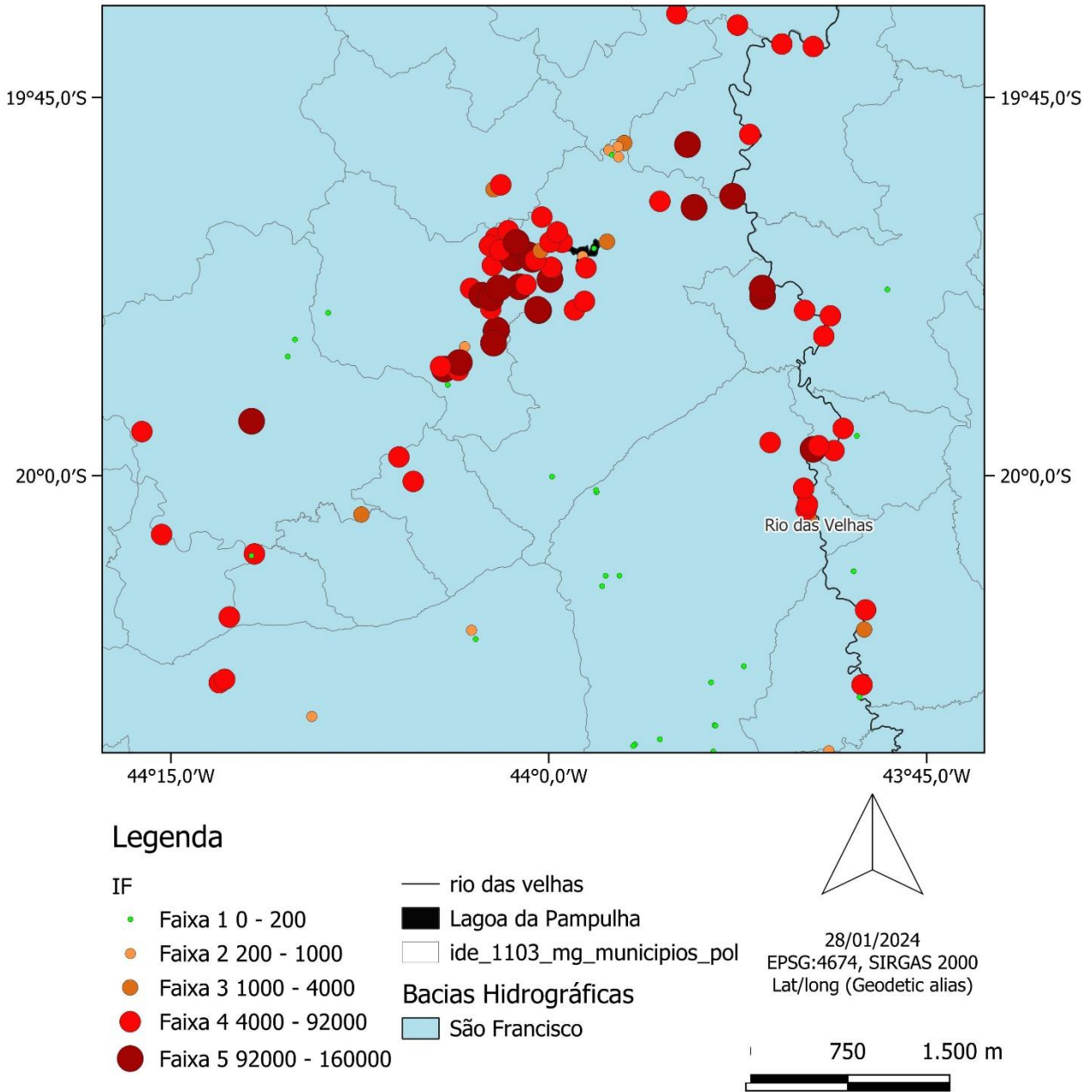
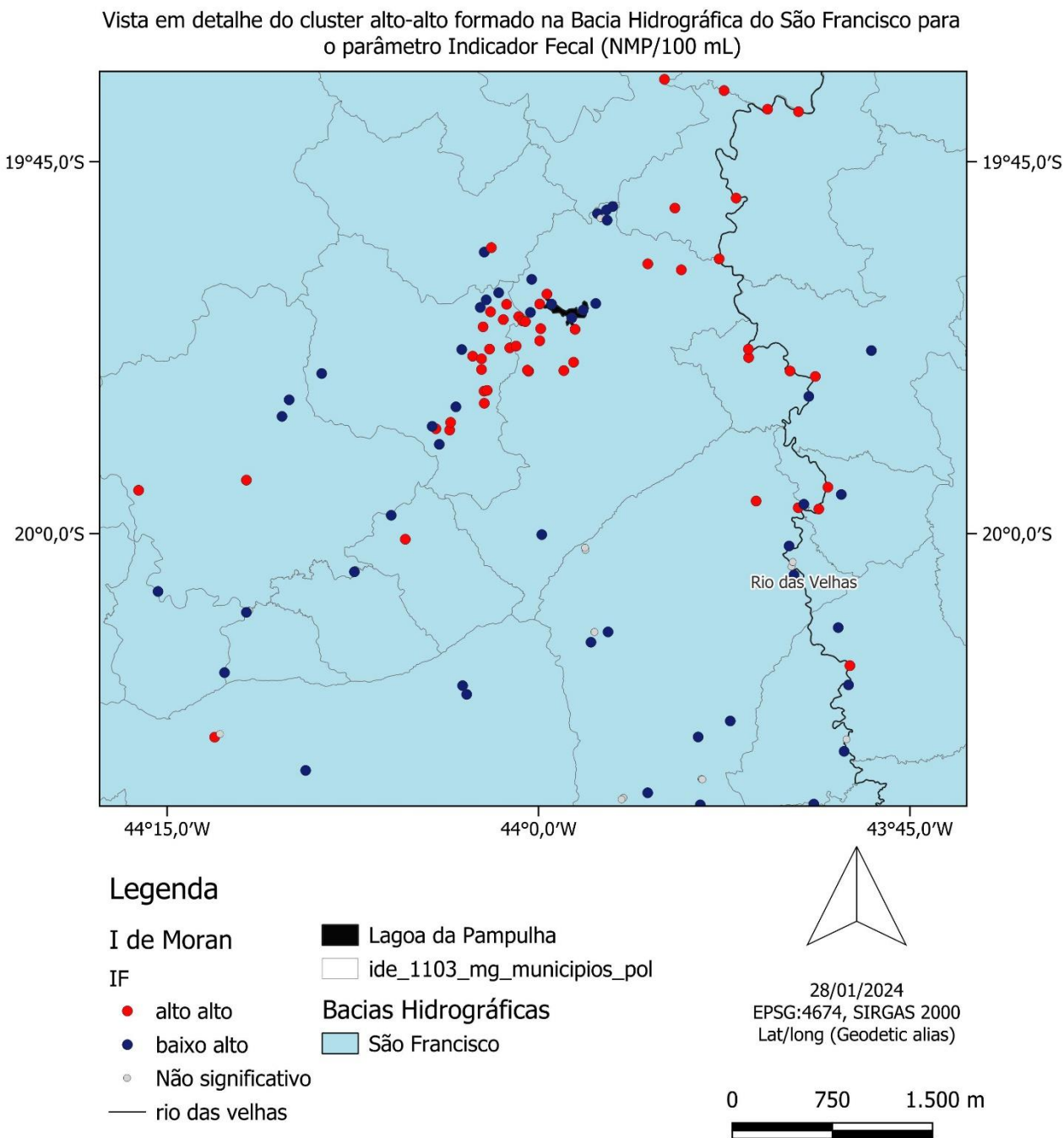


Figura 56 – Mapa em detalhe da análise estatística espacial das medianas do parâmetro Indicador Fecal (São Francisco)



A estação com mediana na faixa de valor 5 na BH do Rio Grande foi classificada como *outlier* alto-baixo. Existem também outros destes *outliers* nas bacias dos rios Jequitinhonha, Paranaíba e São Francisco. Nota-se que as estações na porção oeste de Belo Horizonte e leste de Contagem têm medianas nas faixas de valor 4 e 5, inclusive na periferia da Lagoa da Pampulha. Além disso, o cluster alto-alto nesta região é formado por estas estações.

Ainda fazem parte deste cluster estações sobre a calha do Rio das Velhas nas cidades de Nova Lima, Raposos Sabará e Santa Luzia.

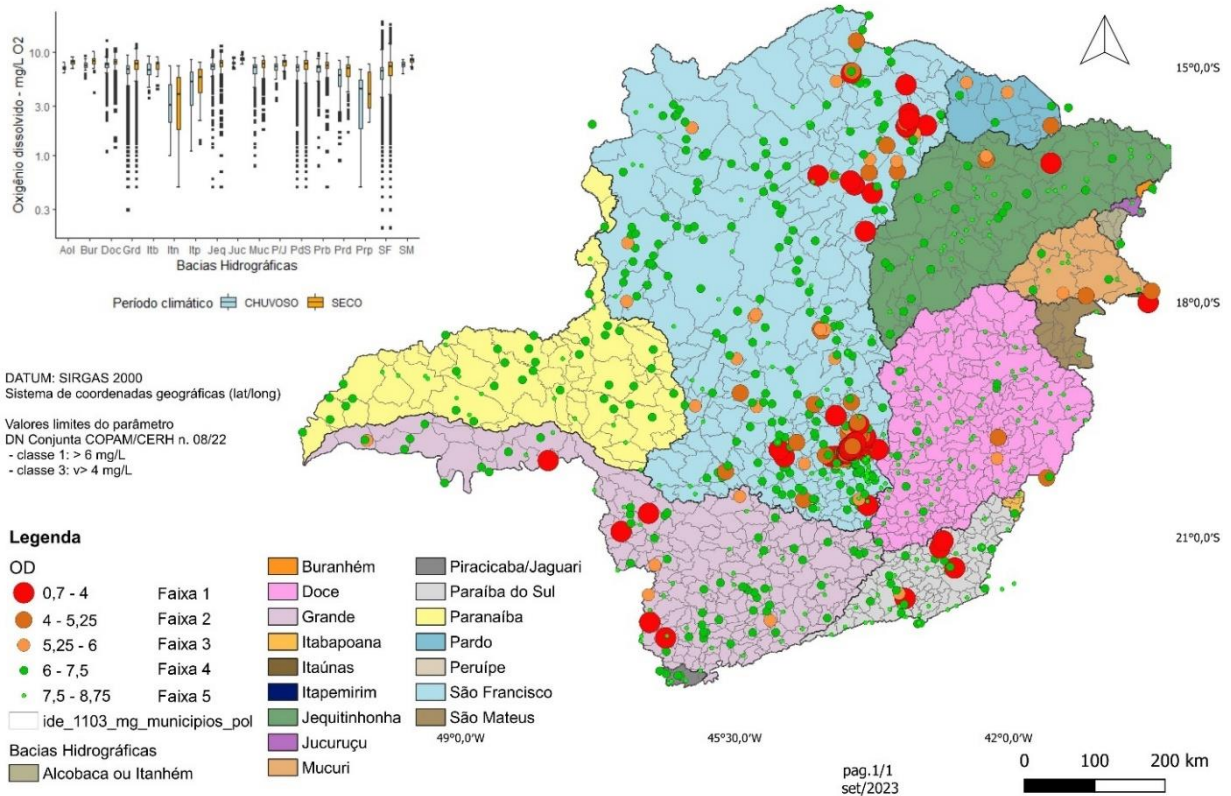
Os valores de Oxigênio Dissolvido (Figura 57) apresentam pequena variação entre as Bacias Hidrográficas, mas grande variabilidade dos dados dentro da bacia. Existem muitos *outliers* entre 0 e 7 mg/l, em especial nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul e São Francisco. A DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 indica que os valores de OD devem situar-se acima de 4 mg/l O₂. No entanto, a distribuição de valores de medianas históricas mostra que há considerável número de estações com valores até 3,1 mg/l, estas concentrando-se na BH do Rio São Francisco, RMBH e norte, ocorrendo ainda nas bacias dos rios Jequitinhonha, Paraíba do Sul e Grande.

A autocorrelação auxilia a análise destes resultados espaciais ao apresentar um grande *cluster* do tipo baixo-baixo na BH do Rio São Francisco, indicando que há uma concentração de estações com baixo valor de OD nesta região. Este *cluster* está bem delimitado por *outliers* do tipo alto-baixo. Nota-se uma concentração de *clusters* do tipo alto-alto em toda a porção leste do estado, o que indica boa qualidade da água em relação aos valores de oxigênio dissolvido nestas bacias. Sabe-se que o maior causador de decréscimo do OD nas águas superficiais é o aporte de partículas e matéria orgânica, que pode ocorrer naturalmente no escoamento superficial, mas também com o despejo de efluentes domésticos e industriais no corpo d'água.

Os valores das medianas históricas do parâmetro pH *in loco* (Figura 58) estão majoritariamente dentro da faixa disposta na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 para as águas doces nas classes I, II e III, que é de seis a nove. Destaca-se a ocorrência de medianas na faixa abaixo deste valor nas Bacias Hidrográficas dos Jequitinhonha e Paranaíba. Com a análise de autocorrelação espacial, nota-se que as medianas nas faixas de valor 1 e 2 formaram um grande *cluster* alto-alto, pois, de fato, são os maiores valores de pH, enquanto aquelas nas faixas 4 e 5 formaram *clusters* baixo-baixo. As estações na faixa 3 foram classificadas ou como *outliers* ou como não significativos.

Figura 57 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de OD

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Oxigênio dissolvido (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Oxigênio Dissolvido (mg/L) no Estado de Minas Gerais

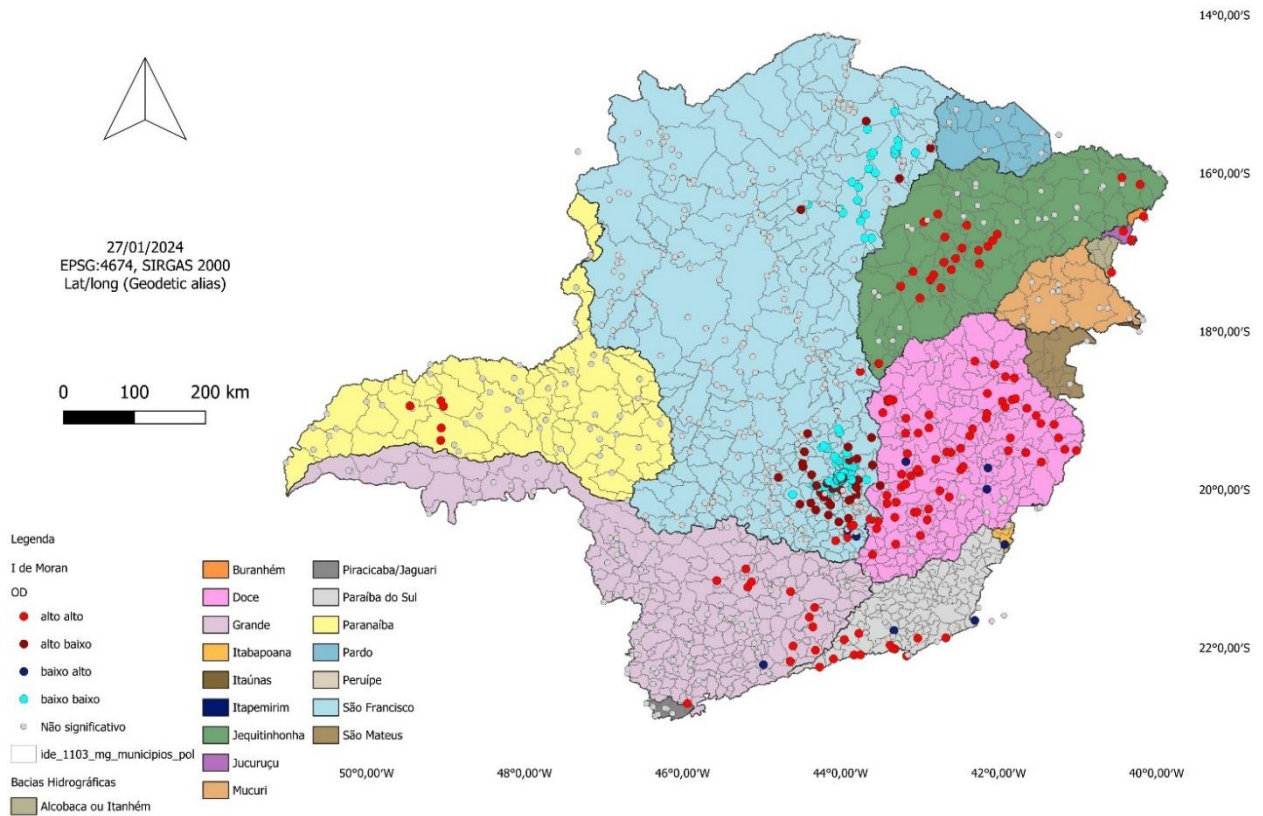
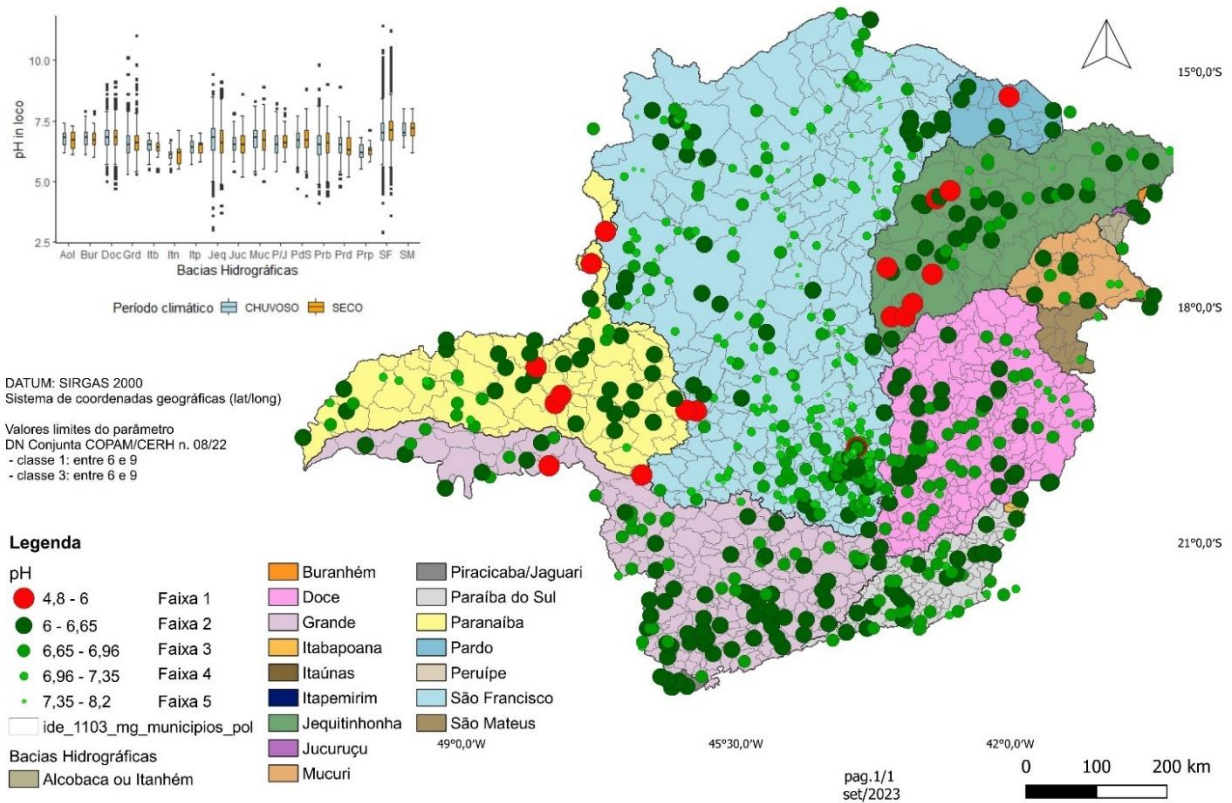
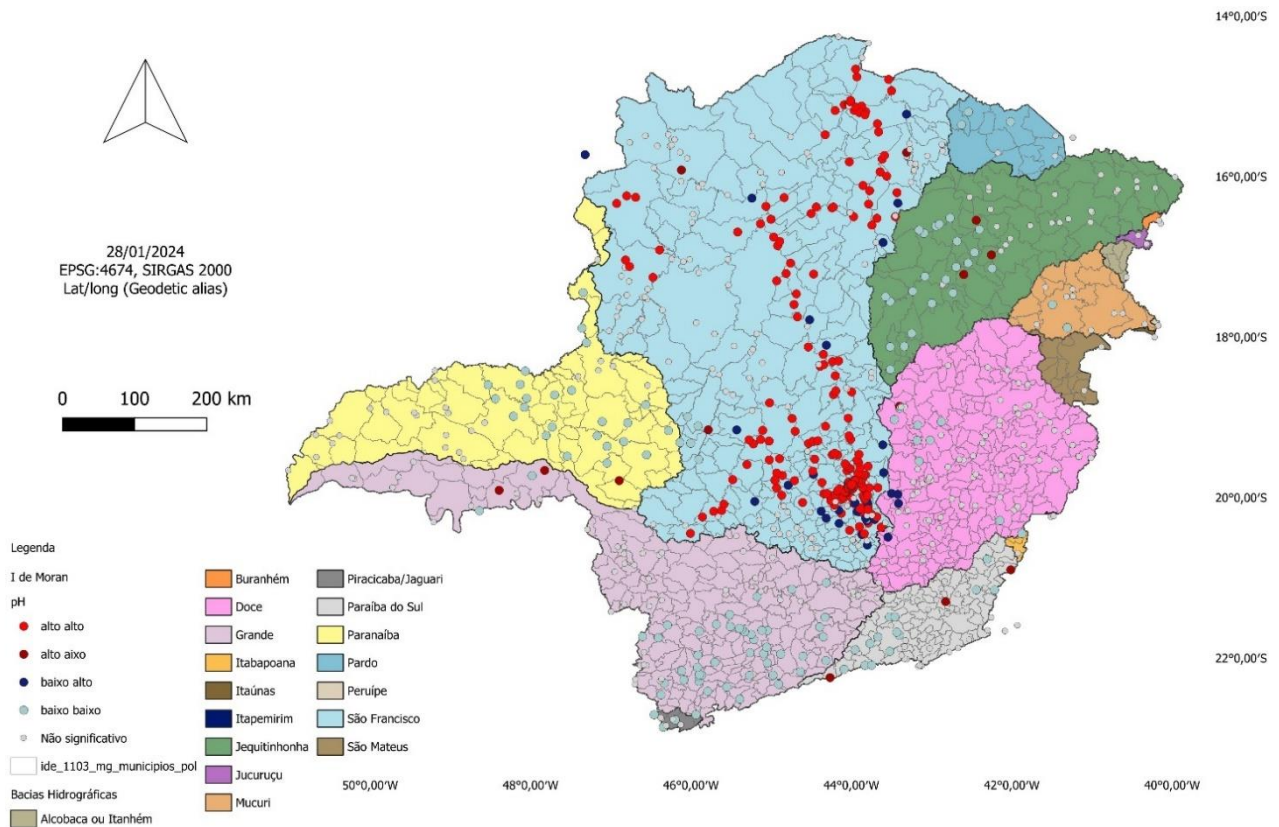


Figura 58 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de pH *in loco*

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro pH *in loco* em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro pH *in loco* no Estado de Minas Gerais



A série de sólidos, composta pelos parâmetros Sólidos dissolvidos totais (SDT) e Sólidos suspensos totais (SST), mostra distribuições distintas. Os SST (Figura 59) têm valores uniformes entre as BH, com medianas próximas a 50 mg/l e valores mais altos no período chuvoso, apresentando o comportamento esperado. Cinco bacias exibem vários *outliers* acima do limite superior: Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco, com valores até 10.000 mg/l. Os limites legais do parâmetro dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 para as águas doces nas classes I, II e III são de 50 mg/l e 100 mg/l. Muitas estações apresentam medianas históricas que superam o limite legal mais restritivo; contudo, apenas três na BH do Rio São Francisco superam o limite menos restritivo, com valor dezesseis vezes maior na estação SF030, no Rio Mangal, município de Pedras De Maria da Cruz.

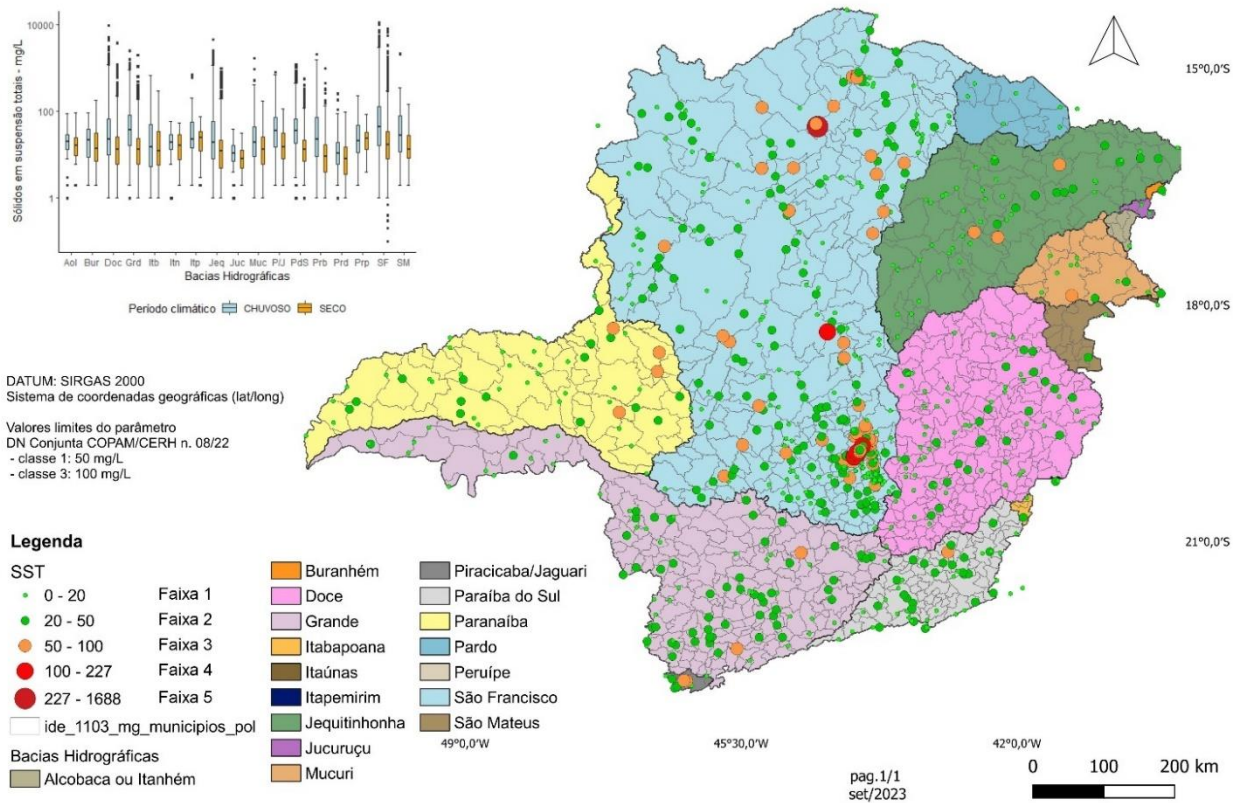
A aplicação da autocorrelação espacial separou as estações em quatro *clusters* do tipo alto-alto, todos na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições Rio das Velhas, Paraopeba e Rio Pandeiros. O *cluster* na CH do Rio Pandeiros tem formato linear, sendo formado por estações sobre a calha do Rio São Francisco e bem delimitado por *outliers* do tipo baixo-alto. Outro *cluster*, unitário, está no centro da bacia, na cidade de Corinto, sendo separado também por *outliers* baixo-alto. Por fim, há um *cluster* sobre a RMBH, em que se emaranham as estações que o formam com outras classificadas como *outliers* baixo-alto.

Os valores de SDT (Figura 60) variam entre bacias hidrográficas, como verifica-se no *box-plot*. A faixa de valores das medianas varia entre 45 mg/l e 400 mg/l, com valores maiores nos períodos chuvosos. As bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha e São Francisco apresentam muitos *outliers*, em especial acima do limite superior da caixa. O limite legal para o parâmetro segundo DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 é de 500 mg/l, valor ultrapassado em poucas estações, concentradas na BH do Rio São Francisco, na RMBH e adjacências. Além disso, a estação JE09, sobre a calha do Rio São Pedro, localizada à jusante da cidade de Medina, na bacia do Jequitinhonha, destaca-se pela alta concentração de SDT.

Obteve-se quatro *clusters* do tipo alto-alto por meio da análise de autocorrelação: um na RMBH, composto por estações nas faixas de valor 3, 4 e 5 e bem delimitado por *outliers* do tipo baixo-alto; um segundo, na BH do Rio São Francisco, CH do Rio Verde Grande; outro, unitário, na BH do Rio Jequitinhonha, onde, novamente, a estação JE0029, com o mais alto valor, não foi classificada com valor de mediana significativamente diferente dos vizinhos; e, por fim, um na bacia do rio Mucuri, região de Nanuque.

Figura 59 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de SST

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Sólidos suspensos totais (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Sólidos suspensos totais (mg/L) no Estado de Minas Gerais

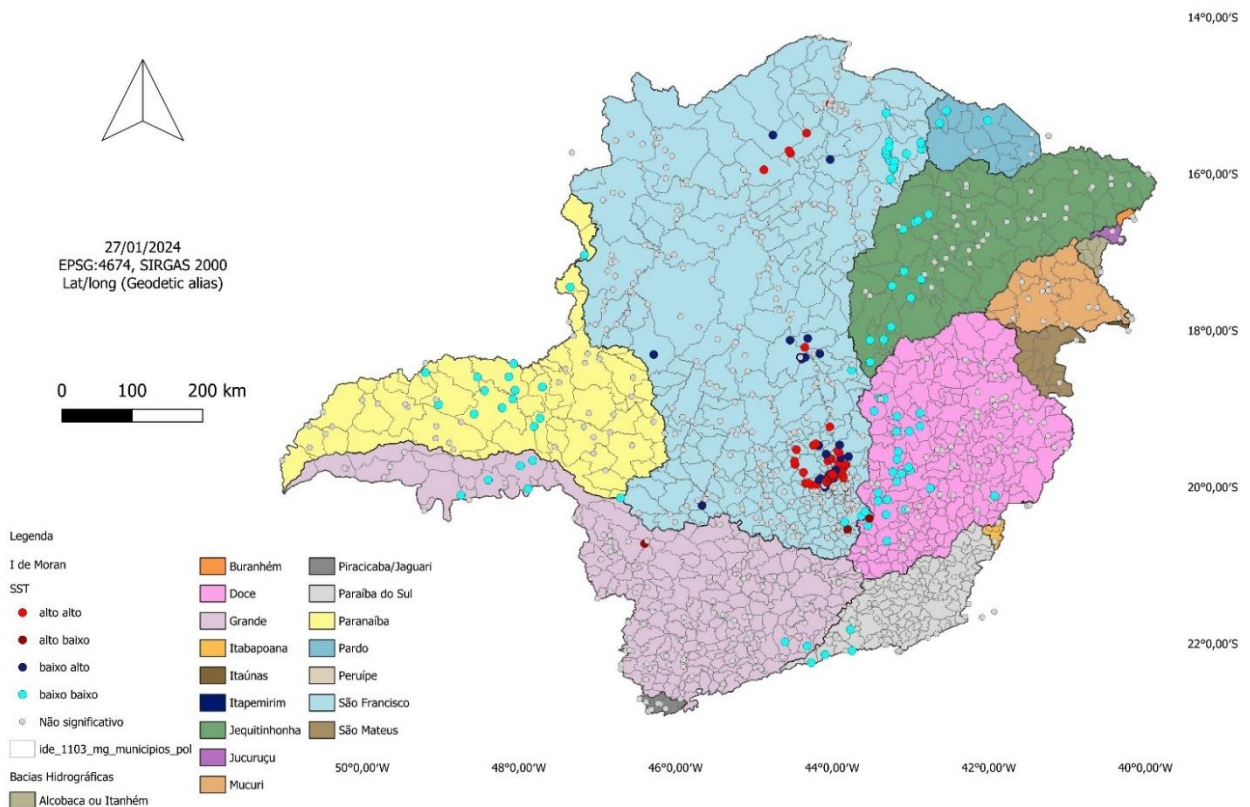
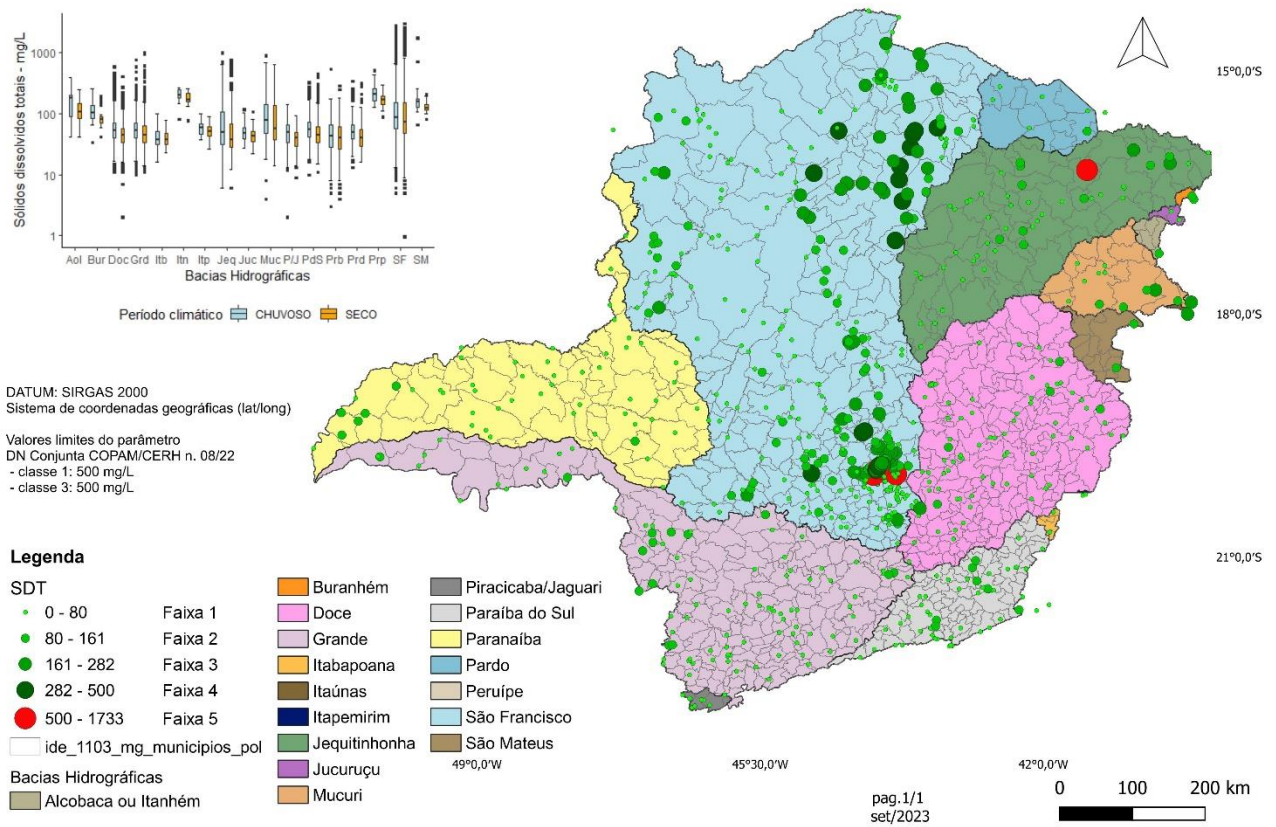
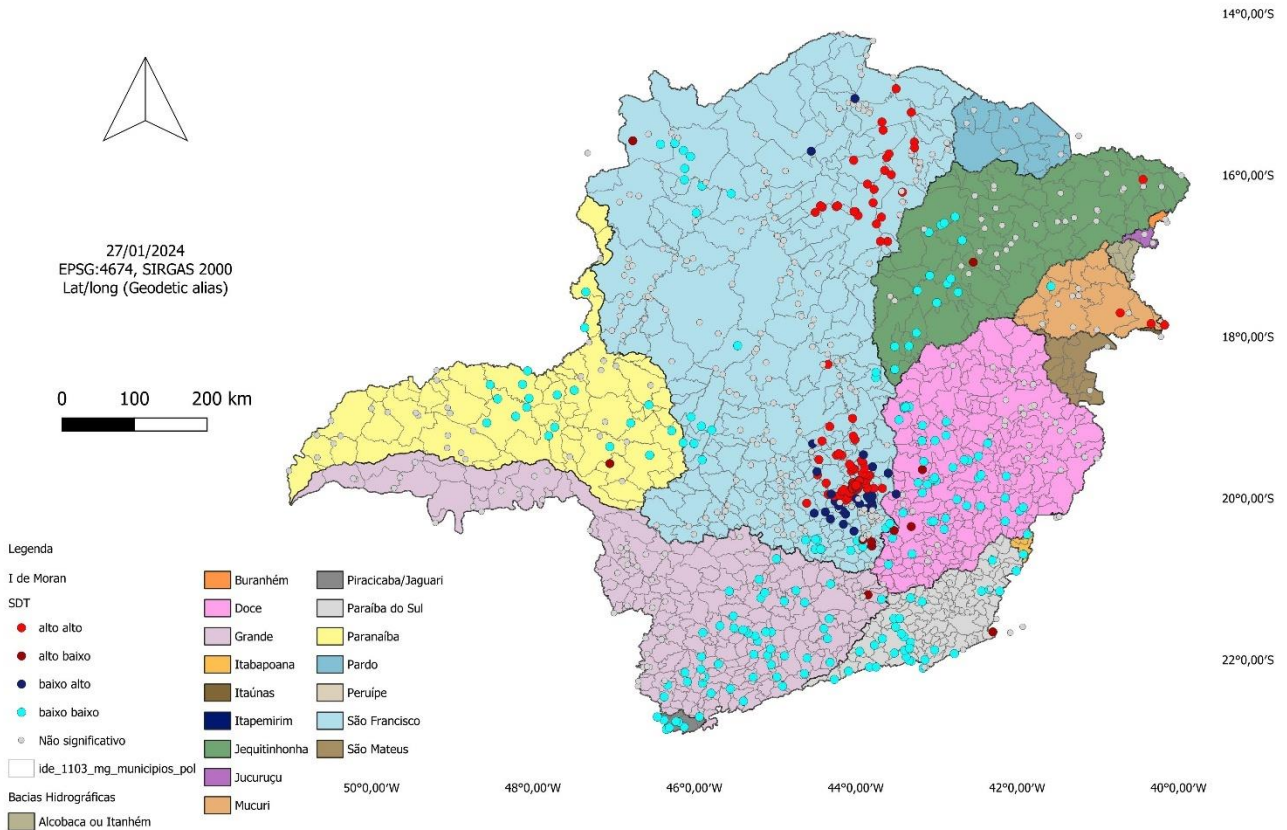


Figura 60 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de SDT

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Sólidos dissolvidos totais (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Sólidos dissolvidos totais (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Outro parâmetro que se correlaciona com a série de sólidos é a Turbidez (Figura 61). Observa-se que a variação entre as bacias é baixa, diferentemente da variação em cada bacia, pois a amplitude dos dados considerando os limites inferior e superior é grande, chegando a variar de menos de 1 UNT a 5.000 UNT. Os limites legais para o parâmetro dispostos na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 são 40 UNT e 100 UNT. Segundo Libânio (2010), a turbidez natural das águas superficiais está geralmente compreendida na faixa de 3 a 500 UNT.

A maior parte das estações têm medianas históricas na faixa de valores de 48 a 106 UNT, o que supera os limites legais mais e menos restritivos. Algumas delas têm medianas até 453 UNT, e apenas uma têm mediana com o valor de 4373 UNT (estação SF030). Como mencionado no parágrafo sobre SST, esta estação está localizada no Rio Mangal, município de Pedras De Maria da Cruz.

A autocorrelação espacial mostra a formação de cinco *clusters* do tipo alto-alto, quatro na BH do Rio São Francisco, nas circunscrições Rio das Velhas, Entorno da represa de Três Marias, rios Jequitaí e Pacuí e Rio Pandeiros; e o quinto na bacia do Jequitinhonha, nas circunscrições do rio Araçuaí e do Médio e Baixo Jequitinhonha.

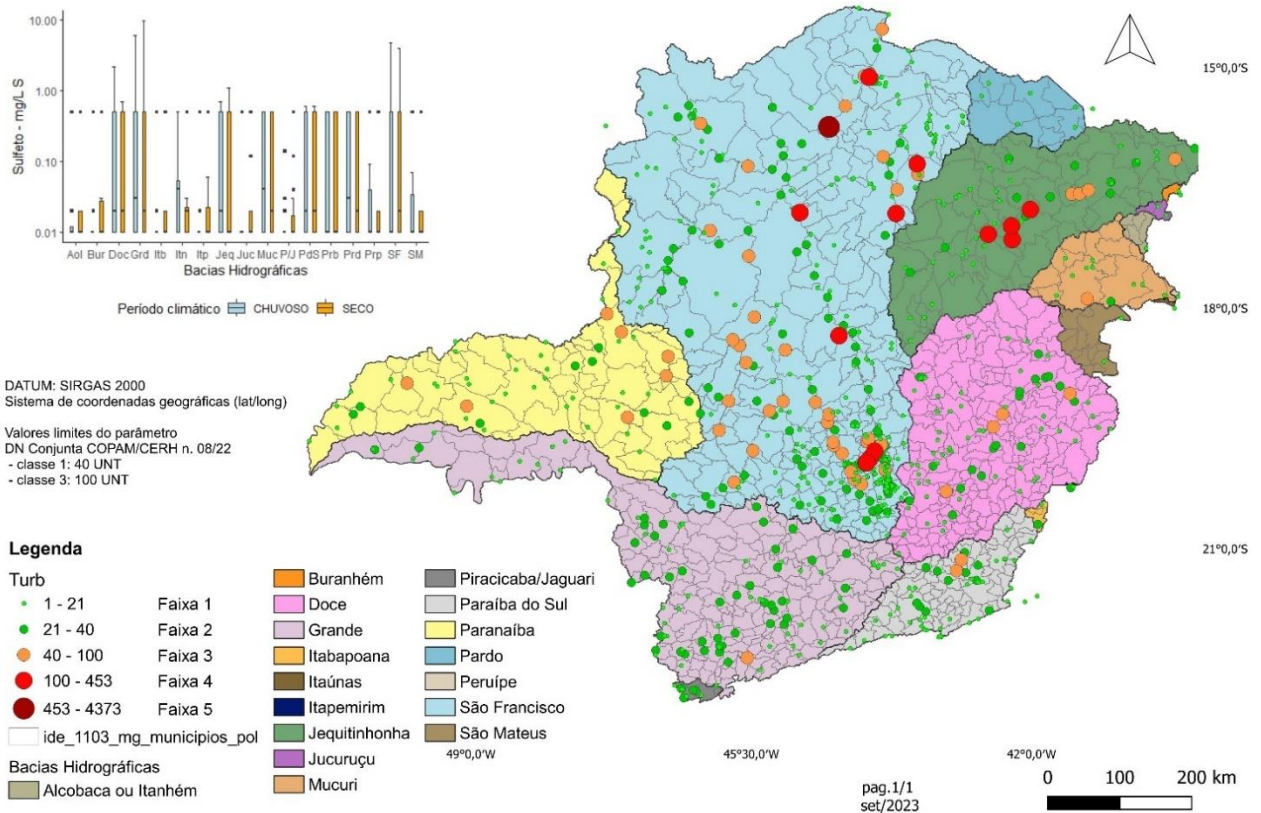
Destaca-se que o *cluster* alto-alto na CH Rio Pandeiros é formado por estações na calha do Rio São Francisco. Já nos rios a leste e a oeste, há estações classificadas como *outliers* do tipo baixo-alto, e outras em que não foi encontrada diferença significativa. Isto centraliza a degradação da água por aumento da Turbidez nestas sub-bacias. Os *clusters* na CH Rio das Velhas estão bem delimitados por *outliers* do tipo baixo-alto. O *cluster* alto-alto na bacia do Jequitinhonha inicia-se em afluente do Rio Jequitinhonha e segue sobre sua calha até o município de Itaobim.

Comumente, as fontes de turbidez da água superficial são fragmentos de argila, silte, plâncton, microrganismos, e matéria orgânica e inorgânica particulada, provenientes do escoamento superficial ou de efluentes domésticos e industriais (Libânio, 2010; CETESB, 2016).

Para algumas bacias hidrográficas, não houve variabilidade dos dados medidos de Sulfato total (Figura 62), o que é observado pela concordância entre os valores dos Q1, Q2 e Q3. É o caso das bacias dos rios Alcobaça, Itabapoana, Itaúnas, Itapemirim, Jucuruçu, Piracicaba/Jaguari, Peruípe e São Mateus. Isto se dá, como já mencionado para outros parâmetros, pela quantidade de dados censurados, que, neste caso, concentram-se nestas

Figura 61 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Turbidez

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Turbidez (UNT) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Turbidez (mg/L) no Estado de Minas Gerais

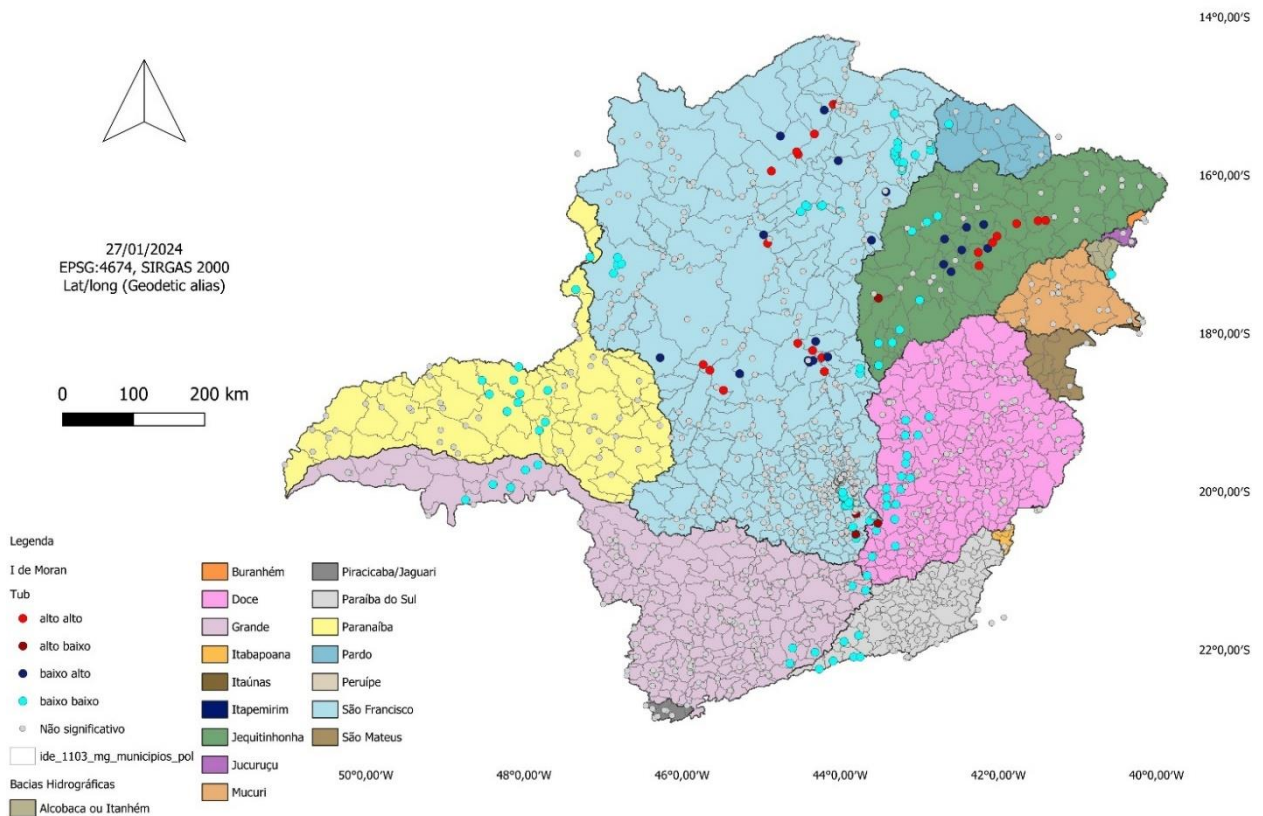
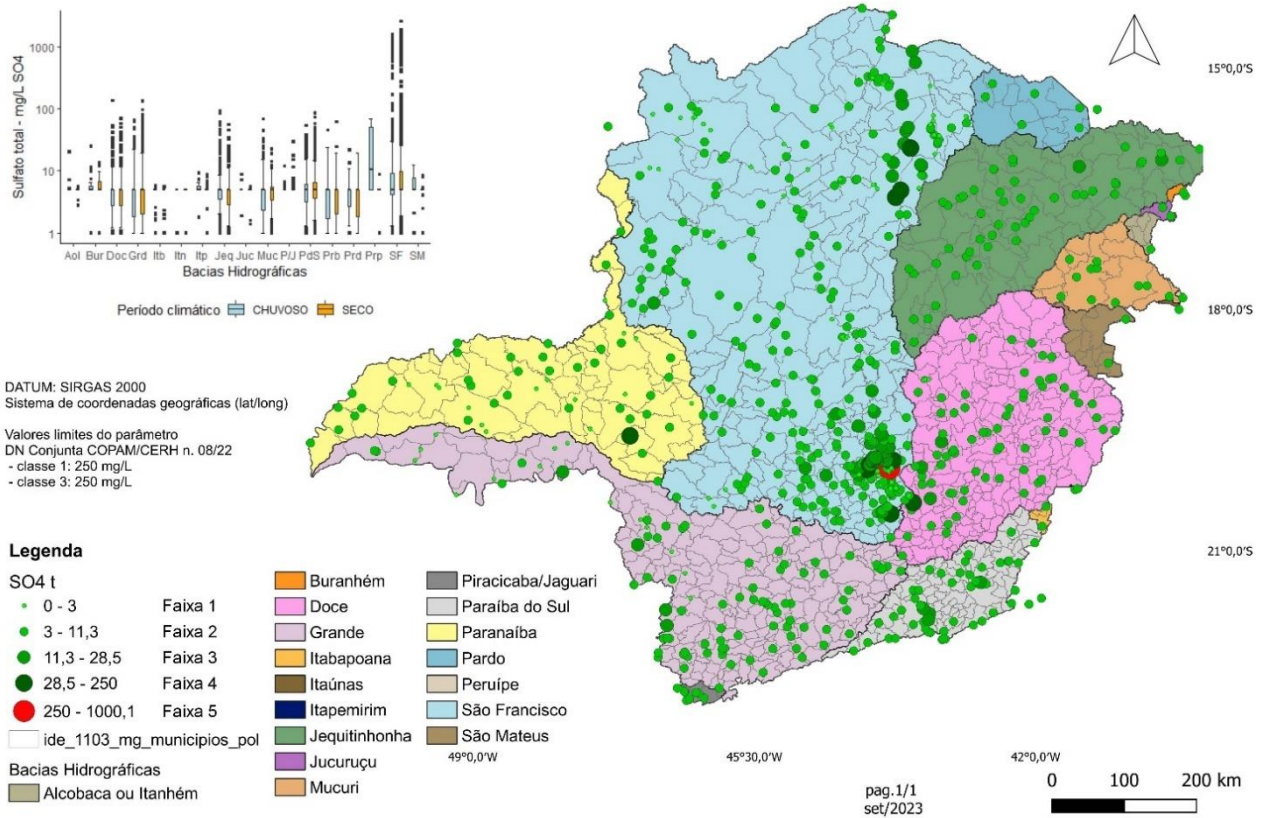
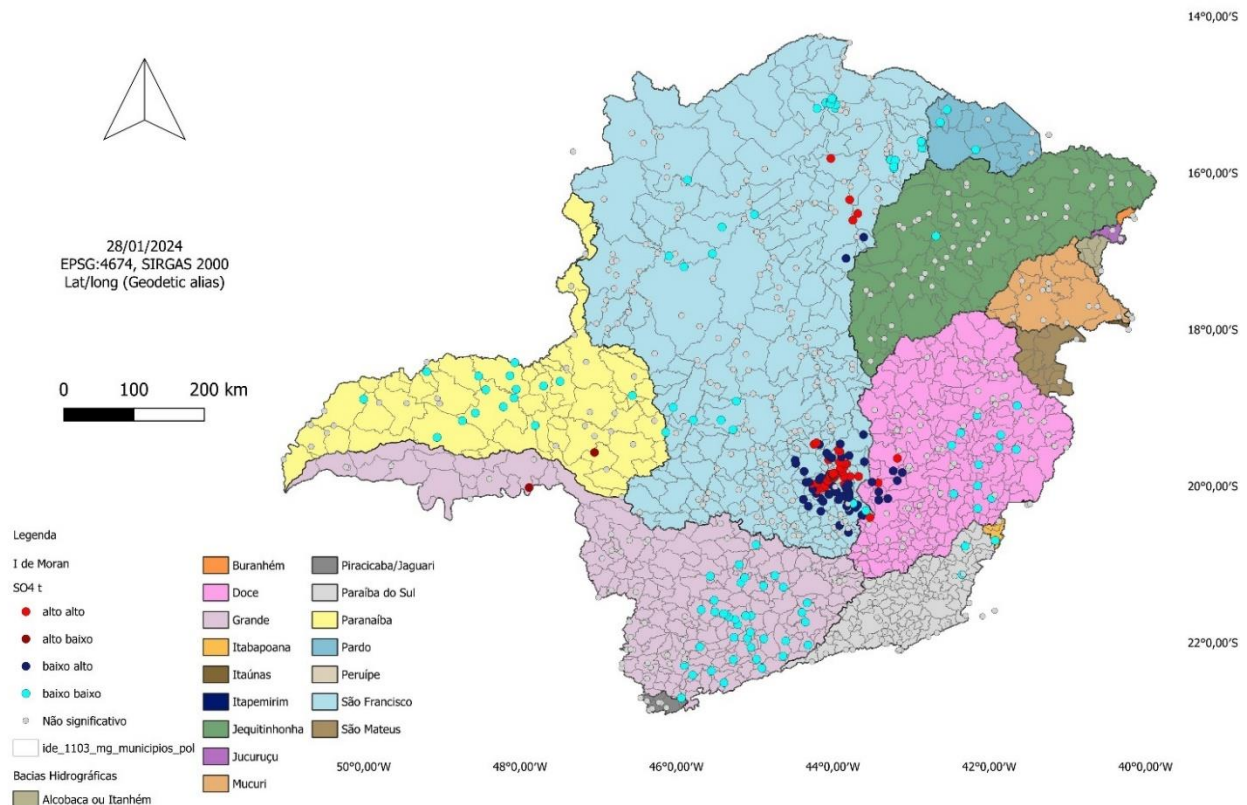


Figura 62 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sulfato total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Sulfato total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Sulfato total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



bacias. Mesmo as demais bacias apresentam baixa variabilidade, com Q1 coincidente com Q2 ou Q2 coincidente com Q3. Os valores das medianas por bacia estão todos próximos a 8 mg/l, e há grande quantidade de *outliers* na BH do Rio São Francisco, com valores que ultrapassam 1.000 mg/l.

O limite legal para este parâmetro na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 é igual a 250 mg/l. A distribuição espacial mostra que os maiores valores estão na bacia do São Francisco, na porção central e norte. Há apenas uma estação com valor na faixa 5, acima do limite legal; a estação AV320, no córrego da Mina em Nova Lima, onde também se superou o limite legal do parâmetro Níquel. O aporte de sulfato nas águas superficiais, quando de origem natural, se dá pela dissolução de solos e rochas ou pela oxidação de sulfeto; quando de origem antrópica, pelo lançamento de efluentes domésticos e industriais (CETESB, 2016).

A análise de autocorrelação mostra um *cluster* formado na CH Rio das Velhas entremeado a *outliers* do tipo baixo-alto. Este tipo de resultado não permite uma boa delimitação espacial das estações que, de fato, auto correlacionam-se. Isto se dá, especialmente, porque o tipo de dado geográfico utilizado é ponto, e não área.

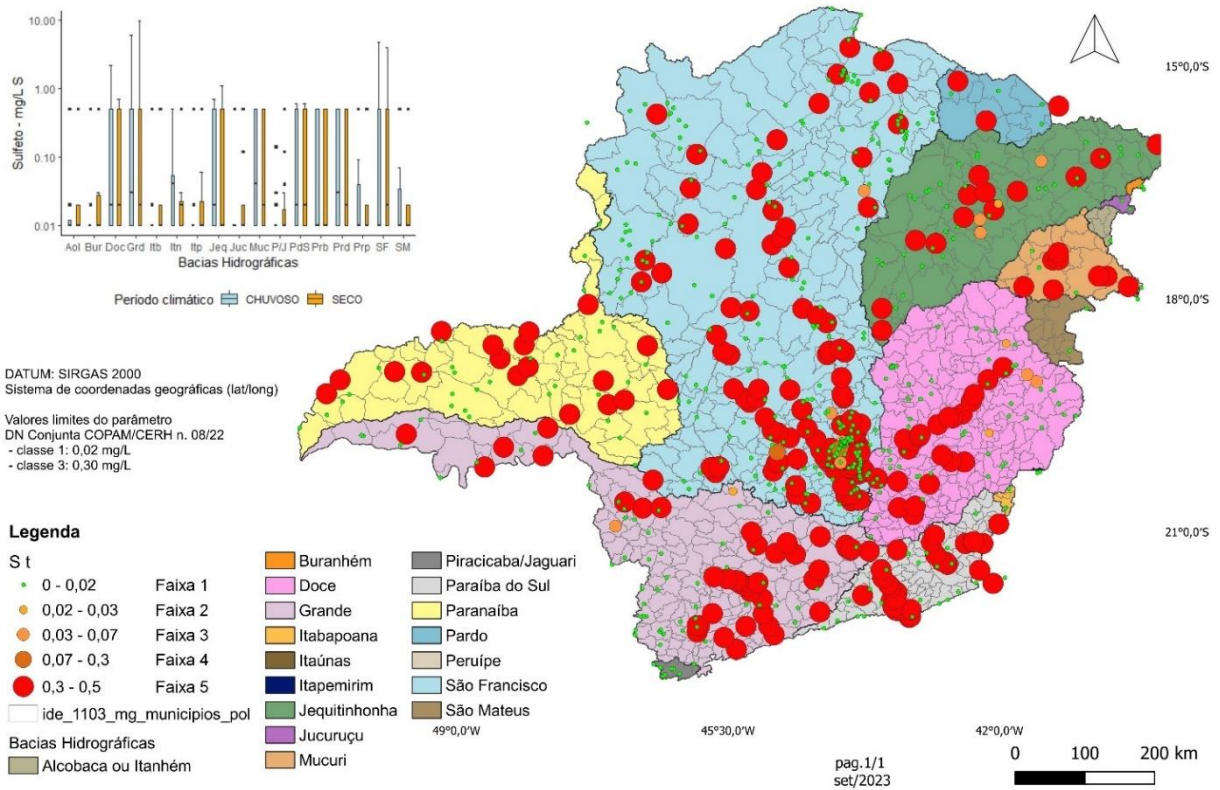
A distribuição dos valores de Sulfeto total (Figura 63) apresenta dois padrões. Um dos padrões, em que o Q1 é igual ao Q2 (0,01 mg/l), é observado nas bacias hidrográficas dos rios Alcobaça, Buranhém, Itabapoana, Itaúnas, Itapemirim, Jucuruçu, Paranaíba, Piracicaba/Jaguari, Peruípe e São Mateus. O outro padrão, com maior variação dos dados e medianas em torno de 0,04 mg/l, é verificado nas BH dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Pardo e São Francisco.

Até 2010, o limite de detecção do método analítico para este parâmetro era de 0,5 mg/l; portanto, há 40% de dados censurados no banco com este valor. Já o limite legal de Sulfeto em águas doces classe I determinado na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 é igual a 0,002 mg/l, que é 250 vezes menor que o LDM; em águas doce classe III, é de 0,3 mg/l, ainda menor que este LDM. Nota-se, pela distribuição espacial, um número considerável de estações com mediana histórica acima do limite legal menos restritivo, o que, no entanto, não significa que houve violação da norma.

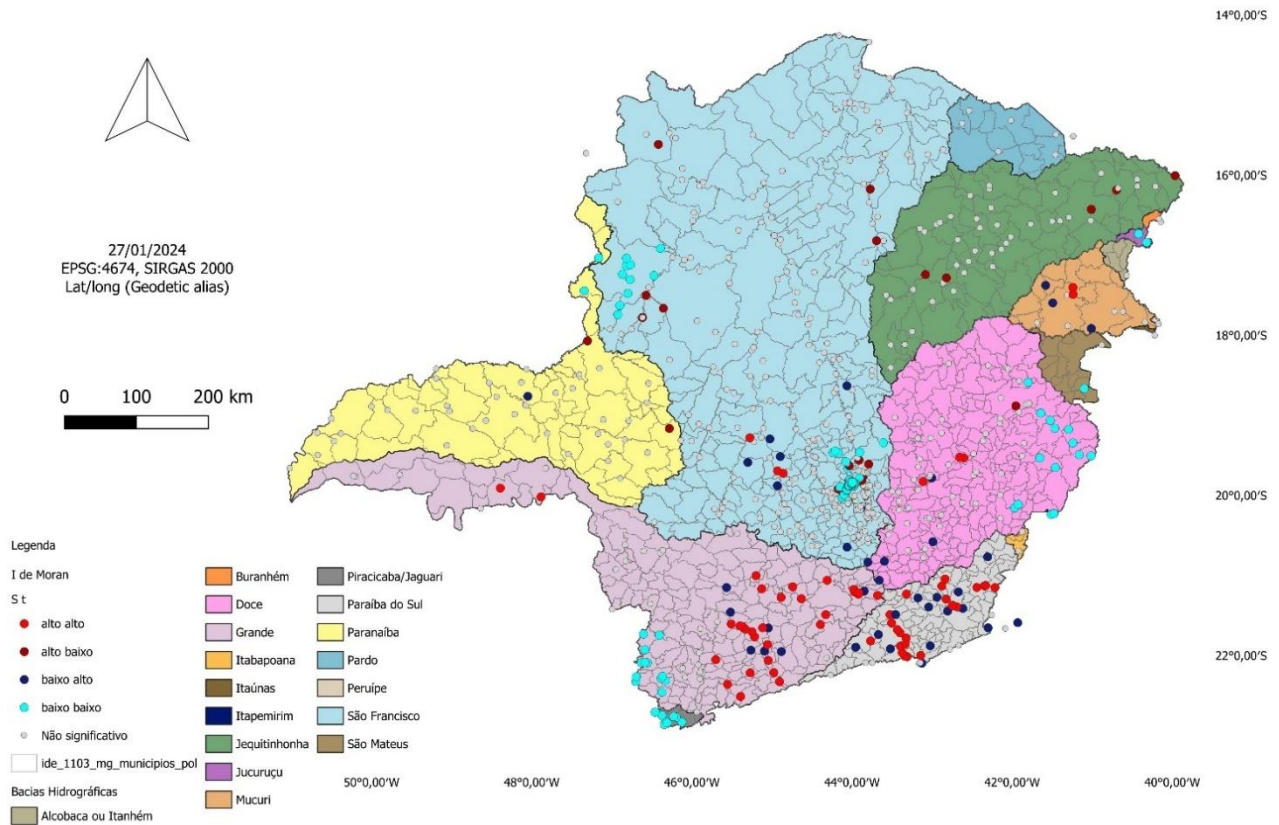
A análise de autocorrelação resultou em diversos *clusters* do tipo alto-alto espalhados por cinco bacias hidrográficas, sendo apenas dois deles bem limitados no espaço, o da BH do Rio Mucuri e um na BH do Rio Grande, na região de Uberaba.

Figura 63 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Sulfeto total

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Sulfeto total (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Sulfeto total (mg/L) no Estado de Minas Gerais



Os valores do parâmetro Fenóis totais (Figura 64), distribuídos por estação, mostram que há um grupo de bacias hidrográficas em que o limite inferior coincide com o primeiro quartil, que, por sua vez, coincide com o segundo, indicando que 50% dos dados são iguais. Um segundo grupo não apresenta intervalo interquartil ou limites superior e inferior, de modo que a variabilidade é zero. Como já mencionado para outros parâmetros, isto ocorre porque o limite de detecção do método é de 0,001 mg/l, e parte dos parâmetros nestas bacias apresentam este valor. Observa-se grande número de *outliers* nas bacias dos rios Grande, Paraíba do Sul e São Francisco, com valores até 1,0 mg/l de C₆H₅OH, enquanto o limite legal estabelecido na DN Conjunta COPAM/CERH n. 08/22 varia de 0,003 a 0,5 mg/l de C₆H₅OH.

A distribuição espacial apresenta medianas com valores na faixa 4 em quase todo o estado, sendo que o limite superior desta classe (0,0025 mg/l) está logo abaixo do valor limite mais restritivo (0,003 mg/l). Apenas duas estações se encontram na faixa mais alta, em que o valor do parâmetro Fenóis totais chega a 0,0035 mg/l, pouco acima do limite mencionado. Estas estações estão localizadas na BH do Rio Grande, região de Frutal, e na BH do Rio Paraíba do Sul, região de Viçosa.

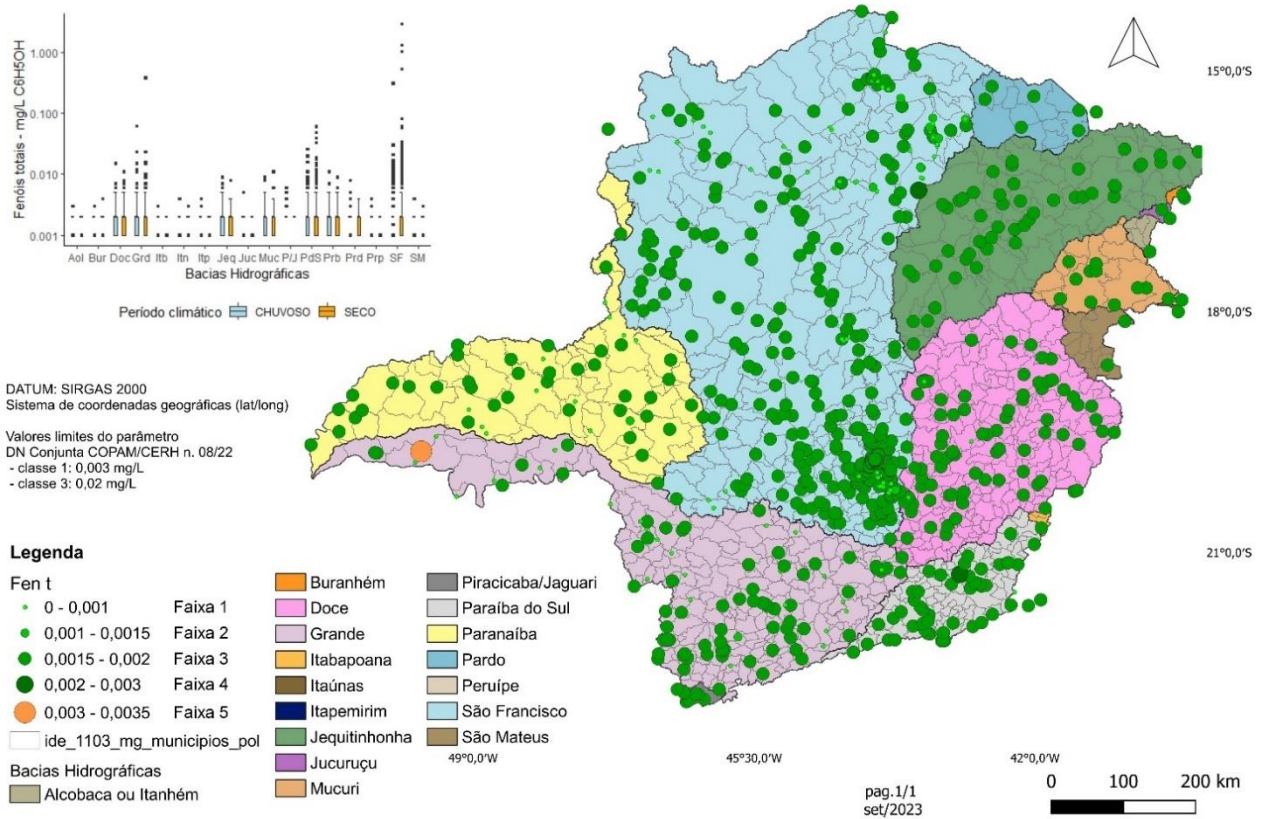
A aplicação do I de Moran local trouxe como resultado a formação de quatro *clusters* do tipo alto-alto; um grande na BH do Rio São Francisco, nas CH dos rios das Velhas, Paraopeba e Pará; um segundo, na BH do Rio Paraíba do Sul, também ocupando suas duas CH, as dos rios Pomba e Muriaé e Preto e Paraibuna.

Um ponto importante é que Fenóis não correm naturalmente nos corpos d'água, sendo introduzidos por lançamento de efluentes industriais de atividades como indústrias de processamento da borracha, colas e adesivos, resinas impregnantes, componentes elétricos plásticos e siderurgia (CETESB, 2016). Assim, este parâmetro é indicador da influência do lançamento de efluentes nas águas superficiais, auxiliando na interpretação dos resultados de outros parâmetros. Todas as estações com valores nas faixas 5 apontam para degradação da água por despejo de efluentes.

O parâmetro Óleos e graxas (Figura 65) apresenta variabilidade apenas nas BHs dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Mucuri, Paraíba do Sul, Paranaíba, Pardo e São Francisco. Ainda assim, a variação dentro das bacias é baixa, com Q1 igual a Q2. Destacam-se os limites superiores nas bacias do Grande e do São Francisco, com valores acima de 100 mg/l.

Figura 64 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Fenóis totais

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Fenóis totais (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Fenóis totais (mg/L) no Estado de Minas Gerais

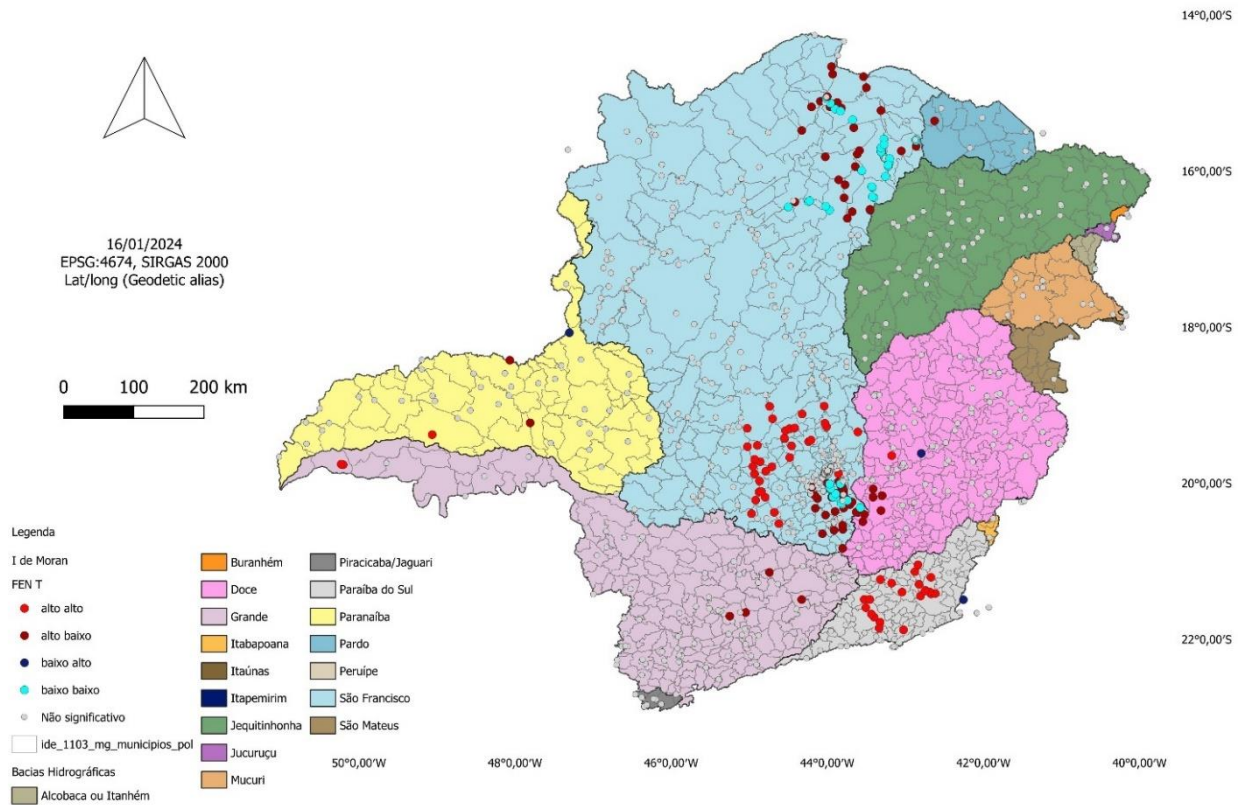
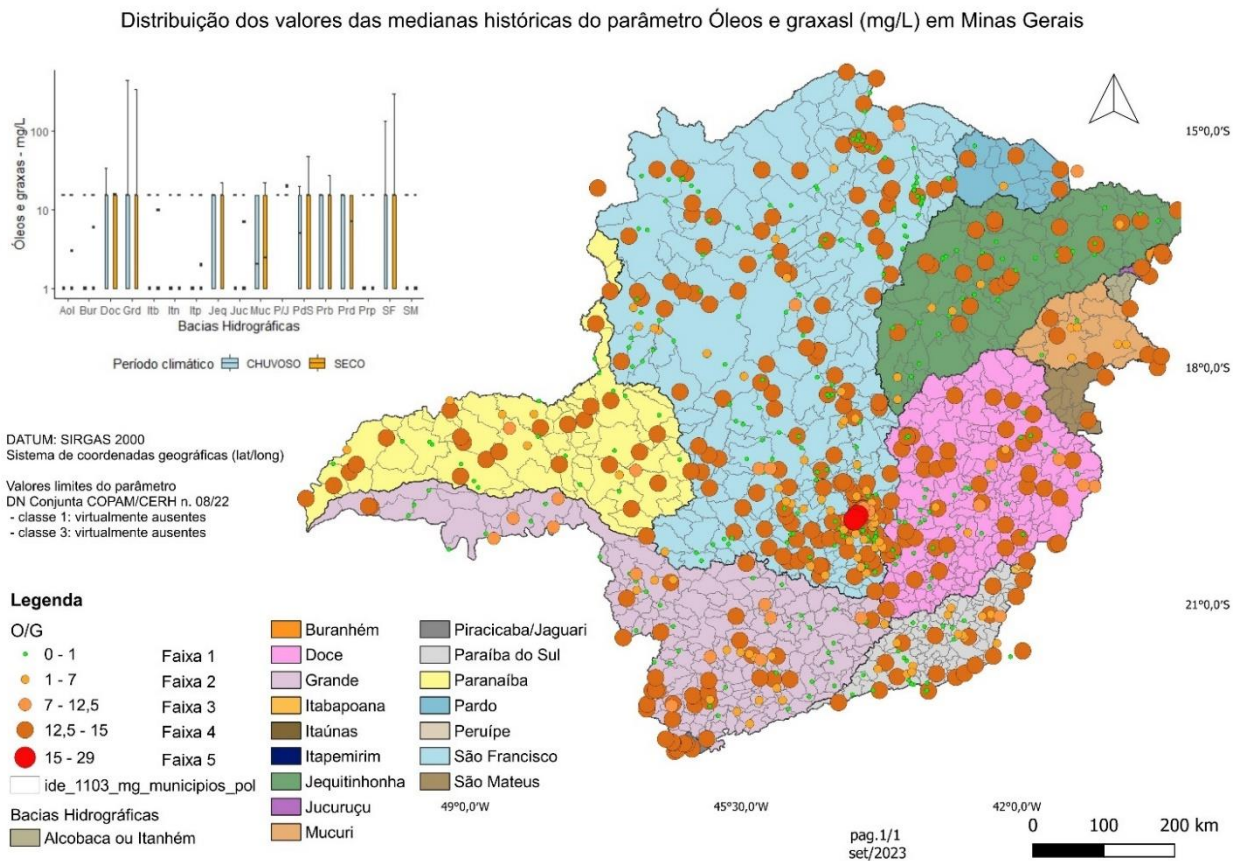
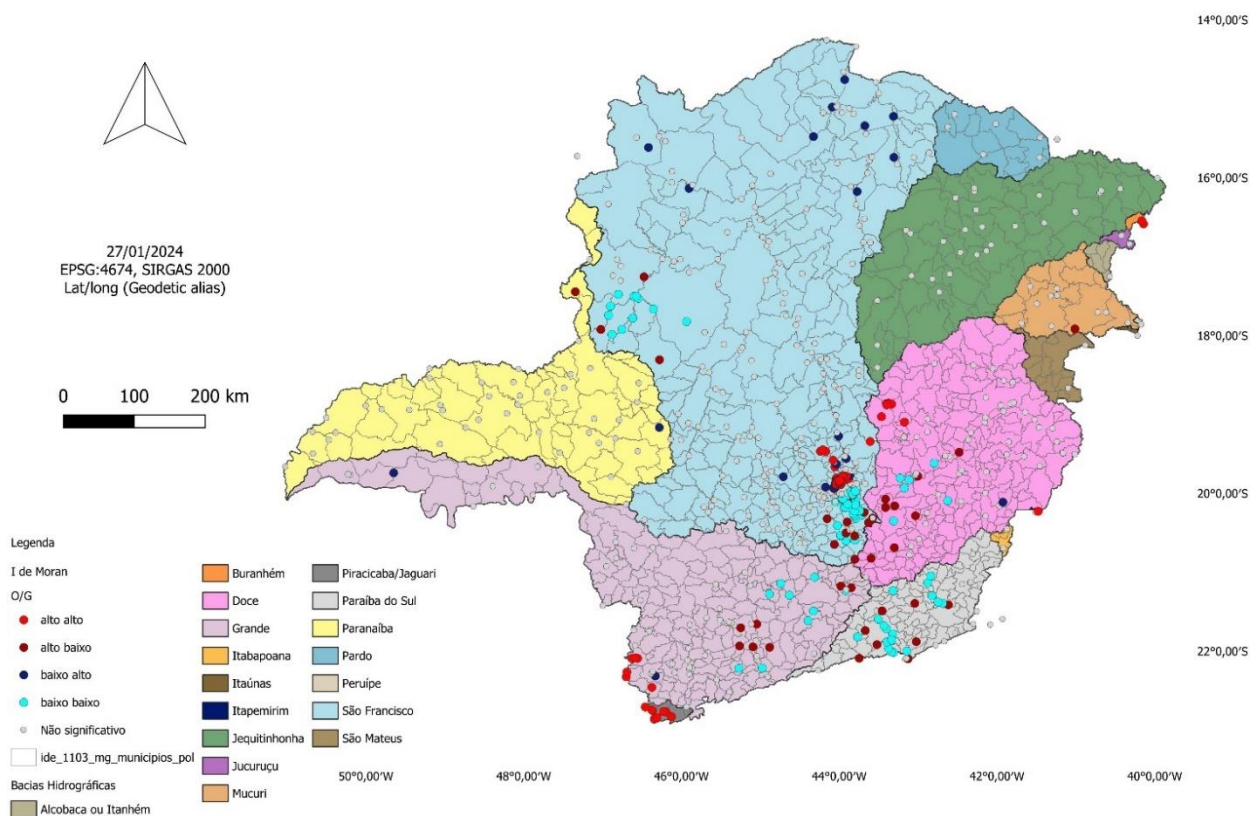


Figura 65 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Óleos e Graxas



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Óleos e Graxas (mg/L) no Estado de Minas Gerais



O limite de detecção do método é de 1 mg/l; os limites legais são qualitativos, ou seja, não têm valor definido, variam de “virtualmente ausentes” a “toleram-se iridescências”. Neste sentido, considerou-se o limite de detecção do método como o limite quantitativo equivalente a “virtualmente ausente”. Pela distribuição espacial das medianas históricas, nota-se que a maior parte das estações têm medianas históricas entre 1 e 3 mg/l. Esparsamente, verifica-se estações com valores superiores, predominantemente na faixa 4, que chega a 22 mg/l de óleos e graxas. Neste caso, a análise de autocorrelação permitiu uma clara delimitação de áreas com estações que se agrupam por seus altos valores, sendo visualizados *clusters* alto-alto nas bacias dos rios Buranhém, Doce, Grande, Itapemirim, Piracicaba/Jaguari e São Francisco. Ainda, há vários *outliers* do tipo alto-baixo na porção sudeste do estado, o que indica degradação pontual da água nestas estações em relação ao parâmetro óleos e graxas.

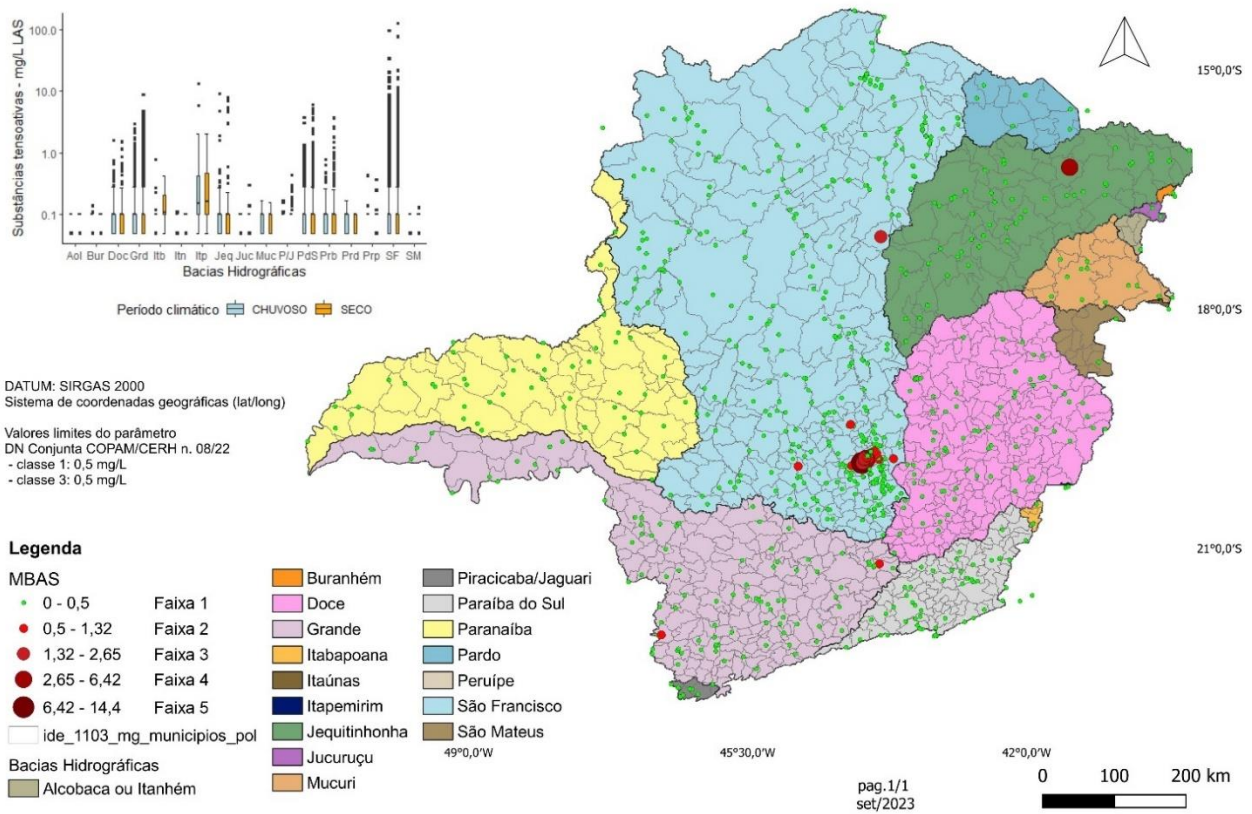
Ressalta-se que este parâmetro, quando encontrado na água, normalmente denota origem antrópica, advindas de lançamento de efluentes (CETESB, 2016). Assim como o parâmetro Fenóis totais, é um indicador de degradação de origem antrópica nas águas.

O gráfico *box-plot* para o parâmetro Substâncias tensoativas (Figura 66) mostra baixa variabilidade em todas as bacias hidrográficas, exceto na do rio Itabapoana, com casos de coincidência entre o primeiro, segundo e terceiro quartis. No entanto, o gráfico apresenta grande quantidade de *outliers* superiores nas bacias dos rios Doce, Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul, Paranaíba e São Francisco. Estes *outliers* chegam a valores de 100 mg/l, enquanto o limite legal estabelecido na DN Conjunta COPAM/CERH 08/22 é de 0,5 mg/l. A distribuição espacial das medianas históricas por estação mostra que apenas algumas estações, de forma pontual, ultrapassam este limite legal. Elas estão localizadas nas BHs do Rio São Francisco e dos rios Grande e Jequitinhonha.

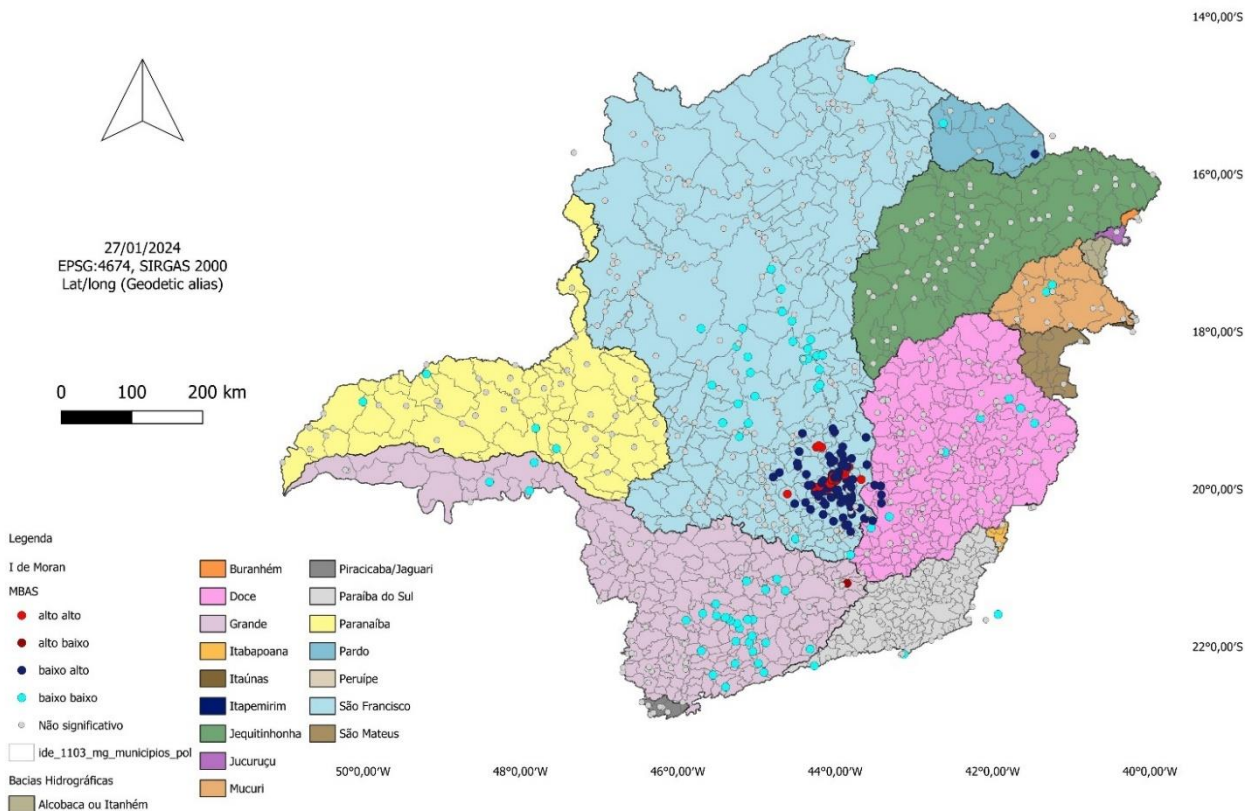
A aplicação do I de Moran local mostra a formação de dois *clusters* do tipo alto-alto com pouquíssimas estações, estas localizadas na RMBH, ambos na CH Rio das Velhas, em que as estações sobre os cursos d'água principais foram classificadas como *outliers* do tipo baixo-alto, já as estações entre as calhas formaram o *cluster* alto-alto.

Figura 66 - Mapas de análise espacial das medianas históricas de Substâncias tensoativas

Distribuição dos valores das medianas históricas do parâmetro Substâncias tensoativas (mg/L) em Minas Gerais



Representação dos resultados de autocorrelação espacial para o parâmetro Substância tensoativas (mg/L) no Estado de Minas Gerais



5.3. Análise integrada

Os resultados da análise exploratória de dados espaciais mostram que a degradação da qualidade da água no estado é uma realidade. As bacias hidrográficas mais impactadas são as dos rios Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco. Entretanto, a degradação não se estende por toda a área de cada uma destas bacias; para a maior parte dos parâmetros, as mesmas localidades (limitadas a porções de suas CHs) mostram-se repetidamente com valores significativamente acima dos vizinhos e, por vezes, acima dos limites legais estabelecidos.

Além disso, as circunscrições hidrográficas com maior degradação da qualidade da água foram afluentes dos rios Mogi-Guaçu e Pardo (Grande); Rio Preto e Paraibuna (Paraíba do Sul); Rio Verde Grande, Rio das Velhas e Rio Paraopeba (São Francisco). Para a BH do Rio Jequitinhonha, notou-se distribuição das estações com altos valores em suas três CHs. Destaca-se, ainda, a constante ocorrência de *outliers* do tipo alto-baixo, o que aponta uma possível degradação pontual da água, focada em estações específicas que exigem monitoramento e ações para que a degradação não se torne difusa, como a JE0029.

O município de Contagem apresenta estações que, em quase todas as análises realizadas neste estudo, destacaram-se pelos altos valores dos parâmetros e por formar *clusters* do tipo alto-alto. Seguida pelo município de Belo Horizonte, pode-se dizer que é a cidade com a água superficial que apresenta maior degradação no estado. As estações da RMBH agruparam-se em um único *cluster* do tipo alto-alto para todos os parâmetros, exceto para os parâmetros Alumínio dissolvido, Chumbo total, Cor verdadeira e Turbidez.

Trindade (2013) também observou maior degradação da sub-bacia do rio das Velhas dentre as sub-bacias do São Francisco, tendo como critério de decisão os impactos antrópicos. Ainda, considerou que a sub-bacia do rio Pará e a sub-bacia do rio Paraopeba destacam-se pela contaminação orgânica e pelas atividades minerárias e agropecuárias. Calazans (2015) concluiu que as estações localizadas na RMBH formam agrupamentos altamente degradados por matéria orgânica proveniente de esgoto doméstico e atividades industriais, que acarretam a degradação da qualidade das águas não só local, como de estações à jusante, afetadas por poluição difusa de atividades agropastoris.

Ademais, Trindade (2013) defende que a poluição difusa observada na sub-bacia do Rio Verde Grande está associada às suas características geológicas, em que predominam

formações cársticas; à pedologia, com solos erodíveis; e ao uso e ocupação, pela agricultura e desmatamento.

Assim, nota-se que em pontos focais no estado é preciso investir em tratamento terciário de esgoto, o que beneficiaria não apenas o local sob tratamento, como também áreas adjacentes e, conseqüentemente, aumentaria a qualidade das águas em toda a bacia. Outra opção tecnológica interessante é o reuso da água.

Notou-se que alguns dos parâmetros avaliados não apresentaram relevância na discussão sobre poluição das águas superficiais, uma vez que não ultrapassaram ou permaneceram próximos aos limites legais estabelecidos, são eles: Boro total, Bário total e Selênio total. Este é também o caso dos parâmetros com mais de 90% dos dados censurados, que significam que, em 90% das medições, não houve detecção de valores acima do limite analítico do método. São eles: Cadmio total, Chumbo total, Cianeto livre, Cobre total e Níquel total.

Sabendo-se do histórico de não violações legais sobre estes parâmetros ou de reiteradas medições abaixo dos limites de detecção, pode-se pensar em diminuir a frequência e os locais de análises, por exemplo. Esta medida aumentaria a eficiência do monitoramento, diminuindo gastos e possibilitando a inclusão de outros parâmetros relevantes, como fármacos e derivados de agrotóxicos. Calazans (2015) entende que os parâmetros com 90% ou mais de dados censurados, que assim não apresentam variações passíveis de análise, podem ser amostrados semestralmente, por exemplo.

Uma contribuição importante dos resultados é permitir a inclusão da autocorrelação em modelagem de qualidade da água, como demonstraram Miralha e Kim (2018) ao avaliarem diferentes bacias hidrográficas nos Estados Unidos. Os autores concluíram que, quanto maior a autocorrelação espacial de uma variável, mais importante se faz a inclusão desta propriedade na performance de modelos de qualidade da água.

Ainda, ressalta-se que a aplicação do I de Moran local retornou melhores resultados para aqueles parâmetros com distribuição espacial restrita a áreas específicas do estado, como o Arsênio total. Isto é corroborado por Mora et al. (2021), indicando que, embora o índice seja uma técnica estatística poderosa, este apresenta uma forte limitação quando os altos valores da variável analisada estão dispersos numa grande área. Em contrapartida, quando eles se restringem a uma área específica, a abordagem do I de Moran local fornece resultados consistentes, indicando as zonas ou áreas onde se localizam os pontos críticos.

6. CONCLUSÕES

Obteve-se a magnitude dos valores dos 56 parâmetros estudados através de estatística descritiva por Bacia Hidrográfica, com destaque, por exemplo, para os parâmetros Potássio total, em que 75% dos valores estão até 10 mg/L no período chuvoso para a Bacia do Rio Itaúnas; Demanda Bioquímica de Oxigênio, com 75% dos valores até 15 mg/L no período chuvoso na Bacia do Itapemirim; Indicador Fecal, cujo valor de terceiro quartil é igual a 100.000 NMP/100 mL na Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim em período chuvoso; Fósforo total, em que 75% dos valores estão até 0,5 mg/L na bacia do rio Itapemirim em período chuvoso; Alumínio, com 75% dos valores estão até 0,4 mg/L na bacia do Jequitinhonha; e Arsênio, em que 75% dos valores estão até 0,005 mg/L na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.

A ocorrência de maiores valores destes parâmetros em período chuvoso aponta para poluição difusa nas mencionadas bacias, tornando importante realizar uma análise mais detalhada sobre esta correlação.

Obteve-se a magnitude dos valores por estação, a partir de que destacaram-se por altos valores as estações BV062, na cidade de Nova Lima, na foz do Ribeirão Água Suja, afluente do Rio das Velhas para o parâmetro Arsênio total; PV030, que fica no município de Contagem, na calha do córrego do aterro do Perobas, antes da confluência com o córrego Sarandi, para o parâmetro Ferro dissolvido; a PV015 no córrego Sarandi, município de Contagem, para os parâmetros Zinco e Níquel total; a estação PV235, que fica na lagoa na Pampulha, para o parâmetro Densidade de Cianobactérias; a estação SF030, no Rio Mangal, município de Pedras De Maria da Cruz, para os parâmetros SST e Turbidez; a JE0029, para os parâmetros SDT e Fósforo, na bacia do rio Jequitinhonha; e a estação AV320, no córrego da Mina em Nova Lima, para os parâmetros Sulfato e Níquel total.

Conclui-se que método das quebras-naturais permite a visualização da distribuição espacial de variáveis dentre as estações de monitoramento de maneira satisfatória e, aliado a aplicação do I de Moran local, permite delimitar locais e pontos focais em relação à degradação da qualidade da água por parâmetro. Neste sentido, é notória a degradação da qualidade da água em Bacias Hidrográficas dos rios Grande, Jequitinhonha, Paraíba do Sul e São Francisco.

Esta degradação está restrita a áreas dentro das bacias, sendo que na bacia do rio Grande, ocorre na circunscrição hidrográfica dos afluentes dos rios Mogi-Guaçu e Pardo. Na do rio

Paraíba do Sul, na circunscrição do rio Preto e Paraibuna e na do São Francisco, nas circunscrições do Rio Verde Grande, do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba. Já na Bacia Hidrográfica do Rio Jequitinhonha, a degradação ocorre majoritariamente de forma pontual, destacando-se a constante ocorrência de estações classificadas como outliers do tipo alto-baixo, que exigem monitoramento e ações para que a degradação não se torne difusa, como a JE0029.

Ainda, na circunscrição hidrográfica dos rios das Velhas e Paraopeba, é notável que as estações nos municípios de Contagem e Belo Horizonte destacam-se pelos altos valores de diversos parâmetros estudados e pela formação reiterada de clusters do tipo alto-alto. As estações da RMBH agruparam-se em um único cluster do tipo alto-alto para todos os parâmetros, exceto para os parâmetros Alumínio dissolvido, Chumbo total, Cor verdadeira e Turbidez.

7. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Realizar análises estatísticas pormenorizadas nos dados de qualidade de água superficial na bacia hidrográfica do Rio Jequitinhonha, com especial foco para as estações que formaram *cluster* alto-alto e *outliers* alto-baixo;
- Executar a metodologia espacial com dados segregados por período climático;
- Utilizar a área de influência das estações sem sobreposição como base para o cálculo de autocorrelação espacial, de modo a delimitar melhor a separação entres os *clusters*;
- Não aplicar a metodologia para parâmetros com mais de 90% de dados censurados, visto que a ocorrência de valores iguais, se derivada da substituição de dados censurados, por exemplo, induz em erro quanto à autocorrelação;
- Não aplicar a metodologia para parâmetros com apenas uma estação com valor discrepante das demais.

REFERÊNCIAS

- ALI, Tarig;; MORTULA, Maruf; ATABAY, Serter. Monitoring and assessment of water quality of a coastal lake using high resolution imagery and GIS. **Pollut. Res**, v. 36, p. 8-17, 2017.
- ALMEIDA, Eduardo. Análise Exploratória de Dados Espaciais. In: ALMEIDA, Eduardo. **Econometria Espacial Aplicada**. Campinas: Alinea, 2012. Cap. 4. p. 100-147.
- ALMEIDA, Katiane Cristina de Brito. Avaliação da rede de monitoramento de qualidade das águas superficiais da Bacia do Rio das Velhas utilizando o método da entropia. 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ANSELIN, Luc. Local indicators of spatial association - LISA. **Geographical analysis**, v. 27, n. 2, p. 93-115, 1995. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x> Acesso em: 17 out. 2023.
- BARBOSA, Thaís Baêta Costa. Avaliação da qualidade das águas Superficiais da sub-bacia do rio Paracatu em função do uso e Ocupação do solo. 2015. 175 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- BEVERIDGE, Dan et al. A geostatistical approach to optimize water quality monitoring networks in large lakes: Application to Lake Winnipeg. *Journal of great lakes research*, v. 38, p. 174-182, 2012.
- BRASIL, **Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art 21 da Constituição Federal, e altera o art 1º da Lei nº 8001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7990, de 28 de dezembro de 1989. DOU 09 jan 1997
- CALAZANS, Giovanna Moura. Avaliação e proposta de adequação da rede de monitoramento da qualidade das águas superficiais das sub-bacias do Rio das Velhas e do Rio Paraopeba utilizando técnicas estatísticas multivariadas. 2015. 196 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- CALAZANS, Giovanna Moura; PINTO, Carolina Cristiane; COSTA, Elizângela Pinheiro da; PERINI, Anna Flávia; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa. The use of multivariate statistical methods for optimization of the surface water quality network monitoring in the Paraopeba river basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 8, p. 1-17, 2018. doi: 10.1007/s10661-018-6873-2 – A1
- CALAZANS, Giovanna Moura; PINTO, Carolina Cristiane; COSTA, Elizângela Pinheiro da; PERINI, Anna Flávia; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa. Using multivariate techniques as a strategy to guide optimization projects for the surface water quality network monitoring in the Velhas river basin, Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 190, n. 12, p. 1-15, 2018. DOI: 10.1007/s10661-018-7099-z – A1
- CAMPELLO, Marcos Santos. Recursos Minerais de Minas Gerais Online: Rochas carbonáticas. 1st edn, Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), p. 1-29, 2018.

CAMPOS, J. C., SCHAEFER, C. E. G., KER, J. C., SAADI, A., & de ALBUQUERQUE FILHO, M. R. Gênese e micropedologia de solos do Médio Jequitinhonha, de Turmalina a Pedra Azul, MG. **Geonomos**, 1997.

CETESB, Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo. Apêndice E-Significado Ambiental e Sanitário das Variáveis de Qualidade das Águas e dos Sedimentos e Metodologias Analíticas e de Amostragem. 2019.

CETESB, Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo. Ficha de Informação Toxicológica: Potássio e seus compostos. 2016.

CETESB, Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo. Ficha de Informação Toxicológica: Bário e seus compostos. 2022.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL, CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG n 02, de 22 de novembro de 2022**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Belo Horizonte: COPAM, 2008.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasil, 18 mar 2005

DA COSTA, Marco Aurélio; RIOS, Francisco Javier. The gold mining industry in Brazil: A historical overview. *Ore Geology Reviews*, v. 148, p. 105005, 2022.

DANTAS, Marina Salim. **Análise integrada do tratamento de esgotos domésticos e da qualidade das águas superficiais nas bacias hidrográficas do Rio das Velhas e dos Rios Jequitaí e Pacuí-MG**. 2020. 245 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

DANTAS, Marina Salim; OLIVEIRA, Josiani Cordova de; PINTO, Carolina Cristiane; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa. Impact of fecal contamination on surface water quality in the São Francisco River hydrographic basin in Minas Gerais, Brazil. **Journal of Water and Health**, v. 18, n. 1, p. 48-59. 2019. <https://doi.org/10.2166/wh.2019.153>. ISSN 1477-8920 EISSN 1996-7829 - A2

DE ARAÚJO NETO, José Ribeiro et al. Seleção dos indicadores da salinidade das águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará pelo emprego da análise multivariada. *Water Resources and Irrigation Management-WRIM*, v. 3, n. 2, p. 37-46, 2014.

DE FÁTIMA SILVA, Juliana; DA FONSECA, Valter Machado. Qualidade da água na bacia hidrográfica do rio Araguari e sua relação com o regime de chuvas. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 8, p. 82894-82919, 2021.

DIAS, Tatiana Gonçalves e CAXITO, Fabrício. Recursos Minerais de Minas Gerais Online: Manganês. 1st edn, Belo Horizonte: Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais (CODEMGE), p. 1-29, 2018.

DRUMOND, Sheila Neves. **Avaliação Da Qualidade Da Água, Do Sedimento E Identificação Molecular Dos Tipos Diarreio gênicos De Escherichia Coli Na Bacia Hidrográfica do Rio Xopotó na Região Do Alto Rio Doce, Minas Gerais.** 2016. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016. Disponível em: [https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7253/1/DISSERTA%*c3%87%83*O_Avalia%*c3%a7%a3o*Qualidade%*c3%81*gua.pdf](https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/7253/1/DISSERTA%c3%87%83O_Avalia%c3%a7%a3oQualidade%81gua.pdf). Acesso em: 08 jan. 2024.

ESRI. **How Spatial Autocorrelation (Global Moran's I) works.** Disponível em: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-how-spatial-autocorrelation-moran-s-i-spatial-st.htm>. Acesso em: 15 maio 2023.

FISCHER, Manfred M.; GETIS, Arthur (Ed.). **Handbook of applied spatial analysis: software tools, methods and applications.** Berlin: Springer, 2010.

FONSECA, Samuel Ferreira da; AGUIAR, Heloisa Helena de. Autocorrelação espacial entre indicadores socioeconômicos nos vales do Jequitinhonha e Mucuri. **Geosp Espaço e Tempo (Online)**, [S.L.], v. 23, n. 3, p. 619-639, 7 out. 2019.

FU, W. J.; JIANG, P. K.; ZHOU, G. M.; ZHAO, K. L.: Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China, **Biogeosciences**, v. 11, p. 2401–2409, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-11-2401-2014>, 2014.

GONÇALVES, Fabrícia Moreira. **Bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul: avaliação integrada da qualidade das águas dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.** 2016. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

GREKOUSIS, G. Spatial Autocorrelation. In *Spatial Analysis Methods and Practice: Describe – Explore – Explain through GIS* (pp. 207-274). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781108614528.005, 2020.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH: Relatório final – volume I: aspectos estratégicos para a gestão de recursos hídricos de Minas Gerais.** Belo Horizonte: IGAM, 2010, 518 p.

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS. **Qualidade das águas superficiais de Minas Gerais.** Belo Horizonte: IGAM, 1997 a 2021. Disponível em: <http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/handle/123456789/487>. Acesso em: 19 nov. 2022.

JENKS, George F. Optimal data classification for choropleth maps: Occasional Paper. n. 2, Department of Geography, University Kansas, 1977, 24 p.

JING, Yunqing et al. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. *Ecological Indicators*, v. 110, p. 105874, 2020.

JINGA, Yunqing; ZHANGB, Fei ; HE, Yufeng ; KUNG, Hsiang-te ; JOHNSON, Verner Carl ; ARIKEN, Muhadaisi. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China. **Ecological Indicators**, v. 110, p. 105874, 2020.

LIBÂNIO, Marcelo. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. Campinas, SP: Editora Átomo, 2010. 3a Edição.

LIMA, Higor Suzuki. Qualidade das águas superficiais da porção mineira da Bacia do Rio Doce e sua relação com aspectos socioambientais. 2016. 170 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

LIU, Jianfeng; ZHANG, Xiang ; XIA, Jun; WU, Shaofei; SHE, Dunxian; ZOU, Lei. Characterizing and explaining spatio-temporal variation of water quality in a highly disturbed river by multi statistical techniques. **SpringerPlus**, v. 5, p. 1-17. 2016. DOI 10.1186/s40064-016-2815-z.

LUO, Meng; ZHANG, Shengwei; HUANG, Lei; LIU, Zhiqiang; YANG, Lin; LI, Ruishen; LIN; Xi. Temporal and Spatial Changes of Ecological Environment Quality Based on RSEI: A Case Study in Ulan Mulun River Basin, China. **Sustainability**, v. 14, n. 20, p. 13232, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su142013232>.

MAINALI, J; CHANG, H. Landscape and anthropogenic factors affecting spatial patterns of water quality trends in a large river basin, South Korea. **Journal of Hydrology**, v. 564, n, p. 26-40. 2018.

MIRALHA, Lorryne; KIM, Daehyun. Accounting for and predicting the influence of spatial autocorrelation in water quality modeling. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 2, p. 64, 2018.

MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira et al. Análise espacial de dados geográficos. Brasília: Embrapa, 2004.

O'SULLIVAN, David; UNWIN, David. **Geographic information analysis**. New Jersey: John Wiley and Sons. 2 ed., 405 p., 2010.

OLIVEIRA, Josiani Cordova de; AMARAL, Rosa Carolina; ALMEIDA, Katiane Cristina de Brito; PINTO, Carolina Cristiane. Qualidade das águas superficiais do Médio São Francisco após a implantação dos perímetros irrigados de Gorutuba/Lagoa Grande e Jaíba. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n.4, p. 711-721. 2017. DOI: 10.1590/s1413-41522017136784 - B1

OLIVEIRA, Josiani Cordova de; MAIA, Kelly Prado; CASTRO, Nara Linhares Borges de; OLIVEIRA, Sílvia Maria Alves Corrêa. Spatial-temporal analysis of the surface water quality of the Pará River Basin through statistical techniques. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 14, n. 1, e2322. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.2322>. ISSN: 1980-993X - B2

OLIVEIRA, Karla Lorrane de. **Qualidade das águas superficiais de reservatórios e principais tributários: estudo de caso do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Irapé-MG**. 2020. 161 p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

OLIVEIRA, S. C.; SPERLING, M. Reliability analysis of wastewater treatment plants. *Water Research*, v. 42, issues 4 – 5, p. 1182-1194, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.09.001>

PINTO, Carolina Cristiane; ANDRADE, Stella Braga; PINTO, Éber Andrade; OLIVEIRA, Sílvia Maria Alves Corrêa. Análise de tendência de dados de concentração e carga dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da bacia do rio Verde. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, e40, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.0117160030> - B1

PINTO, Carolina Cristiane; CALAZANS, Giovanna Moura; OLIVEIRA, Sílvia Corrêa. Assessment of spatial variations in the surface water quality of the Velhas River Basin, Brazil, using multivariate statistical analysis and nonparametric statistics. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 3, 164, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7281-y> - ISSN 0167-6369 - A1

PRONIN, Eugeniusz. Are the existing guidelines sufficient for the assessment of bathing water quality? The example of Polish lakes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 28, n. 29, p. 39742-39756, 2021.

ROCHA, M. H. F. de F. .; MARQUES, R. F. de P. V. .; GONÇALVES JÚNIOR, D. E. .; SOARES, K. de J. .; OLIVEIRA, A. S. de .; SANTOS, C. da S. dos . Evaluation of the Water Quality and Toxic Contamination Index of the Ribeirão do Carmo in Monsenhor Horta, Mariana district – MG. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 10, p. e110101018680, 2021.

SALLUN, Alethéa Ernandes Martins; SUGUIO, Kenitiro; SALLUN FILHO, William. Geoprocessamento para cartografia do Alogrupo Alto Rio Paraná (SP, PR e MS). **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 59/3, p. 289-299, 2007.

SHUKLA, Sweta; LALITHA, S.; PRADESH, Uttar. Spatial Analysis of Water Quality Data Using Multivariate Spatial Outlier Detection Algorithms. **GANITA**, v. 70, n. 2, p. 87-96, 2021.

SILVA, Juliana de Fátima da. **Análise de Parâmetros de Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do rio Araguari**. 2018. 104 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/10108/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_An%c3%a1lisePar%c3%a2metrosQualidade.pdf. Acesso em: 09 jan. 2024.

SILVA, Raphael Ricardo da. **Estudos para Simulação da Qualidade da Água no Alto Curso Rio das Velhas: Rio Itabirito-MG**. 2020. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/13325/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_EstudosSimula%c3%a7%c3%a3oQualidade.pdf. Acesso em: 08 jan. 2024.

SOARES, Ana Luiza Cunha. **Identificação dos corpos d'água mais impactados das bacias dos rios Piracicaba e Paraopeba e cálculo do risco relativo de violação aos limites preconizados pela legislação ambiental**. 2017. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SOARES, Ana Luiza Cunha; PINTO, Carolina Cristiane; BARBOSA, Thaís Baêta Costa; OLIVEIRA, Sílvia Alves Corrêa. Análise das tendências temporais dos parâmetros de qualidade de água da Bacia do rio Paracatu em função do uso e ocupação do solo. **Sustentare**, v. 2, n. 3, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5892/st.v0i0.5213>

SOARES, Ana Luiza Cunha; PINTO, Carolina Cristiane; OLIVEIRA, Sílvia Alves Corrêa. Impacts of anthropogenic activities and calculation of the relative risk of violating surface water quality standards established by environmental legislation: a case study from the Piracicaba and Paraopeba river basins, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 14085–14099. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-07647-1-A1>

STROKAL, Maryna et al. Global multi-pollutant modelling of water quality: scientific challenges and future directions, **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 36, p. 116-125, 2019.

TAVARES, Tatiana Luiz dos Santos. O impacto de uma lagoa receptora de efluentes industriais contendo boro em um aquífero raso. 2006. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. doi:10.11606/D.44.2006.tde-15082008-100422. Acesso em: 2023-09-30.

TRINDADE, Ana Laura Cerqueira. Aplicação de técnicas estatísticas para avaliação de dados de monitoramento de qualidade das águas superficiais da porção mineira do rio São Francisco. 2013. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

TRINDADE, Ana Laura Cerqueira; ALMEIDA, Katiane Cristina de Brito; BARBOSA, Pedro Engler OLIVEIRA, Sílvia Maria Alves Corrêa. Tendências temporais e espaciais da qualidade das águas superficiais da sub-bacia do Rio das Velhas, estado de Minas Gerais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 1, p. 13-24. 2017. DOI: 10.1590/S1413-41522016131457 - B1

UNITED NATIONS (UN). **The Sustainable Development Goals Report: 2022**. New York: Lois Jensen, 2022. 68 p. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022.pdf>. Acesso em: 17 out. 2023.

VIGLIO, Eduardo Paim; CUNHA, Fernanda Gonçalves da. Atlas geoquímico da bacia do Rio São Francisco: Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, 2018.

VITORINO, D. C. F. R.; MORAIS, A. de A. .; CARDOSO, W. M. . Use of Geoprocessing Techniques to Support Water Quality Analysis in the Tanque River, MG. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e0111830486, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i8.30486.

VON SPERLING, Marcos; VERBYLA, Matthew E.; OLIVEIRA, Sílvia MAC. **Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners**. IWA Publishing, 1 ed., 640p., 2020.

XIONG, Yuan; XU, Weiheng; LU, Ning ; HUANG, Shaodong ; WU, Chao; WANG, Leiguang; DAI, Fei ; KOU, Weili. Assessment of spatial–temporal changes of ecological environment quality based on RSEI and GEE: A case study in Erhai Lake Basin, Yunnan province, China. **Ecological Indicators**. v. 125, p. 107518, 2021.

ZHAI, Xiaoyan; XIA, Jun ; ZHANG, Yongyong. Water quality variation in the highly disturbed Huai River Basin, China from 1994 to 2005 by multi-statistical analyses. **Science of the Total Environment** . 496, p. 594-606, 2014.

ZHAO, Gaolei et al. Study on the coupling model of urbanization and water environment with basin as a unit: A study on the Hanjiang Basin in China. **Ecological Indicators**, v. 131, p. 108130, 2021.