

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

**Instituto de Geociências**

**Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais**

Priscila Aparecida da Rocha Honorato

**A CONTRIBUIÇÃO DO MODELO FPEIR/TOPSIS NO  
DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA SEGURANÇA HÍDRICA DO MÉDIO  
CURSO DO RIO PARAÓPEBA, MG.**

Belo Horizonte

2024

Priscila Aparecida da Rocha Honorato

**A CONTRIBUIÇÃO DO MODELO FPEIR/TOPSIS NO DIAGNÓSTICO  
AMBIENTAL DA SEGURANÇA HÍDRICA DO MÉDIO CURSO DO RIO  
PARAOPEBA, MG.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Timbó  
Elmiro

Belo Horizonte

2024

H774c  
2024

Honorato, Priscila Aparecida da Rocha.

A contribuição do modelo FPEIR/TOPSIS no diagnóstico ambiental da segurança hídrica do médio curso do Rio Paraopeba, MG [manuscrito] / Priscila Aparecida da Rocha Honorato. – 2024.

135 f., enc. il. (principalmente color.)

Orientador: Marcos Antônio Timbó Elmiro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2024.

Bibliografia: f. 118-130.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Recursos hídricos – Desenvolvimento – Minas Gerais – Teses. 3. Bacias hidrográficas – Administração – Teses. 4. Paraopeba, Rio, Vale (MG) – Teses. I. Elmiro Timbó, Marcos Antônio. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. III. Título.

CDU: 911.2:519.6(815.1)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS

## FOLHA DE APROVAÇÃO

**"A contribuição do modelo FPEIR/TOPSIS no diagnóstico ambiental da segurança hídrica do médio curso do Rio Paraopeba"**

**Priscila Aparecida da Rocha Honorato**

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada, no dia **16 de julho de 2024**, pela Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais constituída pelos seguintes professores:

**Marcos Antônio Timbó Elmiro - Orientador**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Marcelo Antônio Nero**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Plínio da Costa Temba**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Helder Lages Jardim**

Universidade Federal de Minas Gerais

Belo Horizonte, 18 de julho de 2024.



Documento assinado eletronicamente por **Helder Lages Jardim, Membro**, em 18/07/2024, às 12:16, 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 **Marcos Antonio Timbo Elmiro, Professor do**



**Magistério Superior**, em 19/07/2024, às 08:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Antonio Nero, Professor do Magistério Superior**, em 23/07/2024, às 10:56, 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 **Plínio da Costa Temba, Decano(a)**, em 02/09/2024, às 13:39, 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](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3389257** e o código CRC **FB656E7A**.

---

Dedico esta Dissertação de Mestrado a minha mãe, meu irmão, e em especial ao Sandro, meu companheiro da vida. Foi uma longa jornada, de desafios, imprevistos e mudanças, e se não fosse o apoio daqueles que me cercam jamais teria conseguido.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me dado discernimento e força para finalizar essa importante etapa da minha vida. Não foi um caminho fácil. Enfrentei dúvidas e desapontamentos, e conciliar trabalho com estudos mostrou-se um desafio constante. No entanto, encontrei forças para seguir em frente e vencer cada obstáculo.

Agradeço também à minha família, que, mesmo carecendo da minha presença, soube compreender o momento de dedicação e sacrifício, reconhecendo que todo o esforço resultaria em um benefício para todos nós. Em especial, deixo meu agradecimento ao meu irmão Felipe e à minha mãe Terezinha, pelo apoio e compreensão.

Ao meu amado esposo Sandro, expressei minha mais profunda gratidão por sua paciência e por estar sempre ao meu lado. Sua companhia inabalável e seu apoio nos momentos mais difíceis foram fundamentais para que eu não desistisse. Você soube ser um verdadeiro companheiro e me encorajou quando mais precisei.

Agradeço, de coração, ao Professor Timbó, por sua sabedoria, paciência e orientação ao longo dessa jornada. Sua confiança no meu trabalho, sua liberdade criativa e o constante apoio foram cruciais para que eu pudesse alcançar este sonho de me tornar mestre pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Por fim, gostaria de agradecer à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da Bolsa de Mestrado nos últimos 24 meses, sem a qual este trabalho não seria possível.

## RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) enfrenta eventos climáticos extremos e impactos do rompimento de barragens da Vale S.A., em Brumadinho, 2019. A gestão Integrada de Recursos Hídricos é essencial para mitigar riscos, requerendo esforço conjunto entre autoridades, instituições e comunidade. A escassez hídrica iminente exige a otimização de soluções viáveis, evidenciando a importância da Análise de Decisão Multicritério (MCDA). O modelo FPEIR é aplicado para diagnosticar a segurança hídrica na região, permitindo a seleção e classificação de indicadores socioambientais. O objetivo geral é o diagnóstico da segurança hídrica e a melhoria da capacidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos no médio curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), em Minas Gerais. Os objetivos específicos visam caracterizar a BHRP, selecionar indicadores socioambientais, classificá-los, avaliar a segurança hídrica nos municípios e propor soluções para melhoria. A metodologia deste estudo integra uma abordagem baseada no modelo FPEIR-TOPSIS combinado com o método de pesos de entropia. Essa combinação oferece uma estratégia abrangente para a gestão sustentável dos recursos hídricos. A análise dos municípios da BHRP revela desafios críticos na gestão dos recursos hídricos devido ao crescimento populacional, industrialização e expansão agropecuária. A classificação dos municípios através do método TOPSIS destaca Brumadinho e Betim como os mais vulneráveis, com altos índices de doenças de veiculação hídrica e tratamento de esgoto insuficiente. A intensa atividade industrial e agrícola nessas áreas agrava a contaminação dos recursos hídricos, enquanto o rompimento da barragem em Brumadinho exemplifica os riscos ambientais. O estudo investigou o impacto do modelo FPEIR no diagnóstico da segurança hídrica na Bacia do Rio Paraopeba, MG, destacando dinâmicas socioambientais. Demonstrou a aplicabilidade do FPEIR em contextos complexos, reforçando a necessidade de abordagens integradas, como o FPEIR combinado com o TOPSIS. Os resultados ressaltaram pressões industriais e de uso da terra, indicando necessidade de políticas públicas robustas. A análise dos municípios revelou desafios específicos e a importância dos planos de gestão. Limitações de dados foram reconhecidas, sugerindo futuras pesquisas locais e expansão do modelo FPEIR. Soluções propostas incluem práticas agrícolas sustentáveis, controle da drenagem ácida de minas e políticas de gestão eficazes para garantir a segurança hídrica e a qualidade de vida. Além de melhoria da infraestrutura, gestão participativa, educação ambiental e adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-Chave: bacias hidrográficas; FPEIR; diagnóstico; segurança hídrica; TOPSIS.

## ABSTRACT

The Paraopeba River Hydrographic Basin (BHRP) faces extreme climatic events and impacts from the collapse of Vale S.A. dams in Brumadinho in 2019. Integrated Water Resources Management is essential to mitigate risks, requiring joint efforts among authorities, institutions, and the community. The imminent water scarcity demands the optimization of viable solutions, highlighting the importance of Multicriteria Decision Analysis (MCDA). The DPSIR model is applied to diagnose water security in the region, allowing for the selection and classification of socio-environmental indicators. The general objective is to diagnose water security and improve the planning and management capacity of water resources in the middle course of the Paraopeba River Hydrographic Basin (BHRP) in Minas Gerais. The specific objectives aim to characterize the BHRP, select socio-environmental indicators, classify them, assess water security in the municipalities, and propose improvement solutions. The methodology of this study integrates an approach based on the DPSIR-TOPSIS model combined with the entropy weight method. This combination offers a comprehensive strategy for the sustainable management of water resources. The analysis of the municipalities in the BHRP reveals critical challenges in water resource management due to population growth, industrialization, and agricultural expansion. The classification of municipalities using the TOPSIS method highlights Brumadinho and Betim as the most vulnerable, with high rates of waterborne diseases and insufficient sewage treatment. The intense industrial and agricultural activity in these areas exacerbates the contamination of water resources, while the dam collapse in Brumadinho exemplifies the environmental risks. The study investigated the impact of the DPSIR model on diagnosing water security in the Paraopeba River Basin, MG, highlighting socio-environmental dynamics. It demonstrated the applicability of DPSIR in complex contexts, reinforcing the need for integrated approaches such as DPSIR combined with TOPSIS. The results highlighted industrial and land use pressures, indicating the need for robust public policies. The analysis of the municipalities revealed specific challenges and the importance of management plans. Data limitations were acknowledged, suggesting future local research and expansion of the DPSIR model. Proposed solutions include sustainable agricultural practices, control of acid mine drainage, and effective management policies to ensure water security and quality of life, along with infrastructure improvement, participatory management, environmental education, and climate change adaptation.

Keywords: watersheds; FPEIR; diagnosis; water security; TOPSIS.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: ODS 6 – Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos. ....                        | 24 |
| Figura 2: Esquema conceitual dos indicadores FPEIR ajustado para estudo da segurança hídrica da Bacia do Rio Paraopeba. .... | 39 |
| Figura 3: Percurso metodológico da pesquisa. ....  | 43 |
| Figura 4: Mapa de localização da Bacia do Rio Paraopeba. ....  | 44 |
| Figura 5: Localização da área de estudo. ....  | 47 |
| Figura 6: Evolução das TGCAs dos municípios. ....  | 53 |
| Figura 7: Densidade demográfica dos municípios em estudo. ....   | 54 |
| Figura 8: Densidade demográfica dos municípios em estudo. ....   | 56 |
| Figura 9: Áreas cultivadas por município. ....   | 57 |
| Figura 10: Localização dos estabelecimentos industriais. ....  | 58 |
| Figura 11: Localização dos Processos Minerários Ativos. ....   | 60 |
| Figura 12: Localização da área urbanizada nos municípios. ....   | 61 |
| Figura 13: Demanda de água (m <sup>3</sup> /ano). ....   | 63 |
| Figura 14: Demanda de água tratada (m <sup>3</sup> /ano) em 2020. ....   | 66 |
| Figura 15: Localização dos acidentes ambientais (2014-2022). ....  | 68 |
| Figura 16: Quantidade de Barragens de Mineração ....   | 69 |
| Figura 17: Evolução do IDH-M nos municípios. ....  | 70 |
| Figura 18: Índice de Qualidade das Águas (IQA). ....   | 72 |
| Figura 19: Disponibilidade hídrica (mm <sup>3</sup> /ano). ....  | 75 |
| Figura 20: Doenças de veiculação hídrica. ....   | 78 |
| Figura 21: Porcentagem de efluentes sanitários coletados. ....   | 81 |
| Figura 22: Porcentagem de efluentes sanitários tratados. ....  | 82 |
| Figura 23: Fiscalizações realizadas entre 2006 e 2023. ....  | 85 |
| Figura 24: Percentual de abastecimento urbano. ....  | 86 |
| Figura 25: Perdas de água no abastecimento público. ....   | 87 |
| Figura 26: Estações de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas. ....   | 88 |
| Figura 27: Localização dos fluviômetros instalados. ....   | 89 |
| Figura 28: Localização das áreas com cobertura florestal. ....   | 91 |
| Figura 29: Localização da área protegida. ....   | 92 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 30: Classificação dos municípios em relação segurança hídrica. ....              | 98  |
| Figura 31: Classificação dos indicadores de Força Motriz (FM1 – FM06). ....             | 99  |
| Figura 32: Classificação dos indicadores de Força Motriz (FM07) Pressão (P1 a P5). .... | 100 |
| Figura 33: Classificação dos indicadores de Estado e Impacto. ....                      | 101 |
| Figura 34: Classificação dos indicadores de Resposta. ....                              | 102 |
| Figura 35: Classificação dos indicadores de Resposta. ....                              | 103 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1: Capacidade dos indicadores de Força Motriz e Pressão.....  | 49 |
| Tabela 2: Condição dos indicadores Estado, Impacto e Resposta.....   | 50 |
| Tabela 3: Evolução das TGCAs dos municípios.....   | 53 |
| Tabela 4: Densidade demográfica (hab.km <sup>2</sup> ) 2022.....   | 54 |
| Tabela 5: Estabelecimentos agropecuários.....  | 55 |
| Tabela 6: Área Cultivada (km <sup>2</sup> ).....   | 56 |
| Tabela 7: Estabelecimentos industriais (2013 a 2024).....  | 57 |
| Tabela 8: Processos Minerários Ativos .....  | 59 |
| Tabela 9: Porcentagem de área urbanizada nos municípios (km <sup>2</sup> ).....  | 61 |
| Tabela 10: Estimativas de demanda de água, por setor usuário, por município (m <sup>3</sup> /ano).....                                   | 64 |
| Tabela 11: Demanda de água tratada (m <sup>3</sup> /ano) em 2020.....  | 65 |
| Tabela 12: Quantidade de acidentes ambientais (2014-2022).....   | 67 |
| Tabela 13: Quantidade de Barragens de Mineração.....   | 68 |
| Tabela 14: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal.....   | 70 |
| Tabela 15: Índice de Qualidade da Água - 2021.....   | 72 |
| Tabela 16: Estações monitoradas que apresentaram parâmetros em conformidade e sem conformidade para resultados de fevereiro de 2024..... | 73 |
| Tabela 17: Quantidade de parâmetros alterados conforme DN 08/22.....   | 74 |
| Tabela 18: Disponibilidade hídrica (mm <sup>3</sup> /ano).....   | 74 |
| Tabela 19: Quantidade total de casos confirmados de doenças de veiculação hídrica – 2013 – 2023.....                                     | 77 |
| Tabela 20: Conflitos de uso das águas.....   | 79 |
| Tabela 21: Porcentagem de efluentes sanitários coletados.....  | 80 |
| Tabela 22: Porcentagem de efluentes sanitários tratados.....   | 82 |
| Tabela 23: Fiscalizações realizadas entre 2006 e 2023.....   | 84 |
| Tabela 24: Percentual das perdas de água no abastecimento público.....   | 87 |
| Tabela 25: Estações de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas.....  | 88 |
| Tabela 26: Quantidade de fluviômetros instalados.....  | 89 |
| Tabela 27: Proporção de área com cobertura florestal (km <sup>2</sup> ).....   | 90 |
| Tabela 28: Proporção de área protegida por Unidade de Conservação (km <sup>2</sup> ).....  | 92 |
| Tabela 29: Pesos dos indicadores calculados com o método da entropia.....  | 96 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 30: Classificação dos municípios de acordo com o método TOPSIS.....  | 97  |
| Tabela 31: Indicadores de situação da qualidade e quantidade das águas..... | 104 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| Quadro 1: Indicadores de Força Motriz.....                                       | 52 |
| Quadro 2: Indicadores de Pressão. ....   | 62 |
| Quadro 3: Indicadores de Estado.....   | 71 |
| Quadro 4: Indicadores de Impacto. ....   | 76 |
| Quadro 5: Indicadores de Resposta. ....  | 79 |
| Quadro 6: Coleta seletiva no município .....                                     | 83 |
| Quadro 7: Local de disposição de resíduos sólidos.....                           | 83 |
| Quadro 8: Instrumentos de gestão e planejamento estratégico dos municípios. .... | 94 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEI - Índice de Avaliação de Alternativas

ANA - Agência Nacional de Águas

ANM - Agência Nacional de Mineração

ARMBH - Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte

AEDAS - Associação Estadual de Desenvolvimento Ambiental Sustentável

BHRP - Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba

DDA - Doenças diarreicas agudas

DPSIR - Drivers, Pressures, State, Impact, Response (Força, Pressão, Estado, Impacto e Resposta)

DVH – Doenças de Veiculação Hídrica

EEA - European Environment Agency

SR – State/Response

FAO - Food and Agriculture Organization

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente

FPEIR - Força, Pressão, Estado, Impacto e Resposta

GEO - Global Environment Outlook (Perspectiva Ambiental Global)

GIRH - Gestão Integrada de Recursos Hídricos

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGAM - Instituto Mineiro de Gestão das Águas

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISH - Indicadores de Segurança Hídrica

LFA - Logical Framework Approach (Abordagem do Quadro Lógico)

MDCA - Método de Decisão por Critérios Múltiplos

MG - Minas Gerais

NACAB - Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Nações Unidas

PER - Pressão, Estado e Resposta

PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos

PIB - Produto Interno Bruto

PNRH - Plano Nacional de Recursos Hídricos

PNUMA - Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente

PUC - Pontifícia Universidade Católica

RH - Recursos Hídricos

SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SAPEAR - Sistema de Acompanhamento e Planejamento Estratégico de Ações em Recursos Hídricos

SINGREH - Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SP - São Paulo

TOPSIS - Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (Técnica para preferência de pedido por similaridade com a solução ideal)

UN-Water - United Nations Water (Água das Nações Unidas)

WWAP - World Water Assessment Programme (Programa Mundial de Avaliação da Água)

WWC - World Water Council (Conselho Mundial da Água)

## SUMÁRIO

|   |            |
|---|------------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>19</b>  |
| <b>1.1 OBJETIVOS .....</b>  | <b>21</b>  |
| 1.1.1 Objetivo Geral .....  | 21         |
| 1.1.2 Objetivos específicos .....   | 22         |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>   | <b>22</b>  |
| 2.1 Segurança Hídrica e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....                   | 22         |
| <b>2.2 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL.....</b>    | <b>27</b>  |
| 2.3 Modelo FPEIR.....   | 30         |
| 2.3.1 História e Evolução .....   | 30         |
| 2.3.2 Abordagem dos Usos e Aplicações do FPEIR. ....                                    | 32         |
| 2.3.3 Vantagem na utilização da estrutura FPEIR.....                                    | 35         |
| 2.3.4 Desvantagens na utilização da estrutura FPEIR.....                                | 38         |
| 2.3.5 Indicadores do modelo FPEIR.....  | 39         |
| <b>3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>  | <b>41</b>  |
| 3.1 Caracterização da área de estudo.....   | 43         |
| 3.2 Aplicando o modelo FPEIR.....   | 47         |
| 3.2.1 Indicadores de Força Motriz.....  | 52         |
| 3.2.2 Indicadores de Pressão.....   | 61         |
| 3.2.3 Indicadores de Estado.....  | 71         |
| 3.2.4 Indicadores de Impacto.....   | 76         |
| 3.2.5 Indicadores de Resposta .....   | 79         |
| 3.3 Análise multicritério para classificação dos indicadores: utilização do TOPSIS..... | 94         |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>  | <b>98</b>  |
| 4.1 Análise da qualidade e quantidade das Águas na BHRP .....                           | 99         |
| 4.1.1 Diagnóstico da segurança hídrica na porção média da Bacia do Rio Paraopeba. ....  | 106        |
| <b>5 CONCLUSÃO.....</b>   | <b>114</b> |

|                          |            |
|--------------------------|------------|
| <b>REFERÊNCIAS .....</b> | <b>118</b> |
| <b>APÊNDICE A .....</b>  | <b>131</b> |
| <b>APÊNDICE B.....</b>   | <b>134</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) tem enfrentado eventos extremos relacionados ao clima, como longos períodos de seca e chuvas intensas nos últimos anos, além de ter sido duramente afetada pelo rompimento da barragem B-I de rejeitos, pertencente ao complexo da Mina Córrego do Feijão da mineradora Vale S.A., se rompeu e na sequência colapsou as barragens (B-IV e B-IV-A) atingindo o ribeirão Ferro-Carvão Feijão em direção ao Rio Paraopeba, no município de Brumadinho, em 2019, tema amplamente abordado por alguns autores como Nero *et al.* (2024) e Lima *et al.* (2021). Adicionalmente, existem riscos associados ao rompimento de outras barragens na região, o que coloca o abastecimento da população e as atividades produtivas em risco iminente de escassez hídrica grave (ARMBH, 2022).

Dentro desse cenário, a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) é uma possível solução para os problemas ligados à administração pública da água, já que para mitigar riscos é necessário um esforço conjunto entre autoridades governamentais, instituições locais e a comunidade, visando realizar uma gestão de conflitos de planejamento e proteger os recursos hídricos. Isso ocorre porque, ao se tratar de gestão de bacias hidrográficas, muitas vezes o orçamento e os recursos são limitados, o que torna difícil aceitar todas as alternativas viáveis simultaneamente. Assim sendo, os gestores precisam encontrar um conjunto de alternativas que maximize o objetivo desejado, como a manutenção da vazão mínima e a melhoria da qualidade da água.

Nesse sentido, avanços no entendimento da organização e funcionamento dos sistemas ambientais têm desenvolvido pesquisas para avaliar a segurança hídrica de bacias hidrográficas não apenas por meio de indicadores ambientais, mas também por meio de indicadores econômicos e sociais. Com base nessa premissa, ao considerar indicadores durante uma análise, é possível avaliar o desempenho da bacia hidrográfica ao longo do tempo, identificar áreas de melhoria e empreender ações adequadas para garantir a segurança hídrica de forma equilibrada.

Contudo, a gestão de bacias hidrográficas frequentemente enfrenta limitações orçamentárias e de recursos, o que torna desafiador implementar todas as alternativas viáveis simultaneamente. Nesse cenário, os gestores precisam selecionar um conjunto de alternativas que otimizem a segurança hídrica. Portanto, classificar as alternativas viáveis pode ser mais prático do que buscar uma solução ideal, especialmente quando as restrições são incertas. Essa abordagem possibilita que os tomadores de decisão avancem em projetos de segurança de

recursos hídricos considerando o orçamento e os recursos disponíveis. Neste quadro, a Análise de Decisão Multicritério (MCDA) tem ganhado atenção nos últimos 20 anos, tanto na teórica quanto na prática (MARTTUNEN *et al.*, 2017). Isso se reflete no aumento significativo do número de estudos publicados que utilizam uma abordagem conceitual para a estruturação de problemas em combinação com um método analítico para análise multicritério. Por exemplo, o estudo de LI *et al.*, (2018) emprega a MCDA para priorizar tecnologias de tratamento de poluição da água na China; e o estudo de CARBONARI; LIBRELOTTO (2021) onde os autores utilizaram o modelo multicritério de decisão para o projeto de acampamentos temporários planejados voltados a cenários de desastre.

Nesse contexto, o modelo DPSIR (*Driver-Pressure-State-Impact-Response*), também conhecido por seu acrônimo em português FPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta), tem sido amplamente utilizado em avaliações de segurança hídrica de lagos, rios, terras e oceanos. Um exemplo é o trabalho de MARTÍN; MONTICO (2023), onde os autores adotaram uma abordagem multi-escalar que integra o método Global Environment Outlook (GEO) à Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH), usando o modelo FPEIR para avaliar os recursos hídricos na Bacia do Arroio Ludueña, em Santa Fé, República Argentina. Outro exemplo é a pesquisa de BENCHAWAN. *et al.* (2023), que combina a estrutura DPSIR com a abordagem da estrutura lógica (LFA - Logical Framework Approach) para desenvolver estratégias de gestão de água para uma planície de inundação lagunar na Tailândia. Adicionalmente, YIN; YUAN (2022) realizaram uma avaliação baseada no modelo DPSIR-TOPSIS para medir o desempenho do desenvolvimento verde em Pequim, Tianjin e Hebei. Os autores afirmam que o método de pesquisa é razoável e o resultado da avaliação é preciso, o que agrega valor de referência para orientar o desenvolvimento verde da região Beijing-Tianjin-Hebei.

Sob essa perspectiva, nesta pesquisa, optou-se por utilizar o modelo de Sistema de Indicadores de Sustentabilidade Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta (FPEIR) como abordagem conceitual. Esse modelo, amplamente aplicado em avaliações de segurança ecológica de lagos, rios, terras e oceanos, pode contribuir significativamente para o diagnóstico da segurança hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Ele auxilia na seleção de critérios-chave baseados em fatores-causa, simplifica a análise multicritério dos indicadores e propõe alternativas de ações para alcançar a segurança hídrica da bacia.

Neste estudo, a metodologia é baseada na aplicação de indicadores socioambientais selecionados pelo método FPEIR e na subsequente classificação dos municípios em relação à

segurança hídrica, por meio da MDCA. Essa abordagem permite identificar os municípios com melhor desempenho em segurança hídrica no médio curso da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, em Minas Gerais.

Acredita-se que a abordagem metodológica, baseada na seleção de indicadores que se relacionem com a segurança hídrica em um modelo que destaca as conexões entre as causas dos problemas ambientais, seus impactos e as respostas da sociedade, subsidia de forma eficaz o estabelecimento de diretrizes de gestão ambiental para bacias hidrográficas produtoras de água.

No Capítulo 1, será apresentada a fundamentação teórica, abordando a segurança hídrica, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, e a bacia hidrográfica como unidade de planejamento e gestão ambiental. Em seguida, será discutido o modelo FPEIR, com ênfase em suas abordagens, aplicações, vantagens e desvantagens. No Capítulo 2, serão descritos os procedimentos metodológicos utilizados na pesquisa. O Capítulo 4 será dedicado à apresentação e análise dos resultados. No Capítulo 5, serão expostas as conclusões do estudo, e, por fim, o Capítulo 6 trará as referências bibliográficas utilizadas.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa tem como objetivo geral propor e analisar um conjunto de indicadores socioambientais para o diagnóstico da segurança hídrica e a melhoria da capacidade de planejamento e gestão dos recursos hídricos no médio curso da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), em Minas Gerais.

A pesquisa visa selecionar esses indicadores utilizando o método FPEIR e classificá-los de acordo com sua capacidade de alterar o estado dos recursos hídricos em termos de quantidade e qualidade. A subsequente classificação dos municípios, realizada pelo método TOPSIS, permitirá identificar quais municípios possuem melhor desempenho em segurança hídrica, facilitando a proposição de soluções baseadas em boas práticas, planos de gestão e monitoramento, e a participação da comunidade. Os resultados obtidos têm como propósito

principal orientar a formulação de políticas públicas voltadas para a promoção da sustentabilidade hídrica na região.

### 1.1.2 Objetivos específicos

No intuito de atingir o objetivo geral, o projeto de pesquisa se propõe a realizar os seguintes objetivos específicos:

- i. Selecionar um Conjunto de Indicadores Socioambientais: Selecionar indicadores de segurança hídrica utilizando o método FPEIR, que permitam avaliar a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.
- ii. Classificar os Indicadores de Segurança Hídrica: Avaliar e classificar os indicadores selecionados de acordo com sua capacidade de alterar o estado dos recursos hídricos, em termos de quantidade e qualidade, utilizando métodos de análise estatística e multicritério.
- iii. Avaliar a Segurança Hídrica nos Municípios: Aplicar o método TOPSIS para classificar os municípios do médio curso da bacia do Rio Paraopeba em relação à segurança hídrica, considerando os pesos dos indicadores determinados pela entropia.
- iv. Realizar um Diagnóstico da Segurança Hídrica: Analisar os resultados da classificação para identificar os municípios com melhor e pior desempenho em segurança hídrica, destacando os principais fatores que contribuem para essas posições.
- v. Propor Soluções para Melhoria da Segurança Hídrica: Desenvolver propostas de soluções baseadas em boas práticas de gestão de recursos hídricos, desenvolvimento de planos de gestão e monitoramento, e estratégias de participação comunitária, visando a melhoria da segurança hídrica na região.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Segurança Hídrica e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável

Os conceitos de segurança hídrica apresentados por organizações internacionais como as Nações Unidas (ONU), World Water Council (WWC - Conselho Mundial da Água), Global

Water Partnership (GWP - Parceria Global pela Água), Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) e WaterAid enfatizam os dois aspectos da disponibilidade de água, abrangendo dimensões quantitativas e qualitativas das disponibilidades para responder às necessidades humanas essenciais. Além disso, a operacionalização da segurança hídrica envolve a utilização de diversas ferramentas como, por exemplo, indicadores para avaliar e enfrentar eficazmente os desafios relacionados com a água (GIUGNI *et al.*, 2022).

Embora a segurança hídrica tenha recebido atenção global desde 2000, ainda falta uma definição universalmente aceita, o que dificulta a implementação prática e a medição das iniciativas relacionadas (BUTTE *et al.*, 2022). Apesar da falta de um conceito definitivo, a UNU-INWE (2013) define segurança hídrica como uma forma de garantir o acesso sustentável a água adequada e de qualidade para meios de subsistência, bem-estar e desenvolvimento socioeconômico, enquanto protege contra a poluição, desastres e preserva os ecossistemas em um clima estável.

Dessa forma, para garantir a segurança hídrica, a UNU-INWEH (2013) propõe que sejam necessárias as seguintes condições: distribuir água entre os usuários de forma justa, eficiente e transparente; fornecer água que atenda às necessidades humanas básicas de forma acessível e disponível para todos; captar e tratar a água ao longo de todo o seu ciclo para evitar contaminação e doenças; e estabelecer mecanismos justos, acessíveis e eficazes para gerir e lidar com potenciais conflitos (UNU-INWEH, 2013). Essas condições visam garantir a sustentabilidade e a equidade no uso dos recursos hídricos, bem como promover a saúde e o bem-estar das comunidades.

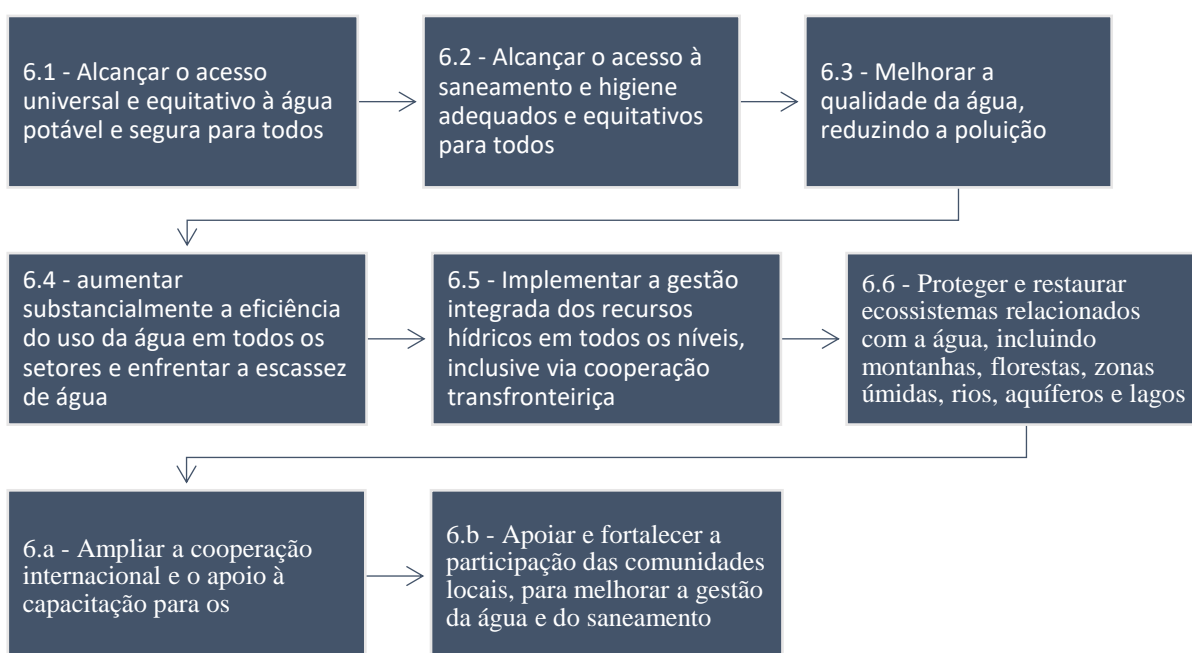
Nesse sentido, a implementação desse conceito requer uma abordagem interdisciplinar que assegure a gestão sustentável da água em todo o ciclo hidrológico. Portanto, continua sendo um tópico amplamente debatido na literatura e está sendo adotado globalmente para demonstrar modelos de gestão que priorizem as consequências e eficácia das políticas hídricas.

No contexto de uma abordagem integrada, a ONU estabeleceu os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) na Agenda 2030 (IPEA, 2019). Dentre esses objetivos, o ODS 6 se destaca na presente pesquisa, visando garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas as pessoas. Este ODS compreende oito metas, cada uma delas acompanhada por indicadores específicos de progresso. Sua abrangência vai além do fornecimento de água potável e saneamento, incorporando uma ampla gama de aspectos

relacionados aos recursos hídricos, incluindo questões sanitárias, impactos ambientais, dimensões sociais, implicações econômicas e preocupações com a segurança.

Conforme dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2019), as metas estabelecidas para o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 a serem alcançadas até 2030 são detalhadas na **Figura 1**.

**Figura 1: ODS 6 – Garantir disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos.**



(Fonte: ANA, 2019<sup>a</sup>)

No Brasil, os indicadores do ODS 6 têm mostrado progresso positivo na maioria das metas, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2019a). A meta 6.1 busca acesso universal à água potável e segura até 2030, e até 2018, 95,1% da população tinha acesso à água potável segura (ANA, 2020). No entanto, mais de 70% da água é usada na agricultura e pecuária, 12% na indústria e mineração, restando apenas 4% para consumo humano (ANA, 2019b; FAO, 2020).

Nesse cenário, desafios persistem, a baixa infraestrutura hídrica e a falta de tratamento de esgoto são desafios para o Brasil alcançar as metas do ODS 6 (ANA, 2019a). A meta 6.2 almeja acesso adequado ao saneamento até 2030, mas em 2018, apenas 63,4% tinham acesso a este recurso (ANA, 2020). A qualidade da água também é uma preocupação (ANA, 2019a). A

meta 6.3 visa água segura para todos, mas até 2018, apenas 51,9% das águas residuais eram tratadas de forma segura (ANA, 2020). A meta 6.4, foca em garantir retiradas sustentáveis para enfrentar a escassez; em 2018, o investimento em eficiência hídrica no Brasil foi de R\$ 22,00 por m<sup>3</sup> (ANA, 2020). De forma geral, se considerarmos que R\$ 22,00 por m<sup>3</sup> inclui custos com tecnologias e infraestrutura, pode-se argumentar que, em um contexto global, esse valor não é alto, especialmente quando comparado a países desenvolvidos que investem significativamente em tecnologias avançadas para a gestão de recursos hídricos. Contudo, globalmente, o valor de investimentos em eficiência hídrica pode variar amplamente dependendo de fatores como o custo da infraestrutura, a disponibilidade de recursos hídricos, e as tecnologias implementadas. Por exemplo, em países com maior escassez de água, como Israel, onde a gestão hídrica é altamente avançada, os investimentos per capita e por volume de água podem ser significativamente mais altos. Em outros lugares, onde a água é mais abundante e o custo de tecnologias de eficiência é menor, os valores podem ser inferiores.

A meta 6.5 preconiza a gestão integrada de recursos hídricos; até 2019, o progresso no Brasil foi de 63,1%, com 61,8% das bacias transfronteiriças abrangidas por acordos de cooperação (ANA, 2020). A preservação dos ecossistemas aquáticos (meta 6.6) é vital para a qualidade e disponibilidade da água, mas apenas 10,3% apresentaram melhorias até 2015 (ANA, 2020). Até 2017, cerca de 49% das unidades administrativas locais no Brasil possuíam políticas para participação local na gestão de água e saneamento (ANA, 2020). Essa dificuldade está relacionada ao deslocamento de populações de baixa renda para recuperar ecossistemas, ligado ao uso da terra (BARBADO; LEAL, 2021).

Nesse contexto, a busca pela segurança, garantindo água para necessidades humanas e ecossistemas, é avaliada pela ANA por meio do Índice de Segurança Hídrica (ISH) do Plano Nacional de Segurança Hídrica. O ISH tem dimensões (Humana, Econômica, Ecossistêmica e Resiliência) com indicadores para avaliar diferentes aspectos da segurança hídrica. O ISH revelou que cerca de 34% da população urbana (60,9 milhões de pessoas) em 2017 vivia em cidades com menor garantia de abastecimento (ANA, 2019). Já a dimensão econômica avalia riscos dos setores agropecuário e industrial devido à oferta hídrica. O risco econômico total em um cenário de crise foi de R\$ 228,4 bilhões em 2017 (13% do PIB desses setores), destacando a vulnerabilidade e a importância da gestão hídrica (ANA, 2019).

A dimensão ecossistêmica considera os mananciais e a qualidade da água, revelando que 2% da área do país tem baixa segurança hídrica, devido à poluição por esgotos (ANA,

2019). Já a dimensão de resiliência avalia estoques de água e aponta vulnerabilidade em regiões como o semiárido (ANA, 2019).

Apesar de esforços, o Brasil ainda enfrenta lacunas para alcançar o ODS 6 e políticas públicas municipais devem considerar a preservação dos recursos hídricos no território, alinhando-se à Agenda 2030. O Instituto Trata Brasil divulgou dados sobre saneamento em 2023, destacando municípios bem avaliados, mas há grandes disparidades regionais. De acordo com um relatório divulgado pelo Instituto (OLIVEIRA *et al.*, 2023), foram disponibilizados dados relacionados ao saneamento nos 100 municípios mais populosos do Brasil, com base nas informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento referentes ao ano de 2021. Esse relatório elabora um ranking fundamentado em 12 indicadores, atribuindo pontuações aos municípios avaliados.

No contexto do Ranking de 2023, entre os 20 municípios melhor classificados em termos de saneamento, observa-se uma notável presença do estado de São Paulo, com oito municípios, dentre os quais a metade é atendida pela SABESP. Adicionalmente, o Paraná também demonstra destaque, com a presença de seis municípios na lista, todos atendidos pela SANEPAR. A lista contempla ainda um município de Minas Gerais, Rio de Janeiro, Tocantins, Paraíba, Bahia e Brasília, localizada no Distrito Federal. Um feito de destaque nessa edição do Ranking do Saneamento é a inédita obtenção de nota máxima em todas as dimensões analisadas por um município. São José do Rio Preto, situado no estado de São Paulo, alcançou essa conquista histórica, obtendo a máxima pontuação em todos os aspectos avaliados.

Com base no exposto, pode-se concluir que a interseção entre a segurança hídrica e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 destaca a complexidade e a importância de garantir o acesso sustentável à água e ao saneamento para todas as pessoas. Embora tenham sido feitos progressos significativos na implementação de políticas e indicadores relacionados, ainda existem desafios significativos a serem enfrentados, especialmente no Brasil, onde lacunas persistem na infraestrutura hídrica e no tratamento de esgoto. Diante desse cenário, é crucial que as políticas públicas sejam orientadas para superar esses desafios, alinhando-se aos objetivos estabelecidos pela Agenda 2030 e priorizando a preservação dos recursos hídricos em todo o país.

## 2.2 A BACIA HIDROGRÁFICA COMO UNIDADE DE PLANEJAMENTO E GESTÃO AMBIENTAL

A água desempenha um papel socioeconômico fundamental, impulsionando diversos setores que geram renda no país, como agricultura, pecuária, indústria, produção de energia, transporte hidroviário, turismo, pesca e aquicultura. No entanto, para garantir o equilíbrio entre a abundância desse recurso e o desenvolvimento econômico, é essencial uma gestão integrada dos recursos hídricos. O planejamento deve ser realizado de forma harmonizada entre o poder público, os usuários e os gestores, a fim de evitar a intensificação de conflitos e prejuízos à qualidade e disponibilidade da água.

No Brasil, as bacias hidrográficas são consideradas unidades territoriais fundamentais para a efetivação do Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), conforme estabelecido pelo Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos - SINGREH, por meio da Lei 9433/1997 (BRASIL, 1997). Essa abordagem reconhece a importância das bacias como unidades de gestão, permitindo a definição de diretrizes que viabilizem o planejamento integrado e a gestão dos recursos hídricos.

Nesse sentido, pode-se definir uma bacia hidrográfica como a área de terra que é drenada por um curso de água principal, juntamente com seus afluentes. Mas a sua gestão envolve não só os aspectos físicos, como também uma componente social crucial, impactando o bem-estar da população e exigindo ação política e responsabilidades partilhadas (NUNES *et al.*, 2023).

A bacia hidrográfica é considerada a unidade mais apropriada para estudos qualitativos e quantitativos dos recursos hídricos, bem como dos fluxos de sedimentos e nutrientes que ocorrem nessa área (PIRES *et al.*, 2002).

Dessa forma, ela se torna uma entidade sistêmica essencial para o planejamento e dimensionamento hidrológico, permitindo a avaliação do balanço hídrico disponível tanto para as atividades humanas quanto para o ecossistema (PORTO; PORTO, 2008).

Estudos sobre bacias hidrográficas enfatizam a importância da ocupação ordenada da terra e das atividades humanas na manutenção do equilíbrio dentro desses sistemas (LÓPEZ *et al.*, 2022). Considerando-se a relação entre o uso do solo, as intervenções humanas e o equilíbrio dos recursos hídricos, é possível estabelecer práticas sustentáveis que garantam a conservação e o bom funcionamento das bacias hidrográficas, beneficiando, em última análise,

tanto o meio ambiente como as comunidades que dependem dessas fontes vitais de água (ALMEIDA *et al.*, 2022).

Concordando com essa perspectiva, os estudos de BOTELHO; SILVA (2007) enfatizam que quando o homem planeja e ocupa o território de forma ordenada, ele possibilita o estabelecimento de um novo equilíbrio dentro do sistema que habita, ou seja, a bacia hidrográfica. Isso ressalta a importância de considerar a relação entre a ocupação do território, as atividades humanas e o equilíbrio dos recursos hídricos na gestão das bacias hidrográficas.

A preservação das bacias hidrográficas ganhou, de fato, importância significativa devido às potenciais consequências da proteção inadequada das nascentes, levando à contaminação dos recursos hídricos, degradação ambiental e impactos negativos na biodiversidade, no bem-estar social e no desenvolvimento econômico (LISBOA *et al.*, 2023).

Nesse sentido, nos últimos anos, a preservação das bacias hidrográficas tornou-se tema relevante, visto que as consequências da proteção inadequada dos mananciais podem ocasionar a contaminação dos recursos hídricos disponíveis, conduzindo a um quadro de degradação ambiental e prejudicando não somente a biodiversidade, mas o próprio desenvolvimento social e econômico da região atingida.

Isto posto, para avaliar a segurança hídrica de uma bacia hidrográfica de forma eficaz, compreender o seu estado atual é crucial para decisões de gestão informadas, considerando as mudanças sociais, econômicas e ambientais que impactam a bacia (NKIAKA *et al.*, 2022). A utilização de indicadores socioambientais desempenha um papel significativo na caracterização da condição atual da bacia, orientando estratégias de gestão e decisões.

Os indicadores socioambientais são ferramentas que permitem medir determinados aspectos de um sistema, a partir dos quais conclusões sobre fenômenos específicos podem ser deduzidas. A vantagem desses indicadores é a capacidade de transformar dados técnicos e complexos em informações simples e resumidas, facilitando a compreensão e a comunicação dos resultados (IBGE, 2015; HEINK; KOWARIK, 2010; TSCHERNING *et al.*, 2012).

Assim, a seleção de indicadores adequados para caracterizar o sistema em análise durante o processo de tomada de decisão os transforma em ferramentas eficazes para decisões políticas (NICHOLSON *et al.*, 2012; WWAP, 2012).

Nesse sentido, é fundamental que os indicadores socioambientais representem, de maneira precisa, a realidade do sistema analisado, pois serão utilizados como ferramentas que

consolidam uma grande quantidade de dados em informações compactas, orientando as tomadas de decisões (KOLOSOVA; VADIM, 2016). Além disso, os indicadores socioambientais, quando bem desenvolvidos, têm a capacidade de condensar e interpretar dados relevantes, medindo, quantificando, qualificando e comunicando informações de maneira clara e compreensível (KURKA; BLACKWOOD, 2013).

Como mencionado anteriormente, à medida que o conceito de segurança hídrica se desenvolveu e se difundiu, surgiram indicadores específicos para medir essa segurança. BEEK; ARRIENS (2014) destacam a existência de uma variedade de indicadores de segurança hídrica na literatura, incluindo aqueles relatados nos documentos do Relatório de Desenvolvimento Mundial da Água (UN-Water) e da Parceria Global pela Água (GWP).

No contexto brasileiro, diversos estudos têm proposto indicadores de segurança hídrica. Por exemplo, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) desenvolveu indicadores de desenvolvimento sustentável. Além disso, a Agência Nacional de Águas (ANA, 2019) criou o Índice de Segurança Hídrica (ISH) e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2008) utiliza diversos indicadores para diagnóstico da situação dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Grande, SP/MG.

Também foram propostos indicadores de segurança hídrica na pesquisa de MACHADO (2018), na qual o autor propôs e avaliou uma série de indicadores de segurança hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Jundiá-Mirim, em São Paulo. De forma similar, na bacia do Tietê-Jacaré, São Paulo, CORRÊA; TEIXEIRA (2013) desenvolveram indicadores de sustentabilidade para gestão de recursos hídricos. Além disso, CARVALHO *et al.*, (2013) utilizaram um processo participativo na construção de indicadores hidro ambientais para bacias hidrográficas. BERBEO *et al.*, (2022), por exemplo, elaboraram um portfólio de indicadores para áreas consideradas prioritárias devido à sua importância e singularidade ecológica. O objetivo era promover a conservação e o uso dessas áreas em escalas regionais. Para alcançar esse fim, eles integraram diferentes abordagens metodológicas, incluindo avaliação da biodiversidade, monitoramento e gestão territorial. Essa integração permitiu a identificação dessas áreas e a definição de estratégias de conservação alinhadas com as necessidades territoriais específicas.

Embora o uso de muitos indicadores possa aumentar a complexidade e potencialmente diluir o foco de ações específicas, eles também oferecem uma visão mais completa e precisa das condições hídricas, fundamental para uma gestão eficaz. O desafio é garantir a seleção e integração adequada desses indicadores para maximizar sua utilidade sem comprometer a

clareza e a eficácia das políticas de preservação. Com indicadores bem escolhidos, é possível monitorar tendências, identificar problemas e embasar decisões e políticas públicas, contribuindo para uma gestão mais efetiva e sustentável.

Com base na premissa de utilizar sistemas de indicadores para sistematizar problemas ambientais, destaca-se o modelo Força Motriz – Pressão – Estado – Impacto – Resposta (FPEIR), que oferece uma estrutura por meio de indicadores para identificar problemas ambientais em uma localidade, incluindo suas causas, impactos e possíveis soluções. Este modelo foi aplicado por SHI *et al.*, (2021) na avaliação da segurança hídrica em bacias na província de Jiangxi, China, por ACOSTUPA *et al.*, (2018) para realizar um diagnóstico ambiental do Pantanal Lucre-Huacarpay através da metodologia FPEIR. Além disso, destaca-se o estudo de ARRIAGADA (2021), que aplicou o modelo conceitual FPEIR para a gestão ambiental de lagos na bacia do Rio Valdivia, Chile.

## 2.3 Modelo FPEIR

### 2.3.1 História e Evolução

Uma abordagem amplamente utilizada para avaliar a segurança hídrica é a aplicação de indicadores em metodologias que permitem caracterizar um determinado ambiente. O modelo FPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta, em inglês DPSIR - Driving Force, Pressure, State, Impact, and Response) é uma evolução de métodos conceituais mais simples.

Em 1979, RAPPORT; FRIEND (1979) propuseram o modelo estrutural ER (Estresse-Resposta, em inglês SR, Stress-Response) para analisar e descrever a interação entre o desenvolvimento socioeconômico e o ambiente ecológico. Posteriormente, esse método inicial foi aprimorado pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 1993) e pelo Programa Ambiental das Nações Unidas, formando o modelo PER (Pressão-Estado-Resposta, PSR em inglês). O modelo PER baseia-se no conceito de causa, e sua essência é a ideia de que as atividades humanas exercem pressão sobre o meio ambiente e seus recursos naturais (pressão), o que altera o estado tanto do meio ambiente quanto da qualidade dos recursos naturais (estado), levando a sociedade humana a responder a essas mudanças de estado por meio da adoção de políticas, decisões ou medidas de gestão que afetam o meio ambiente, a

economia e a terra (resposta) (OCDE, 1993). De acordo com FELINTO *et al.*, (2019), esse método é um dos mais utilizados para sistematizar problemas ambientais.

Para melhorar a aplicabilidade do modelo, a Agência Europeia do Ambiente (EEA) adotou oficialmente o modelo FPEIR (Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta, em inglês DPSIR - Driving Force, Pressure, State, Impact, and Response) em 1999. Essa evolução do modelo possui as vantagens de abrangência, sistematicidade e flexibilidade. O modelo FPEIR abrange os cinco fatores de avaliação e estabelece uma rede causal entre eles, refletindo o impacto do desenvolvimento socioeconômico e das atividades humanas no estado do sistema e a resposta humana a impactos adversos (PINTO *et al.*, 2013). As diretrizes originais da EEA (Agência Europeia do Ambiente, 1999) propõem o uso da estrutura FPEIR para descrever questões ambientais. No entanto, essa estrutura tem sido ampliada para avaliar não apenas aspectos ambientais, mas também questões sociais, econômicas e institucionais. Dependendo do tema em análise, os indicadores de cada categoria podem estar relacionados com as dimensões ecológica, econômica, social ou de governança, podendo ser considerada mais do que uma dimensão em cada categoria (MARTINS *et al.*, 2012).

Essa flexibilidade da matriz FPEIR a torna especialmente adequada para a gestão de bacias hidrográficas, uma vez que permite uma avaliação integrada dos fatores que afetam a segurança hídrica. A estrutura considera as forças motrizes que impulsionam as mudanças no ambiente, as pressões resultantes dessas forças, o estado atual do sistema hidrológico, os impactos causados pelas pressões e as respostas adotadas pela sociedade. Com essa abordagem mais abrangente, é possível compreender melhor as interações complexas entre o desenvolvimento socioeconômico, as atividades humanas e o estado do sistema hídrico, contribuindo para uma gestão mais eficaz e sustentável dos recursos hídricos (SALAMÉ *et al.*, 2020).

A estrutura circular do modelo FPEIR, capta o ciclo contínuo de influências enfatizando como forças motrizes, pressões, mudanças de estado, impactos e respostas estão interconectados, orientando, em última análise, a tomada de decisão para o desenvolvimento sustentável e alocação de recursos nos sistemas hídricos. (PIRRONE *et al.*, 2005).

Nesse contexto, a abordagem circular reflete a dinâmica complexa das questões relacionadas à segurança hídrica, proporcionando uma compreensão ampla das relações de causa e efeito (EEA, 1999). Essa estrutura permite identificar as forças motrizes que impulsionam as ações humanas que afetam o meio ambiente. Geralmente, essas forças motrizes incluem indicadores populacionais, socioeconômicos e outros que destacam ações específicas

com potencial para prejudicar a natureza, denominadas como pressões. Os indicadores de pressão podem incluir descarga de poluentes, perda de mata ciliar e outros aspectos relevantes.

Os indicadores de estado são utilizados para mostrar as mudanças potenciais nos recursos naturais causadas pelas pressões (EEA, 1999). Eles incluem medições da qualidade da água, do estado dos sedimentos e de outros aspectos relacionados. Por sua vez, os indicadores de impacto representam as consequências socioeconômicas negativas das atividades humanas sobre o ecossistema e a sociedade (EEA, 1999). Por exemplo, esses podem englobar comprometimentos nos serviços de fornecimento de água que podem gerar conflitos. Assim como as pressões, esses indicadores podem servir como estímulo para a adoção de ações preventivas ou curativas, visando mitigar os impactos em diversos setores afetados. As ações de resposta, então, podem incluir políticas de proteção dos rios, iniciativas de restauração ecológica e outros mecanismos relevantes para promover a sustentabilidade ambiental.

Conforme as diretrizes da EEA (1999), os indicadores da matriz FPEIR devem ser descritivos e medir diretamente as características do mundo real. Para aprimorar as análises futuras, é essencial identificar os principais indicadores, organizar os dados disponíveis e recomendar a coleta de dados ausentes. Essa abordagem visa facilitar a comunicação entre as partes interessadas e melhorar os processos de tomada de decisão (Martins, *et al.*, 2012). Adotando essas diretrizes, é possível obter informações relevantes e confiáveis para avaliar o estado das bacias hidrográficas, entender as pressões exercidas sobre elas e pôr em prática respostas adequadas.

### **2.3.2 Abordagem dos Usos e Aplicações do FPEIR.**

O modelo FPEIR tem sido amplamente aplicado em diferentes partes do mundo, abrangendo escalas que variam de regional a nacional. Este modelo é utilizado para realizar avaliações de impactos ambientais e socioeconômicos, sendo frequentemente complementado por outros métodos de tomada de decisão. Essas técnicas têm sido empregadas em diversos estudos, como demonstrado por CHUNG; LEE, 2009; LATINOPOULOS *et al.*, 2022; MALEKMOHAMMADI; JAHANISHAKIB, 2017; MARTTUNEN *et al.*, 2017; WANG *et al.*, 2022. O PNUMA (2004), por exemplo, desenvolveu a Metodologia para a Elaboração de Relatórios GEO Cidades, proposta pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente, utilizando o modelo FPEIR em sua análise principal.

Além disso, o método FPEIR tem sido amplamente aplicado em diversas áreas do conhecimento, com um foco especial em políticas públicas e gestão. Por exemplo, PIRRONE *et al.*, (2005) utilizaram-no para identificar soluções políticas, enquanto MANGI *et al.*, (2007) o empregaram para analisar questões socioeconômicas e ambientais em relação às respostas políticas. Outro exemplo é o estudo de KULDNA *et al.*, (2009), que utilizou o FPEIR para estabelecer vínculos entre as políticas públicas e questões de biodiversidade.

O estudo realizado por MARTINS *et al.*, (2012) teve como objetivo aplicar a estrutura FPEIR para integrar indicadores naturais e socioeconômicos na gestão de sistemas pesqueiros. Os pesquisadores buscaram esclarecer a interpretação de cada categoria de indicadores utilizada no FPEIR e propuseram um conjunto específico de indicadores aplicáveis em contextos relacionados à pesca.

BAGORDO *et al.*, (2016) realizaram um estudo bem-sucedido na Grécia utilizando a estrutura FPEIR para identificar fatores ambientais e humanos que influenciam a qualidade das águas subterrâneas, além de propor estratégias para sua preservação. Eles selecionaram 42 indicadores para descrever de forma simplificada as várias componentes de um sistema ambiental complexo, fornecendo informações úteis para a gestão dos recursos hídricos. Os indicadores foram distribuídos da seguinte forma: 11 indicadores para as forças motrizes, 5 para as pressões, 21 para os estados, 2 para os impactos e 3 para as respostas. Esse estudo permitiu formular hipóteses sobre as causas da má qualidade da água e desenvolver estratégias de gestão para abordar os aspectos negativos do estado geral de saúde do aquífero.

LIU *et al.*, (2018) conduziram um estudo sobre a aplicação do FPEIR na avaliação da sustentabilidade de um parque industrial marinho. O experimento destacou que os indicadores de sustentabilidade, combinados com indicadores locais, são eficazes para identificar forças motrizes de desenvolvimento, pressões sobre o meio ambiente e recursos, estado da capacidade de carga ambiental, desenvolvimento econômico e social, impactos no ecossistema e sociedade, e as respostas dos gestores dos parques industriais marinhos. Essa abordagem permitiu identificar as medidas necessárias para promover o desenvolvimento sustentável desse sistema. Em resumo, o estudo demonstrou que a utilização da estrutura FPEIR proporciona uma avaliação abrangente da sustentabilidade de parques industriais marinhos, permitindo entender as interações complexas entre os diversos aspectos envolvidos.

Um exemplo notável de integração de partes interessadas é o estudo realizado por BOELEE *et al.*, (2019), que analisou uma série de problemas de saúde relacionados aos

usuários dos recursos hídricos em uma determinada região. Utilizando a estrutura conceitual FPEIR juntamente com uma revisão seletiva da literatura, o objetivo foi compreender os fatores que impulsionam tais problemas, as pressões exercidas sobre os recursos hídricos, o estado atual desses recursos, os impactos na saúde humana e as respostas adotadas para lidar com essas questões. O estudo demonstrou que o uso do modelo FPEIR, combinado com outras abordagens, contribui para um planejamento sistemático e integrado, além da gestão dos recursos hídricos com foco na saúde humana. Essa abordagem permitiu identificar e avaliar os fatores que afetam a qualidade da água e, conseqüentemente, a saúde das comunidades. Além disso, ajudou a desenvolver medidas preventivas e corretivas para reduzir ou prevenir os impactos negativos e potencializar os benefícios à saúde.

CHUNG; LEE (2009) realizaram um estudo com o objetivo de desenvolver um Índice de Avaliação de Alternativas (AEI) para determinar as prioridades em um contexto de gestão de bacias hidrográficas. Nesse estudo, os critérios de avaliação foram selecionados com base no modelo FPEIR como um conceito de avaliação de sustentabilidade. O AEI desenvolvido considerou a modelagem hidrológica e, adicionalmente, refletiu as demandas dos habitantes locais em relação aos objetivos de gestão das bacias hidrográficas. Essa abordagem proporcionou flexibilidade ao tomador de decisão, permitindo a apresentação de diferentes alternativas e a obtenção do consenso dos residentes em relação às possíveis atividades de planejamento. Em síntese, o estudo de CHUNG; LEE (2009) demonstrou que a utilização do modelo FPEIR, juntamente com a modelagem hidrológica e as técnicas de tomada de decisão multicritério, pode fornecer um índice de avaliação robusto e flexível para a gestão de bacias hidrográficas.

Com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos em áreas úmidas, MALEKMOHAMMADI *et al.*, (2017) apresentaram uma metodologia sistemática que adota uma abordagem socioecológica. Esta abordagem foi aplicada aos serviços ecossistêmicos em larga escala, considerando as vulnerabilidades em áreas úmidas, utilizando a abordagem hidro-geomórfica, estimativas de indicadores de vulnerabilidade e a análise FPEIR. A metodologia proposta foi aplicada à paisagem pantanosa internacional de Choghakhor, localizada no sudoeste do Irã. O modelo FPEIR foi utilizado para identificar as forças motrizes, pressões, estados e impactos relacionados à área úmida em questão. Essas informações foram então incorporadas a um modelo hidro-geomórfico e estimativas de indicadores de vulnerabilidade para avaliar a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos. Com base nessa análise, o modelo FPEIR foi empregado para desenvolver uma estratégia de gestão visando

reduzir a vulnerabilidade dos serviços ecossistêmicos. Isso permitiu identificar medidas e ações necessárias para lidar com as forças motrizes e pressões que impactam negativamente a área úmida, visando melhorar o estado dos serviços ecossistêmicos e mitigar os impactos identificados.

Nesse cenário, o método FPEIR tem ganhado destaque na avaliação de recursos hídricos, abrangendo águas superficiais, subterrâneas e costeiras. Ele tem sido amplamente utilizado para avaliar as pressões sobre esses recursos e a sustentabilidade ecológica associada. O método permite analisar as interações complexas entre os sistemas ambientais e as atividades humanas, proporcionando uma visão abrangente da situação (WANG *et al.*, 2022; AKBAR *et al.*, 2022; ALEXAKIS, 2021; MOSAFFAIE *et al.*, 2021; JIA *et al.*, 2019; BAGORDO *et al.*, 2016; BORJA *et al.*, 2006).

Esses estudos descrevem o método FPEIR como um dos índices mais abrangentes disponíveis, fornecendo detalhes de diversos indicadores que podem influenciar a sustentabilidade das águas. Essa abordagem integrada e holística oferecida pelo método FPEIR tem sido amplamente utilizada para orientar a gestão sustentável dos recursos hídricos, proporcionando informações valiosas para a tomada de decisões embasadas em uma análise abrangente, considerando tanto os aspectos ambientais quanto os socioeconômicos envolvidos na gestão desses recursos.

### 2.3.3 Vantagem na utilização da estrutura FPEIR

No entanto, é importante destacar que o uso do modelo FPEIR não deve ser interpretado como o único meio de orientar a tomada de decisão. O modelo se apresenta simplesmente como um meio de observar e disseminar informações sobre o meio ambiente para avançar em nossa compreensão do comportamento ambiental (AKBAR *et al.*, 2022).

Pesquisas como as de LEWISON *et al.*, (2016) e AKBARI *et al.*, (2021) reforçam em suas análises que o modelo tem sido amplamente aceito e utilizado no estudo e pesquisa sobre segurança hídrica, pois pode revelar onexo causal entre atividades humanas, recursos hídricos, ecologia e desenvolvimento sustentável, sendo aplicável em pesquisas multidisciplinares e interdisciplinares.

ARAÚJO *et al.*, (2019) defendem que a compreensão da causalidade é uma das grandes vantagens do modelo FPEIR, enfatizando que, metodologicamente, a combinação e uso de diferentes métodos em conjunto com o modelo FPEIR criam estruturas interessantes com a capacidade de produzir resultados para apoiar a tomada de decisão, seja na gestão de recursos hídricos ou em outras áreas do conhecimento.

NETO (2013), ao aplicar o FPEIR na gestão ambiental da bacia hidrográfica do Rio Guaribas, Ceará, Brasil, evidencia que o modelo privilegia a análise das relações ecossistêmicas e antropogênicas presentes nos sistemas ambientais da área de estudo. Como resultado de seus esforços, sua pesquisa produziu uma meta-análise dos problemas ambientais em relação às suas causas, incluindo sugestões de ações que poderiam ser incentivadas e desenvolvidas por órgãos da administração pública, sociedade civil, comunidades e setores econômicos.

Em um artigo de revisão de literatura sobre as aplicações da estrutura FPEIR na pesca, MARTINS *et al.*, (2012) esclarecem a interpretação de cada categoria do FPEIR e propõem um conjunto de indicadores que podem ser aplicados em contextos de pesca. Os autores argumentam que a organização dos indicadores de acordo com a estrutura do FPEIR e as dimensões da sustentabilidade (ecológica, econômica, social e governança) é uma contribuição positiva para servir de diretriz em futuras aplicações, adotando indicadores padronizados para melhorar a gestão pesqueira.

PATRÍCIO *et al.*, (2016) afirmam que, embora existam várias estruturas conceituais para descrever as conexões entre as pressões humanas e as mudanças de estado nos ecossistemas marinhos e costeiros, a estrutura FPEIR tem sido amplamente adotada. Eles destacam que a estrutura também possui flexibilidade para ser aplicada em diversos sistemas ambientais, podendo vincular sistemas marinhos e demonstrar a conectividade entre sistemas adjacentes. Por fim, a conclusão do estudo aponta que o uso eficaz do modelo requer a fusão das ciências naturais e sociais, além da cooperação entre cientistas de ambas as áreas, o que demanda abordagens multidisciplinares e transdisciplinares.

SAMPATH *et al.*, (2022), em um estudo focado na análise de longo prazo do manejo de dunas na região da Nova Zelândia, utilizando dois períodos temporais, concluíram que qualquer iniciativa de gestão para controlar os impactos ambientais decorrentes das forças motrizes deve ser abordada com cautela, pois a resposta atual pode gerar novas forças, pressões e impactos negativos ambientais e socioeconômicos no futuro. No entanto, se houver uma compreensão abrangente de uma determinada resposta de gerenciamento para mitigar ou se

adaptar aos impactos ambientais, os danos socioeconômicos e ambientais podem ser minimizados com o uso do modelo.

TSCHERNING *et al.*, (2012) revisaram vários estudos que abordavam principalmente críticas e desvantagens da estrutura FPEIR. Como resultado, os autores concluíram que os estudos que utilizam o FPEIR podem fornecer soluções eficazes para "problemas do mundo real", levando em consideração critérios adicionais baseados na integração do conhecimento, no envolvimento das partes interessadas e na oferta de alternativas. Eles descobriram que a aplicação do FPEIR permite realizar pesquisas relevantes para políticas públicas, pois apoia a explicação e a comunicação dos resultados da pesquisa de maneira acessível e significativa para os tomadores de decisão.

O modelo também tem sido utilizado em políticas de governança, como evidenciado no trabalho de GARI *et al.*, (2018), que desenvolveram um estudo na Colômbia aplicando a metodologia FPEIR com o objetivo de definir respostas políticas compatíveis que permitam o planejamento e a implementação de alternativas de manejo para o uso sustentável dos recursos hídricos. Os autores concluíram que as respostas sociais às pressões sobre os recursos hídricos, como agricultura, mineração e pesca, geraram impactos como entrada de matéria orgânica, sedimentos, nutrientes e contaminantes químicos nos ambientes aquáticos da bacia hidrográfica estudada, além de impactos negativos no bem-estar e perdas econômicas para a população local, resultando em respostas sociais que incluíram protestos, ações legais e mudanças de políticas de governança.

Como destacado por ARAÚJO *et al.*, (2019), a combinação e o uso de diferentes métodos em conjunto com o modelo FPEIR criam estruturas interessantes. Nesse sentido, a presente pesquisa busca reforçar esse entendimento ao combinar o método FPEIR com a análise multicritério TOPSIS, proporcionando uma estrutura robusta para a avaliação ambiental. O FPEIR oferece uma visão sistêmica e organizada, enquanto o TOPSIS classifica de forma precisa os indicadores, facilitando a identificação de prioridades e intervenções eficazes para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

### 2.3.4 Desvantagens na utilização da estrutura FPEIR

Embora o modelo FPEIR tenha sido amplamente utilizado em diversos campos, sua aplicabilidade tem sido limitada devido à seleção inconsistente de indicadores, análise insuficiente das razões para a escolha desses indicadores e falta de clareza no processo de ponderação do índice (GARI *et al.*, 2015). Além disso, o modelo FPEIR é criticado por "simplificar em excesso" a realidade, não considerando diversas interconexões entre recursos e os feedbacks entre eles (NIEMEIJER; DE GROOT, 2008).

Trabalhos científicos como os de AKBAR *et al.*, (2022), WANG *et al.*, (2022), e JIA *et al.*, (2019) destacaram a desvantagem do método FPEIR devido ao intensivo requisito de dados, o que pode ser um desafio para países em desenvolvimento. No entanto, AKBAR *et al.*, (2022) observaram que essa desvantagem pode ser mitigada pela geração de dados com o auxílio de modelagem numérica.

MAXIM *et al.*, (2009) criticaram o modelo pela falta de interconexões e possíveis relações sinérgicas entre as categorias do FPEIR, exemplificando que um impacto específico pode ser causado por várias pressões e pode gerar respostas concomitantes a outros impactos.

Alguns estudos relataram problemas no uso do FPEIR como ferramenta de avaliação da sustentabilidade, argumentando que, por ser construído com base em um conjunto de indicadores estáticos, ele não considera as dinâmicas dos sistemas em questão (CARR *et al.*, 2007; REKOLAINEN *et al.*, 2003; NIEMEIJER; DE GROOT, 2008). Isso leva a conclusões baseadas em cadeias causais unidirecionais e lineares de problemas ambientais, sem fornecer uma compreensão clara das relações de causa e efeito dos problemas ambientais complexos (SVARSTAD *et al.*, 2008). Esses estudiosos também apontam a falta de uma abordagem satisfatória para lidar com as múltiplas dimensões da sustentabilidade (SVARSTAD *et al.*, 2008).

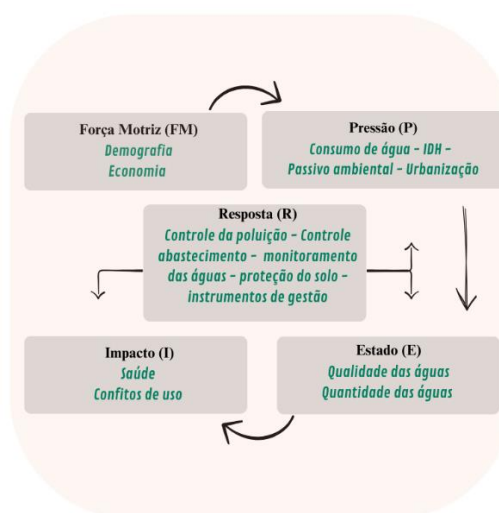
NUNES (2021), em sua pesquisa de mestrado, buscou definir ações prioritárias para a segurança hídrica da bacia hidrográfica do Rio das Contas, na Bahia, e identificou uma desvantagem no uso do método relacionada à falta de aprofundamento nas análises, embora a modelagem conceitual do FPEIR ofereça um sistema simples e estruturado de geração de dados.

### 2.3.5 Indicadores do modelo FPEIR

O modelo FPEIR, consiste na elaboração de uma estrutura que proporciona a compreensão dos problemas e fenômenos urbano-ambientais por meio da identificação e caracterização de indicadores ambientais e suas relações com os diferentes recursos ambientais envolvidos (ar, água, solo, biodiversidade e ambiente construído) (EEA, 1999).

Na aplicação do modelo, os indicadores das dimensões subsequentes devem manter uma relação lógico-causal com o indicador de força motriz, facilitando uma avaliação integrada (**Figura 2**). Essa estrutura possibilita uma compreensão profunda do papel dos indicadores no processo de avaliação do estado do meio ambiente local, incluindo as dinâmicas de degradação, seus múltiplos efeitos e potenciais soluções para os problemas identificados. A seguir, serão delineadas as funções componentes do modelo FPEIR.

**Figura 2: Esquema conceitual dos indicadores FPEIR ajustado para estudo da segurança hídrica da Bacia do Rio Paraopeba.**



(Fonte: EEA, 1999)

O termo "Força Motriz" é frequentemente empregado para descrever os setores socioeconômicos que exercem pressões e influenciam o desenvolvimento da sociedade, buscando fornecer indicadores que descrevam necessidades e motivações socioeconômicas que impulsionam esse desenvolvimento. De acordo com a (EEA, 1999), as forças motrizes englobam a evolução social, demográfica e econômica das sociedades, o padrão de ocupação

do território, bem como as alterações correspondentes nos estilos de vida, níveis globais de consumo e padrões de produção.

Uma aplicação prática dessa abordagem é evidenciada no trabalho de FELINTO *et al.*, (2019), que conduziu um estudo com o modelo FPEIR para analisar questões relacionadas aos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Paraíba em João Pessoa-PB. Nesse estudo, foram selecionadas como forças motrizes "crescimento populacional" e "uso e ocupação do solo" para demonstrar a relevância de se considerar aspectos como desenvolvimento social e econômico na análise de potenciais causas de impactos ambientais. Portanto, ao adotar uma abordagem que considera as forças motrizes, é possível obter uma compreensão mais holística e fundamentada sobre as dinâmicas que impulsionam o desenvolvimento da sociedade e seus efeitos no meio ambiente.

As “Pressões” no modelo FPEIR representam as ações humanas que podem induzir mudanças ambientais. Conforme descrito em MAXIM *et al.*, (2009), os indicadores de pressão estão geralmente relacionados a mudanças indesejadas, sendo aquelas ações humanas com potencial para causar danos e degradação. Em FELINTO *et al.*, (2019), a "demanda por água superficial" e "demanda por água subterrânea" foram consideradas pressões para a gestão de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica do Rio Paraíba. PORTO *et al.*, (2019) consideraram como indicadores de pressão a "demanda por água" segregada por atividade econômica e o "número de outorgas de águas superficiais e subterrâneas", avaliando essas pressões em relação à área total da bacia.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA, 2004) sugere que, para compreender os fatores de pressão, devemos nos questionar "por que isso está acontecendo?". Isso significa que ao fazer essa pergunta, podemos entender como o indicador de pressão se relaciona com as forças econômicas e sociais (Forças Motrizes). Do ponto de vista político, esse indicador é o ponto de partida para abordar os problemas ambientais.

O “Estado” no modelo FPEIR pode se referir ao status dos sistemas naturais, ao status socioeconômico ou a uma combinação de ambos. Os indicadores de estado têm o objetivo de ilustrar as mudanças temporais do sistema estudado. Quando o foco do estudo está nas características de um sistema natural, parâmetros químicos, físicos e biológicos podem ser considerados (EEA, 1999).

Em um estudo realizado por PIRRONE *et al.*, (2005), que aplicou a estrutura FPEIR para lidar com a eutrofização em um rio, foram selecionados indicadores naturais e

socioeconômicos para descrever o estado, incluindo "número de turistas" e "tamanho da população atual". Na pesquisa de FELINTO *et al.*, (2019), foram utilizados os indicadores de "disponibilidade hídrica superficial e subterrânea" com o objetivo de observar o balanço hídrico da bacia hidrográfica em estudo.

Os indicadores de "Impacto" no modelo FPEIR referem-se aos efeitos negativos resultantes da interação dos fatores de força motriz, pressão e estado na economia, subsistência e saúde da população. Esses indicadores podem abranger aspectos tanto ecológicos, quanto socioeconômicos. Um exemplo de abordagem integrada considerando indicadores de impacto ecológico e socioeconômico pode ser encontrado no estudo de PIRRONE *et al.*, (2005), onde são mencionados indicadores como "impacto na saúde" como impactos ao ecossistema. O IPT (2008) considera doenças de vínculo hídrico e os óbitos delas decorrentes como um impacto em relação à segurança hídrica da população.

As "Respostas" no modelo FPEIR referem-se a todas as medidas adotadas pela sociedade com o objetivo de melhorar o estado do sistema. Essas respostas podem ser de natureza preventiva, adaptativa ou corretiva. FELINTO *et al.*, (2019) afirmam que, em resposta às pressões e impactos enfrentados na Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba, em João Pessoa-PB, as autoridades públicas deveriam adotar medidas recomendadas no Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH). Essas medidas incluem a efetivação do Plano Estadual de Recursos Hídricos (PERH), a fiscalização das outorgas de direitos de uso de recursos hídricos, a coleta e tratamento de águas residuais, entre outras ações.

Portanto, os fatores de resposta no modelo FPEIR envolvem as contramedidas adotadas pelos seres humanos para melhorar ou se adaptar ao estado ecológico, refletindo o processo de regulação e gestão ambiental. As respostas incluem principalmente a supervisão do ambiente ecológico, o controle da poluição e os ajustes na indústria.

### **3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

A metodologia desenvolvida neste estudo é baseada em dois pilares principais. Primeiramente, utilizamos o relatório técnico elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2008), que diagnosticou a situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande – SP/MG, utilizando o modelo FPEIR para avaliar a qualidade e

quantidade dos recursos hídricos. Em combinação, incorporamos a abordagem do estudo realizado por YIN; YUAN (2022), no qual os autores desenvolveram uma metodologia para avaliar o desenvolvimento verde da região de Pequim-Tianjin-Hebei no período de 2010 a 2020. Essa avaliação foi baseada no modelo FPEIR-TOPSIS combinado com o método de pesos de entropia. Juntos, esses elementos proporcionam uma abordagem compreensiva e eficaz para entender e gerir os recursos hídricos de maneira sustentável.

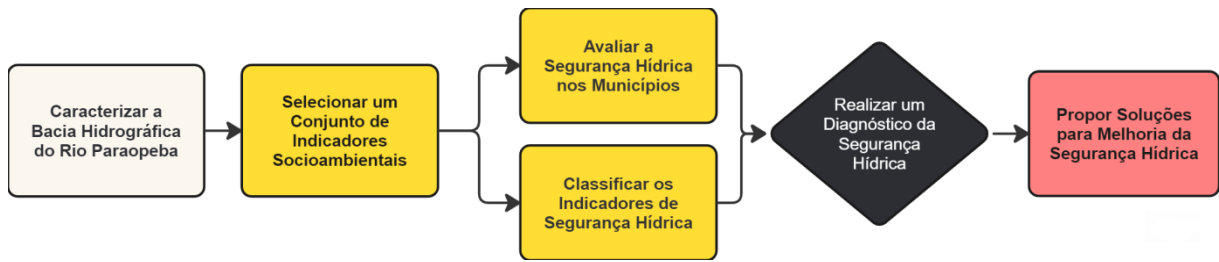
Nesse sentido, espera-se que este estudo contribua para uma melhor compreensão dos fatores que influenciam a segurança hídrica na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba e que forneça uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos. Os indicadores de segurança hídrica propostos poderão ser utilizados por gestores públicos e tomadores de decisão para orientar a formulação de políticas e ações voltadas para a sustentabilidade hídrica na região.

Nesse sentido, o percurso metodológico da pesquisa foi dividido em seis etapas:

1. Caracterizar a Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba;
2. Selecionar um Conjunto de Indicadores Socioambientais de acordo com a literatura;
3. Avaliar e classificar os indicadores selecionados de acordo com sua capacidade de alterar o estado dos recursos hídricos, em termos de quantidade e qualidade, utilizando métodos de análise estatística e análise qualitativa;
4. Aplicar o método TOPSIS para classificar os municípios do médio curso da bacia do Rio Paraopeba em relação à segurança hídrica, considerando os pesos dos indicadores determinados pela entropia;
5. Realizar um Diagnóstico da Segurança Hídrica: Analisar os resultados da classificação para identificar os municípios com melhor e pior desempenho em segurança hídrica, destacando os principais fatores que contribuem para essas posições;
6. Propor Soluções para Melhoria da Segurança Hídrica baseadas em boas práticas de gestão de recursos hídricos, implementação de planos de gestão e monitoramento, e estratégias de participação comunitária, visando à melhoria da segurança hídrica na região.

Essas etapas foram desenvolvidas sequencialmente para compreender a situação dos recursos hídricos na região de estudo e propor abordagens adequadas para lidar com os desafios identificados. Para a representação dos indicadores, foram utilizados o software livre QGIS e planilhas do Microsoft Excel. A **Figura 3** apresenta o percurso metodológico da pesquisa.

**Figura 3: Percurso metodológico da pesquisa.**

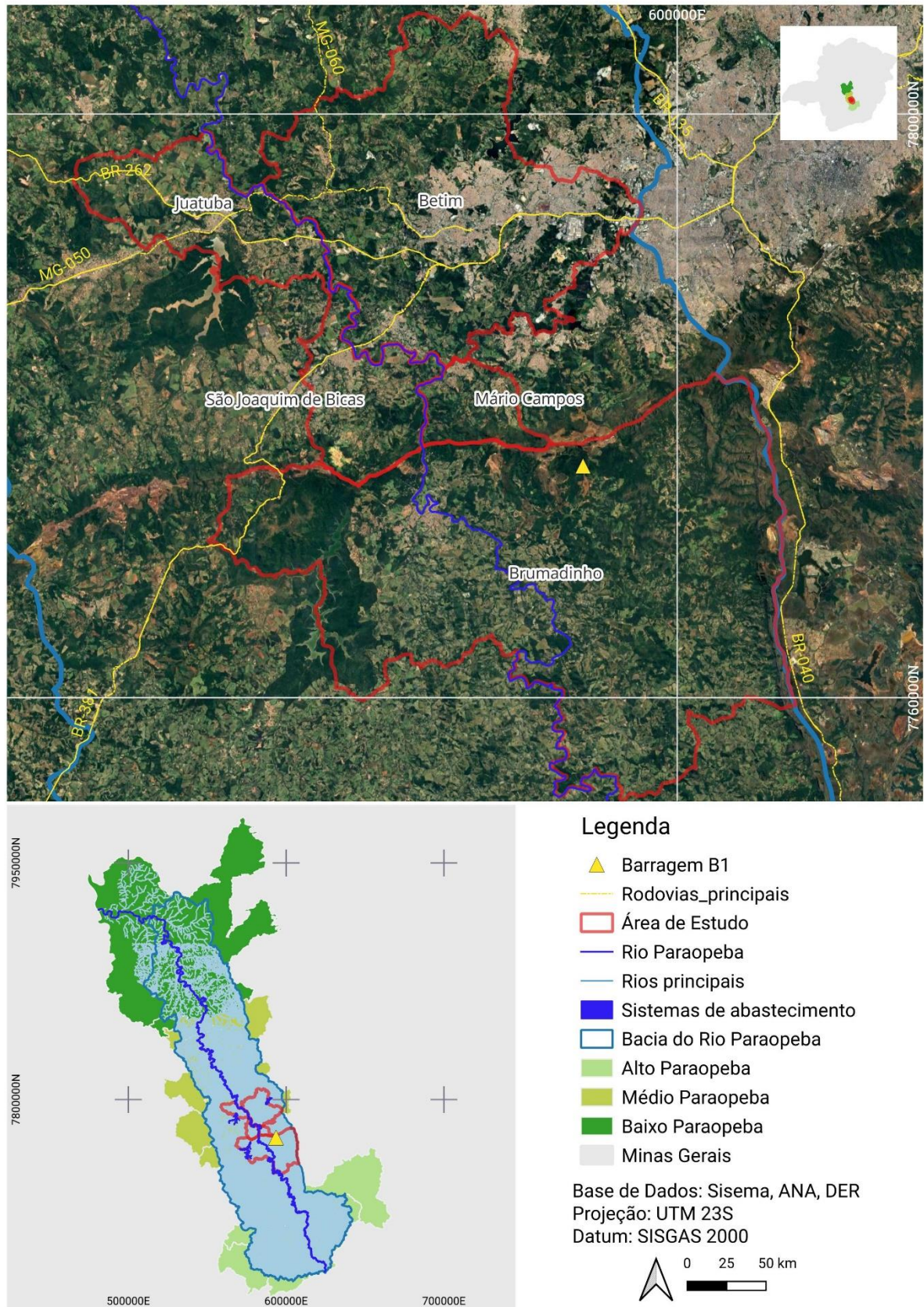


(Fonte: autoria própria, 2024)

### 3.1 Caracterização da área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, situada no alto curso do Rio São Francisco (*Figura 4*), no sudeste de Minas Gerais, é uma região de grande importância ambiental e econômica. Com uma área aproximada de 12.000 km<sup>2</sup>, o que representa cerca de 2,5% do território estadual, a bacia desempenha um papel crucial no abastecimento de água e na sustentabilidade ecológica da região. As nascentes do Rio Paraopeba estão localizadas no município de Cristiano Ottoni, e o rio percorre cerca de 510 km em direção norte-noroeste até sua foz no lago de Três Marias, no município de Felixlândia.

**Figura 4: Mapa de localização da Bacia do Rio Paraopeba.**



(Fonte: autoria própria, 2024)

A região é acessada por importantes rodovias federais e estaduais, incluindo a BR-040, que conecta Minas Gerais aos estados de Goiás e Rio de Janeiro, e a BR-262, que atravessa longitudinalmente a Bacia Hidrográfica e liga o estado a Goiás e ao Espírito Santo. Outras rodovias importantes são a BR-135 e a BR-251, que conduzem à Bahia, além da BR-040 e BR-381 até a BR-116, que levam a São Paulo.

Economicamente, a bacia do Rio Paraopeba é diversificada, destacando-se na mineração, siderurgia, indústria petroquímica e automobilística, produção de bebidas, serviços, geração hidrelétrica, pecuária e agricultura. O parque industrial é bastante desenvolvido, com indústrias de extração de minerais metálicos e não metálicos, produtos metalúrgicos e siderúrgicos, alimentos, têxteis, vestuário, calçados, entre outros (COBRAPE, 2020).

Geologicamente, a bacia é subdividida em três setores: Alto, Médio e Baixo Paraopeba. Cada um desses setores apresenta características particulares em termos de geomorfologia e uso do solo. A atividade minerária, particularmente a exploração de minérios de ferro e manganês, concentra-se na região do Quadrilátero Ferrífero (Médio Paraopeba) e tem impactos significativos na qualidade da água e na vida aquática (COBRAPE, 2020).

Os principais minerais extraídos incluem minérios de ferro e manganês, ardósia, argila e areia. Embora a mineração contribua significativamente para a economia local e estadual, ela também gera preocupações ambientais, especialmente relacionadas à qualidade da água e aos riscos de contaminação por efluentes e rejeitos.

A bacia do Rio Paraopeba desempenha um papel fundamental no abastecimento público de água, sendo responsável por aproximadamente 53% do fornecimento de água para a Região Metropolitana de Belo Horizonte, através dos sistemas Várzea das Flores, Serra Azul e Rio Manso. No entanto, a qualidade das águas da bacia foi severamente comprometida pelo rompimento das barragens da empresa Vale S.A. em janeiro de 2019, resultando em significativas alterações nos parâmetros físico-químicos e biológicos da água e impactando negativamente a vida aquática e as comunidades ribeirinhas (COBRAPE, 2020).

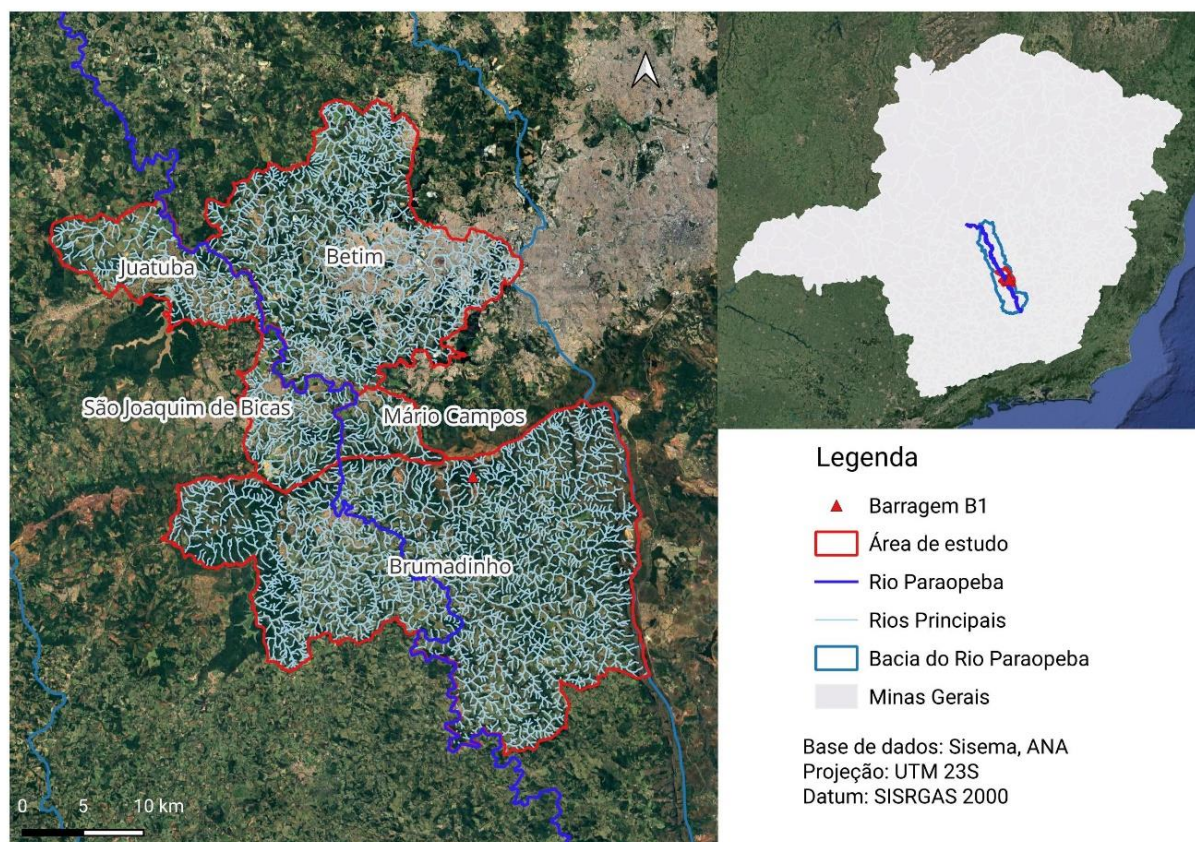
O relatório preliminar sobre a situação de acesso à água nas comunidades da Bacia do Paraopeba, produzido em 2020 pelas assessorias técnicas Associação Estadual de Defesa Ambiental e Social (AEDAS), Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens (NACAB), Instituto Guaicuy e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas), destacou significativos problemas relacionados à qualidade da água na região. As questões identificadas incluem contaminação da água e falhas nas redes de abastecimento local, com a

Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA) e outras operadoras sendo mencionadas como parte dos problemas. Esse relatório aponta uma necessidade crítica de melhorar o acesso à água, com relatos de insuficiência no fornecimento e preocupações recorrentes sobre a qualidade e a quantidade de água disponível, afetando significativamente as comunidades impactadas pelo rompimento da barragem (AEDAS *et al.*, 2020).

Além disso, o boletim informativo de fevereiro de 2024 da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) reforça a recomendação de não utilizar a água bruta do Rio Paraopeba para qualquer fim, até cinco anos após o rompimento da barragem, como medida de prevenção. Essa recomendação abrange o trecho que vai de Brumadinho até o limite da UHE de Retiro Baixo em Pompéu, cobrindo aproximadamente 250 km do rio. A persistência dessa recomendação evidencia a gravidade contínua da contaminação e os riscos associados ao uso da água do rio, afetando diretamente a segurança hídrica das comunidades ao longo desse trecho.

Nesse contexto, a área de estudo concentra-se em cinco municípios localizados no curso médio do Rio Paraopeba: Betim, Brumadinho, Mário Campos, Juatuba e São Joaquim de Bicas (**Figura 5**). Esses municípios foram selecionados devido ao impacto direto ou indireto sofrido pelas consequências do rompimento da barragem B1 e colapso das barragens B4 e B4-A, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, no município de Brumadinho. Este desastre ressaltou a vulnerabilidade da bacia às atividades industriais e de mineração, destacando a necessidade urgente de adotar medidas de gestão e conservação dos recursos hídricos para prevenir futuros impactos ambientais. A seleção desses municípios permite uma análise focada nos locais mais afetados e vulneráveis, facilitando a identificação de estratégias específicas para mitigar os impactos e promover a sustentabilidade hídrica na região.

**Figura 5: Localização da área de estudo.**



(Fonte: autoria própria, 2024)

### 3.2 Aplicando o modelo FPEIR

A seleção de indicadores baseou-se na avaliação do Estado dos recursos hídricos e sua relação com os indicadores de Força Motriz, Pressão, Impacto e Resposta. Os indicadores de Força Motriz e Pressão foram classificados em cinco categorias que representam a capacidade desses elementos de influenciar a condição dos recursos hídricos: Muito Alta, Alta, Média, Baixa e Muito Baixa (**Tabela 1**). Por outro lado, os indicadores de Estado, Impacto e Resposta foram classificados em cinco categorias que descrevem sua condição (Ótima, Boa, Regular, Ruim e Péssima) (**Tabela 2**) conforme a metodologia adotada pelo IPT (2008).

A diferenciação nas escalas se deve à necessidade de capturar diferentes aspectos dos indicadores de forma apropriada. Enquanto os indicadores de Força Motriz e Pressão precisam quantificar a intensidade da influência das atividades humanas, os indicadores de Estado, Impacto e Resposta precisam descrever a condição qualitativa do ambiente e a eficácia das respostas adotadas.

Para ambas as situações, os critérios foram definidos com base nos dados disponíveis para os municípios, considerando os limites máximos e mínimos dos indicadores. Utilizou-se a abordagem de estatística descritiva para criar os intervalos, dividindo os dados em segmentos de tamanho uniforme para gerar distribuições de frequência. Essa técnica, conforme discutido por OWSIŃSKI (2012), é especialmente útil para entender a distribuição dos dados, identificar padrões e visualizar a frequência de ocorrência em diferentes segmentos. Ela facilita a classificação intuitiva e a interpretação dos dados, permitindo uma comparação direta entre diferentes conjuntos de valores. Cada categoria abrange uma faixa específica do intervalo total, garantindo uma distribuição equitativa dos dados e facilitando a identificação de padrões e tendências. Toda a análise foi realizada utilizando planilhas do software Excel.

**Tabela 1: Capacidade dos indicadores de Força Motriz e Pressão.**

| <b>Nome</b>  | <b>Grandeza</b>                            | <b>Unidade</b>       | <b>Muito alta</b>               | <b>Alta</b>                     | <b>Média</b>                   | <b>Baixa</b>                  | <b>Muito baixa</b>          |
|--------------|--|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| <i>FM.01</i> | Taxa geométrica de Crescimento Anual       | % a.a.               | 2,34 - 2,75                     | 1,93 - 2,34                     | 1,51 - 1,93                    | 1,1 - 1,51                    | 0,69 - 1,1                  |
| <i>FM.02</i> | Número de habitantes por km <sup>2</sup>   | hab./km <sup>2</sup> | 970 - 1197                      | 743 - 970                       | 515 - 743                      | 288 - 515                     | 61 - 288                    |
| <i>FM.03</i> | Estabelecimentos agropecuários             | nº                   | 363 - 443                       | 283 - 363                       | 202 - 283                      | 122 - 202                     | 42 - 122                    |
| <i>FM.04</i> | Área Cultivada                             | %                    | 48,6 - 53                       | 47,3 - 48,6                     | 46,1 - 47,3                    | 44,8 - 46,1                   | 43,5 - 44,8                 |
| <i>FM.05</i> | Estabelecimentos industriais               | nº                   | 44 - 52                         | 36 - 44                         | 29 - 36                        | 21 - 29                       | 13 - 21                     |
| <i>FM.06</i> | Exploração mineral                         | nº                   | 251 - 306                       | 196 - 251                       | 142 - 196                      | 87 - 142                      | 32 - 87                     |
| <i>FM.07</i> | Área urbanizada                            | %                    | 22,6 - 27,8                     | 17,3 - 22,6                     | 12,1 - 17,3                    | 6,9 - 12,1                    | 1,6 - 6,9                   |
| <i>P.01</i>  | Quantidade total de água consumida por ano | m <sup>3</sup> /ano  | 207.166.681 - 643.357.167       | 155.850.153 - 207.166.681       | 104.533.626 - 155.850.153      | 53.217.098 - 104.533.626      | 1.900.570 - 53.217.098      |
| <i>P.02</i>  | Quantidade estimada de água tratada        | m <sup>3</sup> /ano  | 15.501.034.848 - 19.155.760.560 | 11.846.309.136 - 15.501.034.848 | 8.191.583.424 - 11.846.309.136 | 4.536.857.712 - 8.191.583.424 | 882.132.000 - 4.536.857.712 |
| <i>P.03</i>  | Quantidade de acidentes ambientais         | nº                   | 19 - 50                         | 14 - 19                         | 9,8 - 14,2                     | 5,4 - 9,8                     | 1 - 5,4                     |
| <i>P.04</i>  | Barragens de rejeito                       | nº                   | 19,2 - 24                       | 14,4 - 19,2                     | 9,6 - 14,4                     | 4,8 - 9,6                     | 0 - 4,8                     |
| <i>P.05</i>  | IDH-M                                      | -                    | 0,800 - 1,00                    | 0,700 - 0,799                   | 0,600 - 0,699                  | 0,500 - 0,599                 | 0,0 - 0,499                 |

(Fonte: autoria própria, 2024)

**Tabela 2: Condição dos indicadores Estado, Impacto e Resposta.**

| <b>Nome</b> | <b>Grandeza</b>                            | <b>Unidade</b> | <b>Ótima</b> | <b>Boa</b>    | <b>Regular</b> | <b>Ruim</b>   | <b>Péssima</b> |
|-------------|--|----------------|--------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| <i>E.01</i> | Média do (IQA)                             | -              | 61,7 - 65,3  | 58,1 - 61,7   | 54,6 - 58,1    | 51 - 54,6     | 47,4 - 51      |
| <i>E.02</i> | Parâmetros alterados conforme DN 08/22     | nº             | 0            | 1 - 2         | 3              | 3 - 4         | 6              |
| <i>E.03</i> | Vazões mínimas (Q <sub>7 10</sub> )        | nº             | 0,96 - 1,68  | 0,77 - 0,96   | 0,59 - 0,77    | 0,405 - 0,503 | 0,21 - 0,4     |
| <i>E.04</i> | Lâmina explotável (LE)                     | mm/ano         | > 77,5       | 70 - 77,5     | 62,5 - 70      | 55 - 62,5     | < 55           |
| <i>I.01</i> | Doenças de veiculação hídrica              | nº             | 2001 - 11908 | 11908 - 21815 | 21815 - 31722  | 31722 - 41629 | 41629 - 125838 |
| <i>I.02</i> | Conflito de uso                            | nº             | 0 - 6,0      | 6,0 - 13,0    | 13,0 - 19,0    | 19 - 25       | 26 - 32        |
| <i>R.01</i> | Domicílios ligados à rede de esgoto        | %              | 64 - 76      | 51 - 64       | 39 - 51        | 26 - 39       | 13 - 26        |
| <i>R.02</i> | Tratamento de esgoto                       | %              | 64 - 76      | 51 - 64       | 39 - 51        | 26 - 39       | 0 - 26         |
| <i>R.03</i> | Coleta seletiva                            | sim/não        | 1            |               |                |               | 0              |
| <i>R.04</i> | Aterro sanitário                           | sim/não        | 1            |               |                |               | 0              |
| <i>R.05</i> | Qtd. de fiscalizações                      | nº             | 1411 - 1721  | 1100 - 1411   | 790 - 1100     | 479 - 790     | 169 - 479      |
| <i>R.06</i> | Domicílios ligados à rede de abastecimento | %              | 94,3 - 97,2  | 91,5 - 94,3   | 88,6 - 91,5    | 85,8 - 88,6   | 82,9 - 85,8    |
| <i>R.07</i> | Percentual das perdas de água              | %              | 31,8 - 37    | 37 - 42,2     | 42,2 - 47,3    | 47,3 - 52,5   | 52,5 - 57,7    |
| <i>R.08</i> | Qtd. de estações de monitoramento          | nº             | 159 - 199    | 119 - 159     | 80 - 119       | 40 - 80       | 0 - 40         |

|             |                                |    |             |             |             |           |           |
|-------------|--------------------------------|----|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| <i>R.09</i> | Qtd. de fluviômetros           | n° | 16- 20      | 12 - 16     | 9 - 12      | 5 - 9     | 1 - 5     |
| <i>R.10</i> | Cobertura vegetal nativa       | %  | 30,8 - 47,4 | 28,9 - 30,8 | 26,9 - 28,9 | 25 - 26,9 | 23 - 25   |
| <i>R.11</i> | Área protegida                 | %  | 16 - 49,2   | 12,1 - 16   | 8,2 - 12,1  | 4,3 - 8,2 | 0,4 - 4,3 |
| <i>R.12</i> | Qtd. de instrumentos de gestão | n° | 6           | 5 - 4       | 3           | 2 - 1     | 0         |

(Fonte: autoria própria, 2024)

### 3.2.1 Indicadores de Força Motriz

Foram selecionados sete indicadores de Força Motriz, os quais são apresentados no **Quadro 1** e na sequência argumentos e justificativas destacando a pertinência e a relevância da escolha destes indicadores para compor o modelo FPEIR na área de estudo.

**Quadro 1: Indicadores de Força Motriz.**

| Nome  | Grandeza   | Unidade              | Referência  |
|---|--|----------------------|---|
| <b>FM.01 Crescimento populacional</b>       | Taxa geométrica de Crescimento Anual - TGCA      | % a.a.               | IPT (2008)<br>FELINTO <i>et al.</i> , (2019)  |
| <b>FM.02 Densidade Demográfica</b>          | Relação número de habitantes por km <sup>2</sup> | hab./km <sup>2</sup> | IPT (2008)<br>LIU <i>et al.</i> , (2018)  |
| <b>FM.03 Estabelecimentos agropecuários</b> | Quantidade de estabelecimentos agropecuários     | n°                   | IPT (2008)<br>PORTO <i>et al.</i> , (2019)  |
| <b>FM.04 Área cultivada</b>                 | Proporção de área ocupada por agricultura        | %                    | IPT (2008)  |
| <b>FM.05 Estabelecimentos Industriais</b>   | Quantidade de estabelecimentos industriais       | n°                   | BOELEEE <i>et al.</i> , (2019)<br>LATINOPOULOS <i>et al.</i> , (2022)<br>Porto <i>et al.</i> , (2019)<br>IPT (2008) |
| <b>FM.06 Exploração mineral</b>             | Quantidade de processos minerários               | n°                   | IPT (2008)  |
| <b>FM.07 Área Urbana</b>                    | Área urbanizada                                  | %                    | IPT (2008)<br>LATINOPOULOS <i>et al.</i> , (2022)<br>MCDONOUGH <i>et al.</i> , (2002)                               |

#### 3.2.1.1 FM.01 – Crescimento populacional

A Taxa de Crescimento Geométrico Anual (TGCA) (**Figura 6**) é uma medida usada para expressar a taxa de crescimento populacional em percentagem ao ano, indicando como a

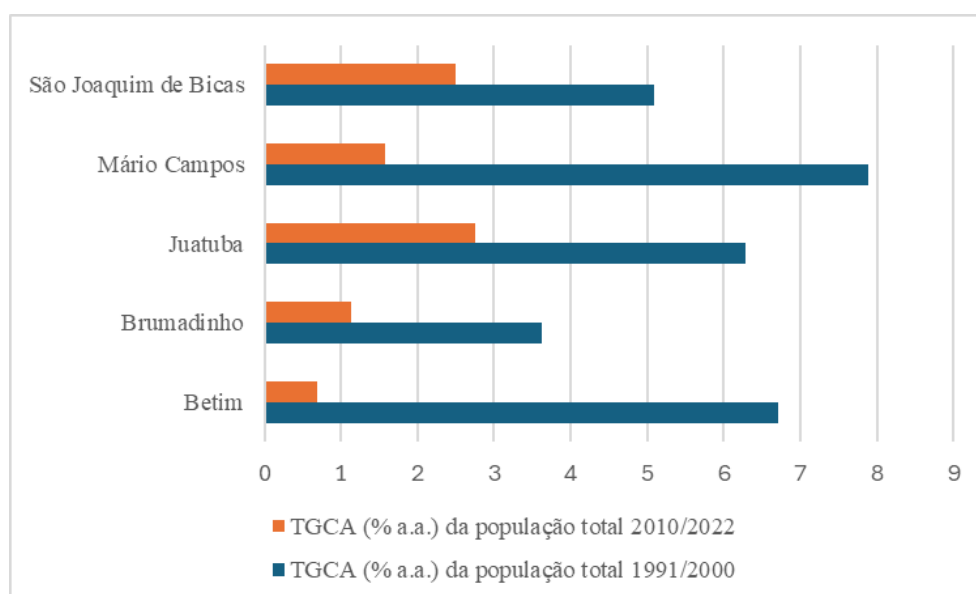
população de uma região está a evoluir ao longo do tempo. Compreender as alterações espaciais e temporais da população é essencial para prever as pressões nos territórios (IPT, 2008; FELINTO *et al.*, (2019). Na **Tabela 3** observa-se a evolução das TGCAs dos municípios.

**Tabela 3: Evolução das TGCAs dos municípios.**

| Municípios           | TGCA (% a.a.) da população total |           |
|----------------------|----------------------------------|-----------|
|                      | 1991/2000                        | 2010/2022 |
| Betim                | 6,71                             | 0,69      |
| Brumadinho           | 3,63                             | 1,14      |
| Juatuba              | 6,29                             | 2,75      |
| Mário Campos         | 7,88                             | 1,57      |
| São Joaquim de Bicas | 5,09                             | 2,50      |

Fonte: IBGE/SIDRA (2024)

**Figura 6: Evolução das TGCAs dos municípios.**



Fonte: IBGE/SIDRA (2024)

### 3.2.1.2 FM.02 – Densidade Demográfica

A densidade demográfica, definida como o número de habitantes por km<sup>2</sup> (**Tabela 4**), desempenha um papel crucial na compreensão do impacto da urbanização em diversas pressões

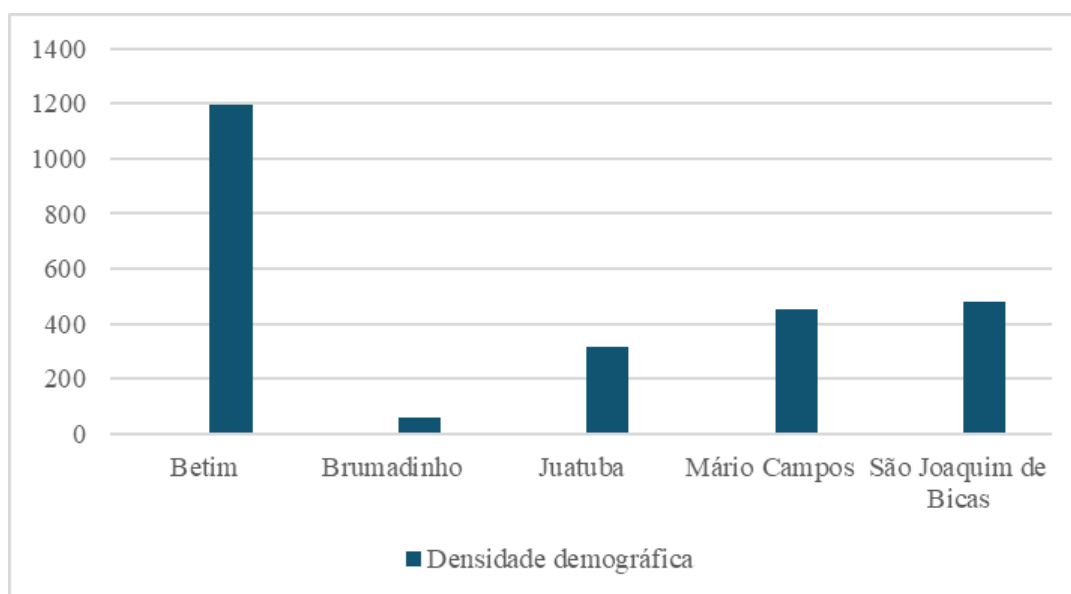
que ocorrem dentro dos municípios, como demonstrado nos estudos de LIU *et al.*, (2018) e IPT (2008). Na **Figura 7** observa-se a relação da densidade demográfica entre os municípios em estudo de acordo com o Censo 2022.

**Tabela 4: Densidade demográfica (hab.km<sup>2</sup>) 2022.**

| Municípios           | População Total | Densidade demográfica |
|----------------------|-----------------|-----------------------|
| Betim                | 411.846         | 1.197,01              |
| Brumadinho           | 38.915          | 60,86                 |
| Juatuba              | 30.716          | 316,60                |
| Mário Campos         | 15.900          | 451,76                |
| São Joaquim de Bicas | 34.348          | 478,66                |

Fonte: IBGE (2022)

**Figura 7: Densidade demográfica dos municípios em estudo.**



Fonte: IBGE (2022)

### 3.2.1.3 FM.03 – Estabelecimentos agropecuários

A agricultura apresenta pressões significativas sobre a qualidade da água através de vários mecanismos, incluindo a salinização em áreas irrigadas, onde a evaporação da água leva à acumulação de sal no solo, reduzindo a produtividade da terra e aumentando a salinidade das águas subterrâneas TUNÇ; KAMAN (2022). Além disso, as atividades agrícolas contribuem

para a poluição da água através do escoamento de pesticidas, nutrientes como nitratos e fosfatos, sedimentos e contaminantes emergentes, impactando a qualidade das águas superficiais e subterrâneas (LAWNICZAK-MALIŃSKA *et al.*, (2023); JADON *et al.*, (2022); VERO *et al.*, 2022).

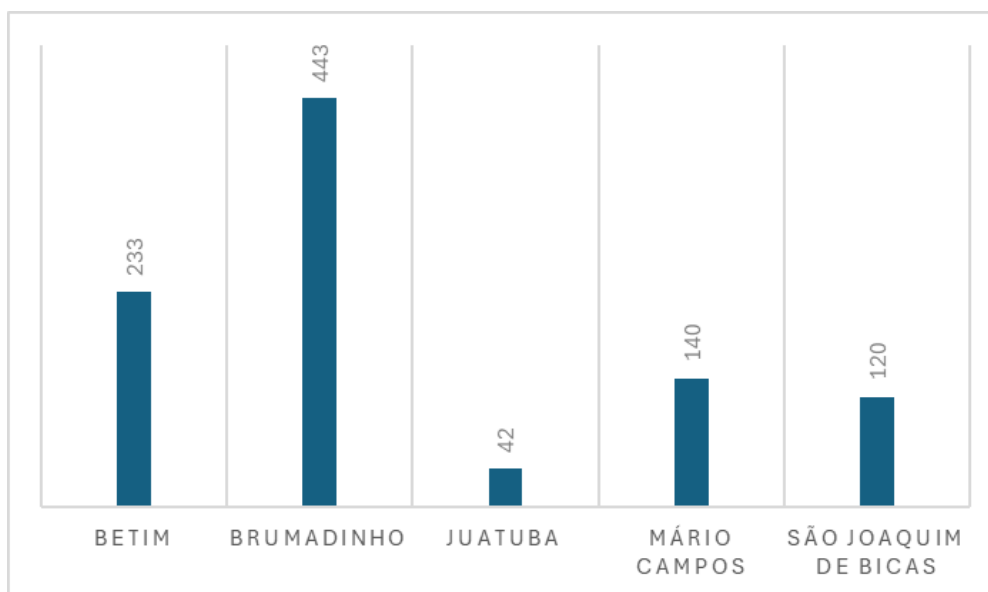
O uso excessivo de fertilizantes e pesticidas nas práticas agrícolas não só contamina o solo, as águas subterrâneas e as águas superficiais com resíduos de metais pesados, mas também introduz patógenos transmitidos pela água de terras agrícolas, levando a problemas de saúde em humanos e animais (MISECKAITE, 2022). No geral, a contaminação agrícola, principalmente de fertilizantes e pesticidas, afeta significativamente a qualidade da água em lagos, lagoas, riachos e outras massas de água, necessitando de práticas agrícolas sustentáveis para mitigar esses impactos prejudiciais.

O indicador estabelecimentos agropecuários é expresso pela quantidade de estabelecimentos agropecuários existentes (nº) (**Tabela 5**). Como força motriz, os estabelecimentos agropecuários impulsionam pressões como a mudanças no uso da terra, práticas de cultivo, e manejo de recursos naturais (IPT, 2008; PORTO *et al.*, 2019). Na **Figura 8** observa-se a porcentagem dos estabelecimentos agropecuários presentes na área em estudo.

**Tabela 5: Estabelecimentos agropecuários.**

| <b>Municípios</b>    | <b>Estabelecimentos agropecuários (nº)</b> |
|----------------------|--|
| Betim                | 233  |
| Brumadinho           | 443  |
| Juatuba              | 42   |
| Mário Campos         | 140  |
| São Joaquim de Bicas | 120  |

**Fonte:** IBGE – Censo 2017

**Figura 8:** Estabelecimentos agropecuários.

Fonte: IBGE – Censo 2017

#### 3.2.1.4 FM.04 – Área cultivada

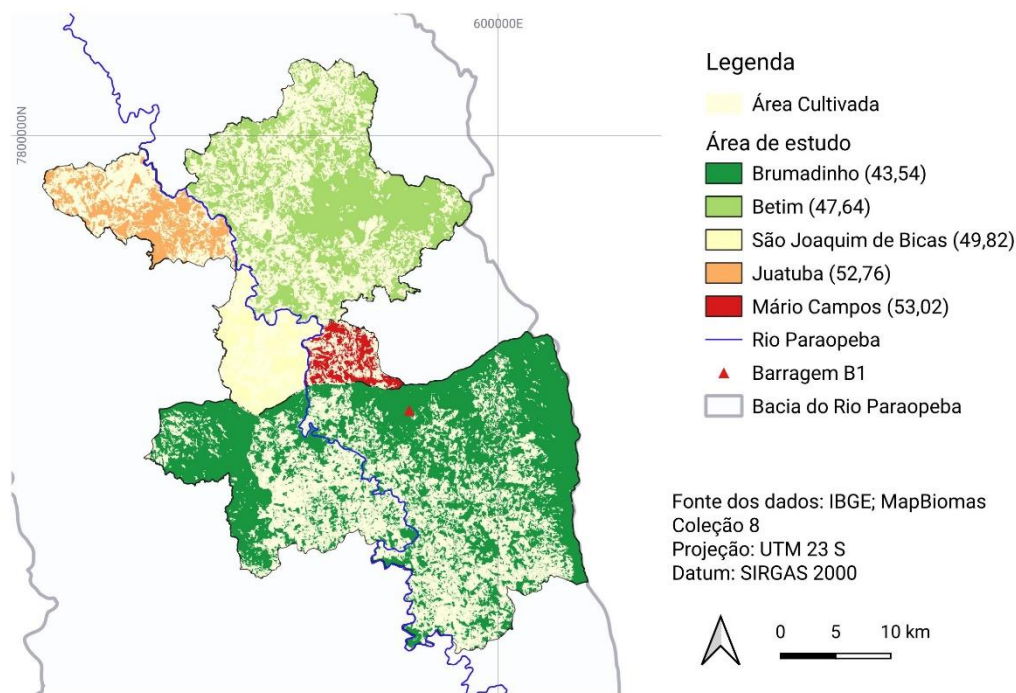
Este indicador é expresso pela proporção de área ocupada por agricultura (%), conforme apresentado na **Tabela 6**, e está diretamente relacionado aos estabelecimentos agropecuários. Entender a proporção de área dentro do município destinada a práticas agrícolas é fundamental para dimensionar as pressões potenciais da atividade agrícola e compreender as técnicas de manejo e utilização do solo (IPT, 2008). A **Figura 9** mostra a localização das áreas cultivadas por município de acordo com dados da coleção 8 do MAPBIOMAS.

**Tabela 6:** Área Cultivada (km<sup>2</sup>).

| Municípios                  | Área Cultivada | Área total | % de área cultivada |
|-----------------------------|----------------|------------|---------------------|
| <b>Betim</b>                | 163,91         | 344,06     | 47,64               |
| <b>Brumadinho</b>           | 278,42         | 639,43     | 43,54               |
| <b>Juatuba</b>              | 51,19          | 97,02      | 52,76               |
| <b>Mário Campos</b>         | 18,98          | 35,80      | 53,02               |
| <b>São Joaquim de Bicas</b> | 35,75          | 71,76      | 49,82               |

Fonte: IBGE, MAPBIOMAS (2022)

**Figura 9: Áreas cultivadas por município.**



(Fonte: IBGE; Mapbiomas, 2022)

### 3.2.1.5 FM.05 – Estabelecimentos Industriais

A quantidade de estabelecimentos industriais em um município é um indicador crucial para entender as pressões relacionadas ao desenvolvimento econômico local, a diversificação da economia e o grau de urbanização (LATINOPOULOS *et al.*, 2022; BOELEE *et al.*, 2019; PORTO *et al.*, 2019; IPT, 2008). A quantificação dos empreendimentos foi levantada com base nos estabelecimentos industriais que possuem licença ambiental emitida e regularizada pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMAD) em Minas Gerais, através do Sistema de Licenciamento Ambiental (SLA) a partir de 2013 até janeiro de 2024 (**Tabela 7**). Na **Figura 10** é apresentada a localização georreferenciada dos estabelecimentos industriais.

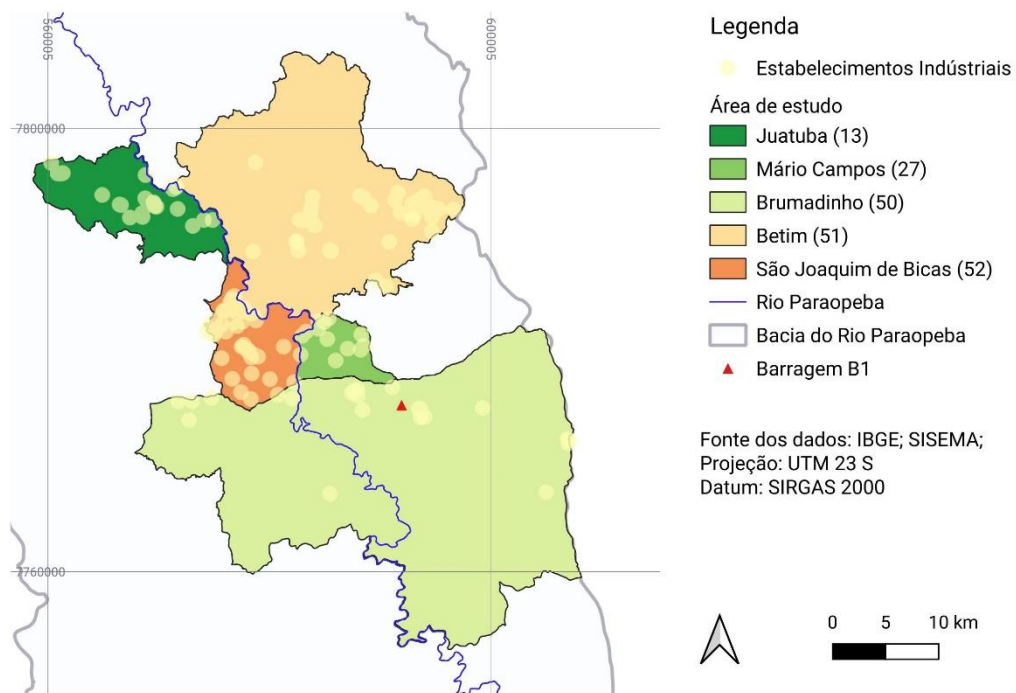
**Tabela 7: Estabelecimentos industriais (2013 a 2024).**

| Municípios | Estabelecimentos industriais (n°) |
|------------|-----------------------------------|
| Betim      | 48                                |

**Tabela 7: Estabelecimentos industriais (2013 a 2024).**

| Municípios           | Estabelecimentos industriais (n°) |
|----------------------|-----------------------------------|
| Brumadinho           | 20                                |
| Juatuba              | 27                                |
| Mário Campos         | 13                                |
| São Joaquim de Bicas | 52                                |

Fonte: SISEMA (2023)

**Figura 10: Localização dos estabelecimentos industriais**

(Fonte: IBGE;SISEMA, 2023)

### 3.2.1.6 FM.06 – Exploração mineral

Esse indicador é representado pela quantidade de processos minerários ativos (n°). Esses processos representam atividades de exploração de minérios em diferentes estágios, como pesquisa, lavra e áreas disponíveis para concessão, conforme apresentado na **Tabela 8**.

As indústrias de mineração têm um impacto significativo na qualidade e disponibilidade da água na região devido à geração de resíduos e rejeitos ricos em sulfetos, que levam à drenagem ácida de minas (PUNIA; SINGH, 2021) e à contaminação por metais pesados

(LOPES *et al.*, 2022; SOARES; VASCO, 2023). Nos municípios em estudo, a exploração mineral possui grande potencial de gerar pressões sobre os recursos hídricos devido ao alto consumo de água (PUTRO; RESPATI, 2023), potencial de contaminação (ZAMZOW; CHAMBERS, 2019), alterações no ciclo hidrológico, competição por recursos (MUDD, 2020) e erosão.

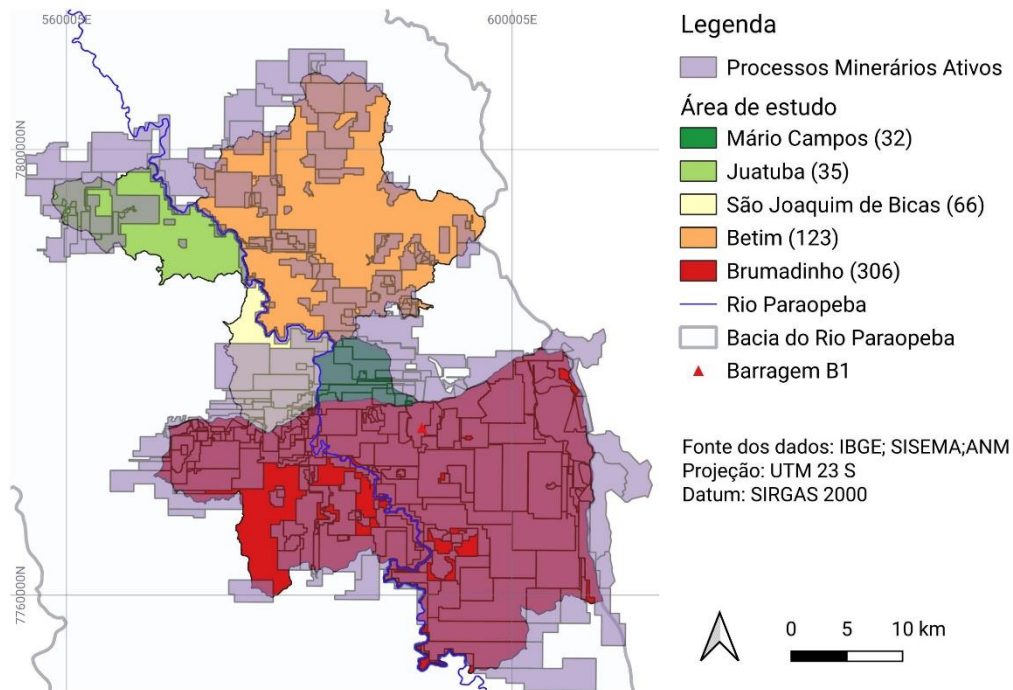
Devido à grande importância da atividade mineradora na área em estudo, este indicador foi selecionado para compor as forças motrizes que atualmente geram pressões na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP). Entre os municípios analisados, um total de 496 processos minerários ativos foram registrados. Esses dados foram coletados com base na representação das poligonais dos processos minerários ativos, incluindo áreas em disponibilidade, mantidas pela Agência Nacional de Mineração, conforme apresentado na **Figura 11**.

**Tabela 8: Processos Minerários Ativos**

| <b>Municípios</b>    | <b>Processos Minerários Ativos (nº)</b> |
|----------------------|---|
| Betim                | 123                                     |
| Brumadinho           | 306                                     |
| Mário Campos         | 32                                      |
| Juatuba              | 35                                      |
| São Joaquim de Bicas | 66                                      |

**Fonte:** ANM (2022)

**Figura 11:** Localização dos Processos Minerários Ativos.



Fonte: ANM (2022)

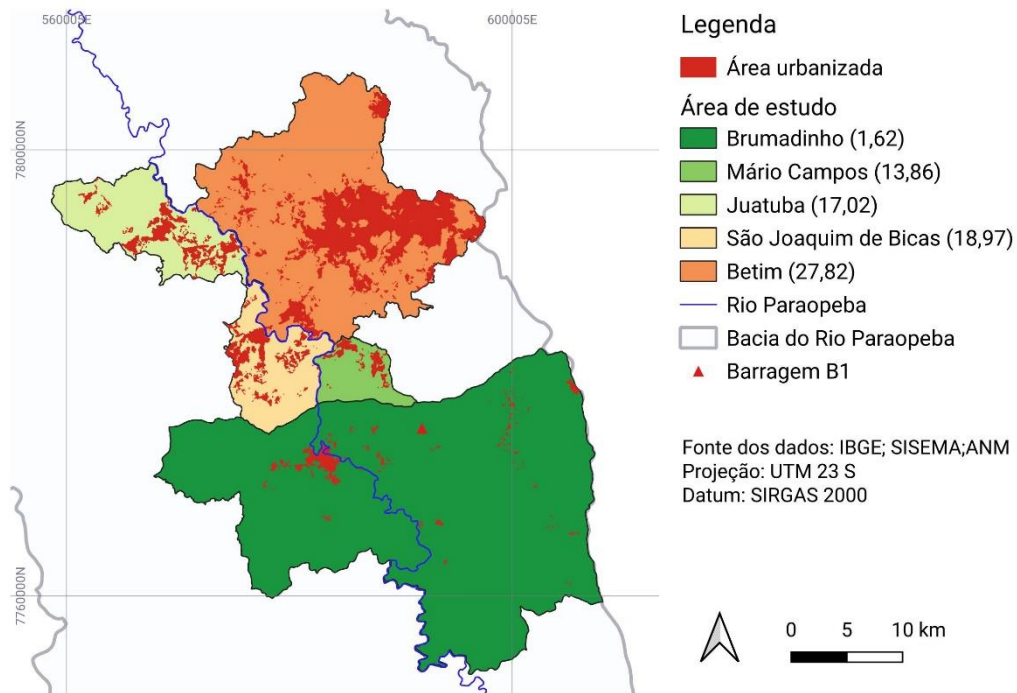
### 3.2.1.7 FM.07 – Área Urbana

A urbanização exerce efetivamente uma pressão substancial sobre os recursos hídricos através de vários mecanismos (LATINOPOULOS *et al.*, 2022; IPT; 2008; MCDONOUGH *et al.*, 2002). Estudos têm demonstrado que a urbanização leva a alterações na hidrologia das bacias hidrográficas, tais como o aumento do escoamento superficial, diminuição do fluxo de água subterrânea e alterações nas taxas de evapotranspiração, impactando a qualidade da água. (WARSI *et al.*, 2022). Além disso, a interação entre a urbanização e os serviços dos ecossistemas hídricos pode resultar em heterogeneidades espaciais e compensações, afetando o rendimento hídrico, a retenção do solo e os processos de purificação da água (JIA *et al.*, 2023). Esse indicador é representado pela porcentagem de área urbana nos municípios, conforme mostra a **Tabela 9**. Na **Figura 12** observa-se a distribuição geográfica das áreas com ocupação urbana, conforme a classificação do MAPBIOMAS (2022) coleção 8.

**Tabela 9: Porcentagem de área urbanizada nos municípios (km<sup>2</sup>).**

| Municípios           | Área Urbana | Área total | % de área urbana |
|----------------------|-------------|------------|------------------|
| Betim                | 95,711      | 344,06     | 27,82            |
| Brumadinho           | 10,35       | 639,43     | 1,62             |
| Juatuba              | 16,512      | 97,02      | 17,02            |
| Mário Campos         | 4,879       | 35,19      | 13,86            |
| São Joaquim de Bicas | 13,612      | 71,76      | 18,97            |

Fonte: MAPBIOMAS (2022)

**Figura 12: Localização da área urbanizada nos municípios.**

Fonte: IBGE; SISEMA 2022)

### 3.2.2 Indicadores de Pressão

Foram selecionados cinco indicadores de Pressão, os quais são apresentados no **Quadro 2** e em seguida destacados os argumentos e justificativas da pertinência e da relevância para a escolha destes indicadores na composição do modelo FPEIR da área de estudo.

**Quadro 2: Indicadores de Pressão.**

| <b>Nome</b>                         | <b>Grandeza</b>  | <b>Unidade</b>      | <b>Referência</b>  |
|-------------------------------------|--|---------------------|--|
| <b>P.01 Demanda de água</b>         | Quantidade total de água consumida por ano                                 | m <sup>3</sup> /ano | IPT (2008)<br>MENDES (2022)<br>FELINTO <i>et al.</i> , (2019)                |
| <b>P.02 Demanda de água tratada</b> | Quantidade estimada de água tratada necessária para consumo humano por ano | m <sup>3</sup> /ano | IPT (2008)   |
| <b>P.03 Acidentes ambientais</b>    | Quantidade de acidentes ambientais   | n <sup>o</sup>      | IPT (2008)<br>FELINTO <i>et al.</i> , (2019)<br>PORTO <i>et al.</i> , (2019) |
| <b>P.04 Barragens de mineração</b>  | Quantidade de barragens  | n <sup>o</sup>      | -  |
| <b>P.05 Desenvolvimento humano</b>  | Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM)                          | -                   | IPT (2008)   |

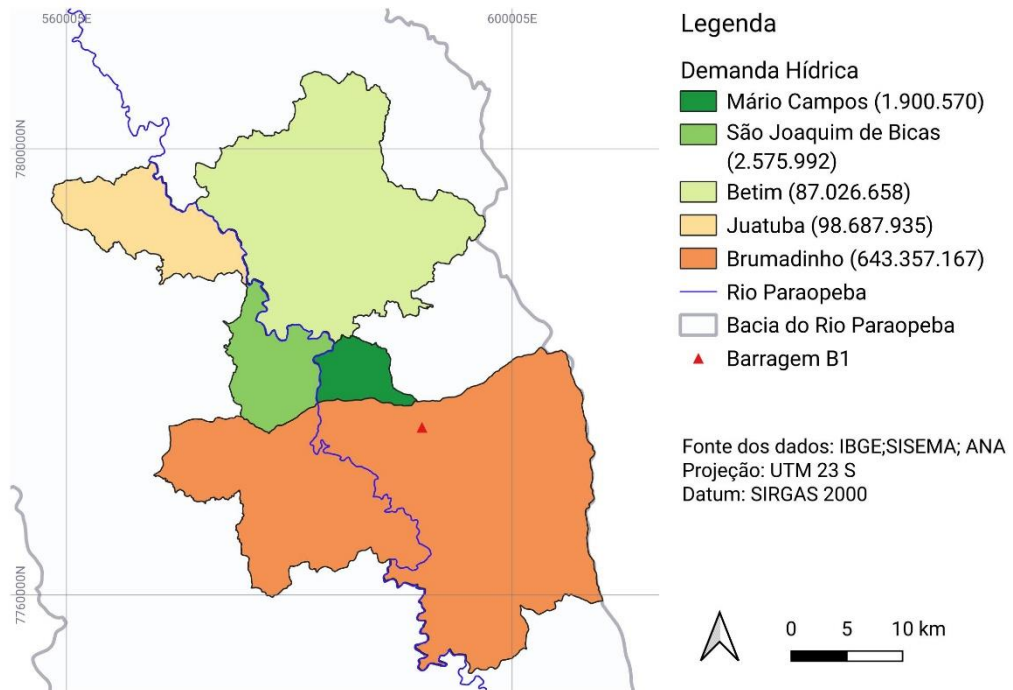
### 3.2.2.1 P.01 – Demanda de água

Esse indicador é expresso pela quantidade de água consumida por ano (m<sup>3</sup>/ano), abrangendo todos os usuários, incluindo abastecimento público, uso industrial, irrigação, mineração, dessedentação animal e outros usos, conforme a **Tabela 10**. A alta demanda por água impõe pressões significativas sobre os recursos hídricos, reduzindo a disponibilidade, afetando a qualidade da água e exacerbando conflitos entre diferentes setores (MENDES, 2022; FELINTO *et al.*, 2019; IPT, 2008).

O Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) fornece esses dados com base nos volumes outorgados, oferecendo uma perspectiva do consumo de água em diferentes setores e atividades. Os dados disponíveis revelam que as demandas por água nos municípios analisados

apresentam uma variação significativa tanto em termos de volume quanto de tipos de uso, evidenciando a diversidade de necessidades e atividades dependentes dos recursos hídricos locais, conforme ilustrado na **Figura 13**.

**Figura 13: Demanda de água (m<sup>3</sup>/ano).**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022)

Tabela 10: Estimativas de demanda de água, por setor usuário, por município (m<sup>3</sup>/ano).

| Demanda total de água (m <sup>3</sup> /ano) |                       |            |                      |      |           |          |           |          |           |          |          |          |             |
|---|-----------------------|------------|----------------------|------|-----------|----------|-----------|----------|-----------|----------|----------|----------|-------------|
| Tipo de uso                                 | Abastecimento Público |            | Dessedentação Animal |      | Indústria |          | Irrigação |          | Mineração |          | Outros   |          | Total Geral |
| Município                                   | Sub.                  | Sup.       | Sub.                 | Sup. | Sub.      | Sup.     | Sub.      | Sup.     | Sub.      | Sup.     | Sub.     | Sup.     |             |
| Betim                                       | 6059353,3             | 7537104,0  | 142866,8             | -    | 257542,2  | 438      | 281196    | 126144   | 133896,6  | 164302,6 | 746176,8 | 22075,2  | 87.026.658  |
| Brumadinho                                  | 7270510,9             | 6252296,17 | 308790               | -    | 110165,8  | 11983,68 | 500020,8  | 463579,2 | 475930,8  | 152098,1 | 371091,1 | 15768,00 | 643.357.167 |
| Juatuba                                     | 775260                | -          | 14892                | -    | 415749,6  | -        | 582540    | -        | -         | -        | 49056    | 63072    | 1.900.570   |
| Mário Campos                                | 2564314,8             | 9271584,0  | 129648               | -    | 43800     | 18921,60 | 123340,8  | 102113,6 | -         | 138127,7 | 59568    | -        | 98.687.935  |
| São Joaquim de Bicas                        | 907527,24             | -          | 451140               | -    | 323244    | -        | 128421,6  | 599184   | -         | 75371,04 | 91104    | -        | 2.575.992   |

Fonte: IGAM, 2024

### 3.2.2.2 P.02 – Demanda de água tratada

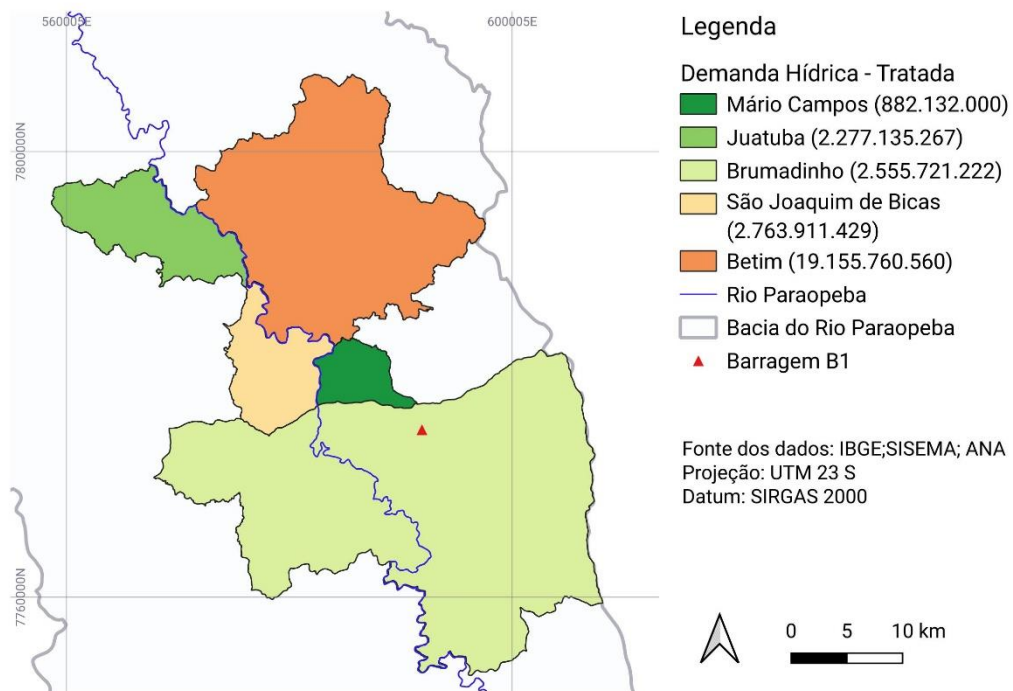
A alta demanda por água tratada exerce pressão sobre os recursos hídricos, reduzindo a disponibilidade e afetando a sustentabilidade hídrica a longo prazo (IPT, 2008). Esse indicador é expresso na quantidade estimada de água tratada, necessária para consumo humano da população do município por ano ( $m^3/ano$ ) (**Tabela 11**). É obtido multiplicando-se o consumo per capita diário de água pelo número de dias no ano e pelo total de habitantes do município em estudo. Para encontrar o consumo per capita diário foram utilizados os dados consistidos e compilados pela SEMAD para o Panorama de Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário em 2020. A **Figura 14** ilustra o contraste das demandas por município.

**Tabela 11: Demanda de água tratada ( $m^3/ano$ ) em 2020.**

| Municípios           | População total | Consumo Per Capita ( $m^3/dia$ ) | Consumo Per Capita ( $m^3/ano$ ) | Demanda de água tratada |
|----------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------|
| Betim                | 411.846         | 127,43                           | 46.512                           | 19.155.760.560          |
| Brumadinho           | 38.915          | 179,93                           | 65.674                           | 2.555.721.222           |
| Juatuba              | 30.716          | 203,11                           | 74.135                           | 2.277.135.267           |
| Mário Campos         | 15.900          | 152                              | 55.480                           | 882.132.000             |
| São Joaquim de Bicas | 34.348          | 220,46                           | 80.468                           | 2.763.911.429           |

Fonte: IGAM, 2024

**Figura 14: Demanda de água tratada (m<sup>3</sup>/ano) em 2020.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022)

### 3.2.2.3 P.03 – Acidentes Ambientais

Os acidentes ambientais, como derrames de produtos químicos e fugas de substâncias tóxicas, representam uma grave ameaça aos recursos hídricos, particularmente em regiões com elevada densidade industrial e minerária (FELINTO *et al.*, 2019; PORTO *et al.*, 2019; IPT, 2008).

Estudos enfatizam a importância da adoção de mecanismos para controlar e remediar impactos de elementos potencialmente tóxicos (TEP) introduzidos por atividades industriais (SOUZA *et al.*, 2021). Estes acidentes não só prejudicam o ambiente, mas também acarretam custos financeiros e prejuízos para a reputação das empresas envolvidas.

Os incidentes industriais desde os anos setenta têm sublinhado a importância dos sistemas de prevenção e do desenvolvimento de tecnologia para antecipar perigos e acelerar a resolução de problemas. Observa-se que a recuperação de cursos de água no Brasil após contaminação tem sido um ponto focal de vários estudos. Pesquisa na região do Rio Doce registrou recuperação após o rompimento da Barragem do Fundão, com melhorias na qualidade da água variando por parâmetro e região, indicando durações de recuperação bem-sucedidas (WILD *et al.*, 2023). Em

São Paulo, métodos não convencionais levaram à melhoria da qualidade da água no Ribeirão das Olarias, demonstrando sucesso na reabilitação de bacias hidrográficas através da redução dos níveis de Demanda Bioquímica de Oxigênio (LIMA *et al.*, 2016). Contudo, um estudo desenvolvido por BORDON *et al.*, (2023) levantou preocupações sobre a recuperação ambiental da Bacia do Rio Paraopeba após o rompimento da barragem do Córrego do Feijão em 2019. O estudo destaca a necessidade de monitoramento contínuo dos parâmetros biológicos, abióticos e físico-químicos para avaliar a recuperação ambiental a longo prazo, sugerindo que o processo pode se estender ao longo de vários anos.

Este indicador expressa a quantidade de acidentes ambientais ocorridos nos municípios, conforme apresenta a **Tabela 12**. Os dados fazem parte da base de ocorrências comunicadas ao Núcleo de Emergência Ambiental (NEA) do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SISEMA). O setor, existente desde 2003, trabalha na prevenção e controle dos acidentes ambientais registrados em Minas Gerais.

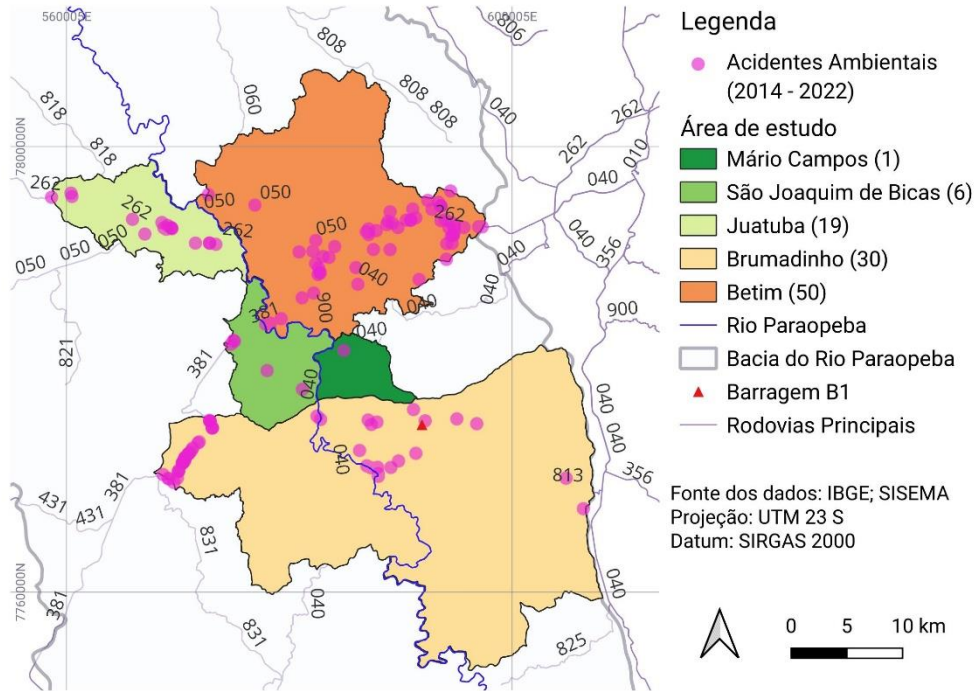
Os dados obtidos indicam a ocorrência de 108 acidentes ambientais, nos municípios em estudo, identificadas no período de 2014 a 2022, como ilustra a **Figura 15**. OS principais tipos de acidentes que ocorreram no período analisado foram explosões, incêndios, colisões e tombamentos de veículos de carga, descarrilamentos de composições ferroviárias de carga, vazamentos de substâncias químicas e derramamentos de produtos e resíduos perigosos, além do rompimento de barragens de água, de resíduos industriais e de rejeitos de mineração. Outras causas de acidentes ambientais incluem a disposição inadequada e os descartes clandestinos de resíduos e produtos químicos perigosos, bem como o rompimento de dutos que transportam produtos químicos e resíduos industriais e minerários.

**Tabela 12: Quantidade de acidentes ambientais (2014-2022).**

| Municípios           | Total de acidentes ambientais (nº) |
|----------------------|------------------------------------|
| Betim                | 50                                 |
| Brumadinho           | 30                                 |
| Juatuba              | 19                                 |
| Mário Campos         | 1                                  |
| São Joaquim de Bicas | 6                                  |

Fonte: FEAM, 2020

**Figura 15: Localização dos acidentes ambientais (2014-2022).**



Fonte: FEAM; SISEMA 2020)

#### 3.2.2.4 P.04 – Barragens de mineração

Esse indicador foi selecionado para ajudar a entender como a mineração, uma atividade econômica significativa, influencia o meio ambiente e a sociedade. Ele é representado pela quantidade de barragens contendo sedimentos e rejeitos de mineração (nº), conforme a **Tabela 13**. Minas Gerais tem um grande número de barragens de mineração em alto risco de rompimento, o que demonstra como esse indicador exerce uma forte pressão sobre o território. Além disso, essas barragens representam uma ameaça significativa à segurança hídrica, podendo contaminar cursos d'água e comprometer a disponibilidade de água potável. A **Figura 16** apresenta a localização das barragens na área de estudo.

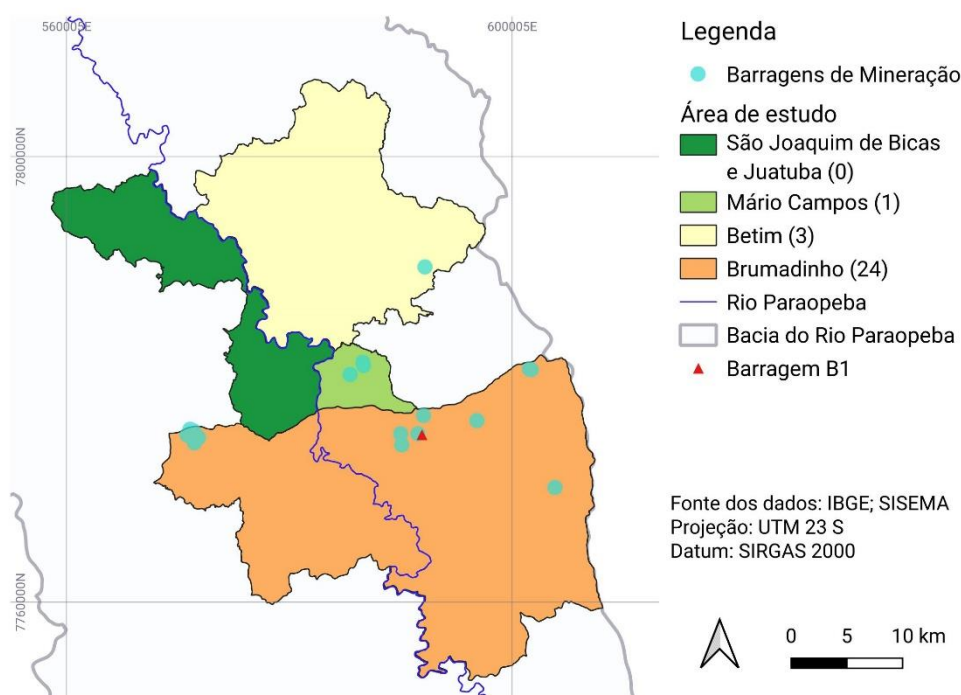
**Tabela 13: Quantidade de Barragens de Mineração.**

| Municípios | Barragens de mineração (nº) |
|------------|-----------------------------|
| Betim      | 3                           |
| Brumadinho | 24                          |
| Juatuba    | 0                           |

**Tabela 13: Quantidade de Barragens de Mineração.**

| Municípios           | Barragens de mineração (nº) |
|----------------------|-----------------------------|
| Mário Campos         | 3                           |
| São Joaquim de Bicas | 0                           |

Fonte: ANM, 2023

**Figura 16: Quantidade de Barragens de Mineração**

Fonte: IBGE; SISEMA 2022)

### 3.2.2.5 P.05 – Desenvolvimento Humano

O Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDH-M) é um indicador composto que mede o desenvolvimento humano em municípios, considerando aspectos como longevidade, educação e renda. Embora o IDH-M seja um indicador positivo de desenvolvimento socioeconômico e esteja frequentemente relacionado a melhorias na infraestrutura de saneamento básico, isso pode mitigar alguns dos impactos negativos no meio ambiente, mas também requer investimentos contínuos para acompanhar o crescimento populacional e industrial (URZÚA; VILBERT, 2023). O crescimento econômico, a

urbanização e a industrialização, geralmente associados a um IDH-M mais alto, podem intensificar pressões em relação ao uso e a poluição da água (IPT, 2008). Esse indicador é expresso pelo Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM), conforme apresenta a **Tabela 14**.

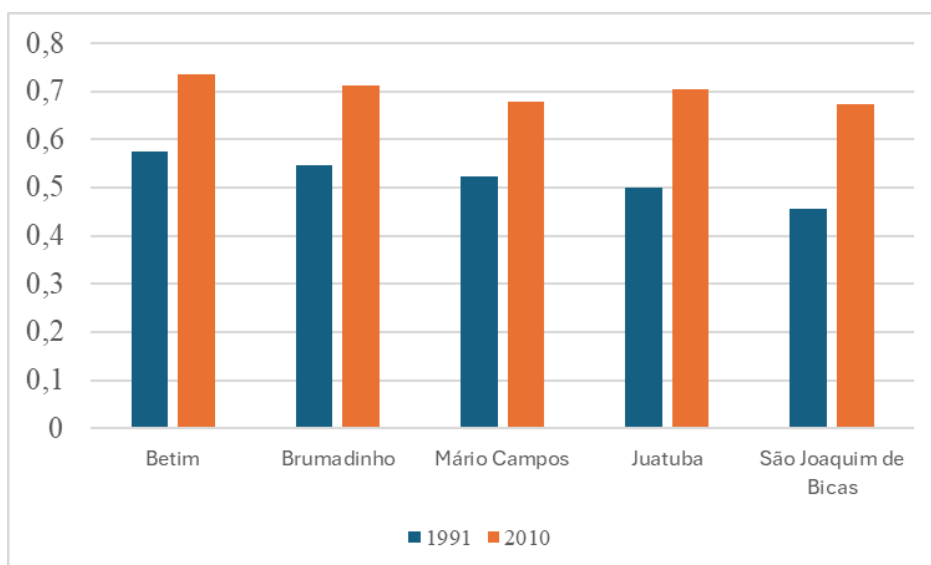
Analisando os dados dos anos de 1991 e 2010, verifica-se que, de forma geral, todos os municípios apresentaram incrementos no desenvolvimento humano ao longo dos dezenove anos, como ilustra a **Figura 17**. Esses valores ilustram a evolução do IDH em cada município no período analisado, refletindo melhorias significativas em áreas como educação, renda e longevidade.

**Tabela 14: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal.**

| Municípios           | IDHM  |       |
|----------------------|-------|-------|
|                      | 1991  | 2010  |
| Betim                | 0,575 | 0,735 |
| Brumadinho           | 0,546 | 0,712 |
| Mário Campos         | 0,522 | 0,678 |
| Juatuba              | 0,499 | 0,705 |
| São Joaquim de Bicas | 0,457 | 0,674 |

Fonte: IBGE, 2024

**Figura 17: Evolução do IDH-M nos municípios.**



(Fonte: autoria própria, 2024)

### 3.2.3 Indicadores de Estado

Foram selecionados quatro indicadores de Estado, os quais são apresentados no **Quadro 3** e em seguida destacados os argumentos e justificativas da pertinência e da relevância para a escolha destes indicadores na composição do modelo FPEIR da área de estudo.

**Quadro 3: Indicadores de Estado.**

| Nome  | Grandeza   | Unidade           | Referência  |
|---|--|-------------------|---|
| <b>E.01 Qualidade das águas superficiais</b>                    | Média dos valores do Índice de Qualidade da Água (IQA) dos cursos d'água do município      | -                 | IPT (2008)<br>MENDES (2022)<br>PORTO <i>et al.</i> , (2019)   |
| <b>E.02 Qualidade da água no rio Paraopeba</b>                  | Quantidade de pontos em conformidade e não conformidade para os parâmetros analisados      | n°                | IPT (2008)  |
| <b>E.03 Disponibilidade hídrica superficial</b>                 | Média das vazões dos cursos d'água do município (Q <sub>7 10</sub> )                       | m <sup>3</sup> /s | IPT (2008)<br>MENDES (2022)<br>FELINTO <i>et al.</i> , (2019) |
| <b>E.04 Vulnerabilidade hídrica natural da água subterrânea</b> | Disponibilidade natural de água subterrânea foi estimada com base nas reservas exploráveis | mm/ano            | IPT (2008)  |

#### 3.2.3.1 E.01 – Qualidade das águas superficiais

O Índice de Qualidade da Água (IQA) é crucial para a segurança hídrica, refletindo a qualidade da água para diversos usos. Ele avalia múltiplos parâmetros, essencial para a gestão eficaz de recursos hídricos e políticas públicas. Um IQA elevado indica menor risco à saúde pública e suporte ao desenvolvimento sustentável (IPT, 2008; MENDES, 2022; PORTO *et al.*, 2019). Assim, a média do IQA monitorada pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) em 2021 (**Tabela 15**) é um indicador vital para assegurar segurança hídrica e guiar intervenções

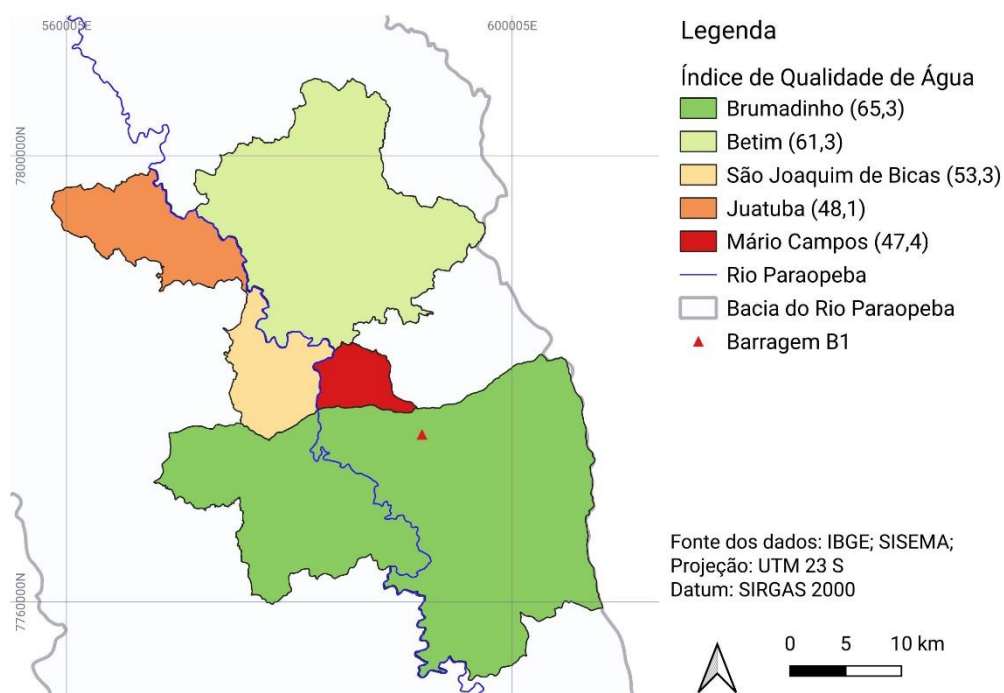
necessárias. Este indicador pode ser representado pela média dos valores do Índice de Qualidade da Água (IQA) dos pontos monitorados pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (IGAM) em 2021, conforme apresenta a **Figura 18**.

**Tabela 15: Índice de Qualidade da Água - 2021.**

| Municípios           | IQA  |
|----------------------|------|
| Betim                | 61,3 |
| Brumadinho           | 65,3 |
| Mário Campos         | 47,4 |
| Juatuba              | 48,1 |
| São Joaquim de Bicas | 53,3 |

Fonte: IGAM, 2021

**Figura 18: Índice de Qualidade das Águas (IQA).**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.3.2 E.02 – Qualidade da água no Rio Paraopeba

O Rio Paraopeba é fonte de abastecimento de água para consumo humano em diversas cidades que estão contidas dentro da bacia. Com rompimento da barragem do córrego do Feijão o IGAM reforçou que em 2024, ainda se mantém a recomendação de não utilização da água bruta do Rio Paraopeba para qualquer fim, como medida prevenção, no trecho que abrange os municípios de Brumadinho até o limite da UHE de Retiro Baixo em Pompéu (aproximadamente 250 km de distância do rompimento). Contudo, não há restrição de uso da água bruta nos trechos que estão antes do município de Brumadinho (antes do trecho afetado pelo rompimento) e depois da UHE Retiro Baixo.

O consumo de água em desconformidade aos padrões que asseguram sua potabilidade pode provocar o adoecimento de indivíduos e surtos de doenças e agravos de transmissão hídrica, pois a água pode veicular substâncias químicas e agentes biológicos nocivos à saúde.

A seguir serão apresentados os pontos de monitoramento e os dados de monitorados a partir do boletim informativo do cidadão da Fundação Estadual de meio Ambiente (FEAM, 2024) de acordo com a Deliberação Norma Conjunta Copam/CERH-MG nº 08/2022 (DN 08/22) sobre os limites legais estabelecidos para Classe 2 (**Tabela 16**). Os parâmetros em vermelho indicam que os limites estabelecidos pela DN 08/22 para as substâncias analisadas foram excedidos, enquanto os parâmetros em azul mostram que as substâncias estão dentro dos níveis esperados.

**Tabela 16: Estações monitoradas que apresentaram parâmetros em conformidade e sem conformidade para resultados de fevereiro de 2024.**

| Municípios           | Pontos | Parâmetros |        |        |     |        |        |       |
|----------------------|--------|------------|--------|--------|-----|--------|--------|-------|
|                      |        | Al -D      | Pb - T | Hg - T | NTU | Mn - T | Fe - T | Fe -D |
| Betim                | BP072  | Red        | Blue   | Blue   | Red | Red    | Red    | Red   |
| Brumadinho           | *BP093 | Blue       | Blue   | Blue   | Red | Red    | Red    | Blue  |
| Mário Campos         | BP068  | Red        | Blue   | Blue   | Red | Red    | Red    | Blue  |
| Juatuba              | **     | **         | **     | **     | **  | **     | **     | **    |
| São Joaquim de Bicas | BP070  | Red        | Blue   | Blue   | Red | Red    | Red    | Red   |

Fonte: FEAM, 2024 Legenda: Vermelho – Violação; Azul – Sem violação. \* BP093 – depois da barragem  
\*\*sem ponto de monitoramento;

Foram observados 7 parâmetros, entre eles estão o alumínio dissolvido (Al -D); chumbo total (Pb – T); mercúrio total (Hg – T); turbidez (NTU); manganês (Mn – T); ferro total (Fe – T); ferro dissolvido (Fe -D). Conforme a **Tabela 17**.

**Tabela 17: Quantidade de parâmetros alterados conforme DN 08/22.**

| Municípios           | Parâmetros alterados conforme DN 08/22 |
|----------------------|--|
| Betim                | 2                                      |
| Brumadinho           | 4                                      |
| Mário Campos         | **                                     |
| Juatuba              | 2                                      |
| São Joaquim de Bicas | 3                                      |

Fonte: FEAM, 2024 \*\* sem dados

### 3.2.3.3 E.03 – Disponibilidade hídrica superficial

A disponibilidade hídrica total superficial, obtida pela média das vazões mínimas de sete dias com período de retorno de 10 anos (Q7 10) medidas pelo IGAM (2024) (**Tabela 18**), reflete a capacidade dos rios e córregos em fornecer água, mesmo em períodos de baixa pluviosidade. A informação foi coletada da base digital vetorial geoespacial representando a localização pontual das outorgas vigentes no período de 01/1989 até 02/04/2024 em Minas Gerais.

Esse indicador é essencial para entender a resiliência hídrica das microbacias e apoiar a gestão sustentável dos recursos hídricos em cada município, garantindo abastecimento adequado e planejamento de uso da água para diversas atividades (IPT, 2008; MENDES, 2022; FELINTO *et al.*, 2019). A **Figura 19** ilustra as diferenças de disponibilidade entre os municípios analisados.

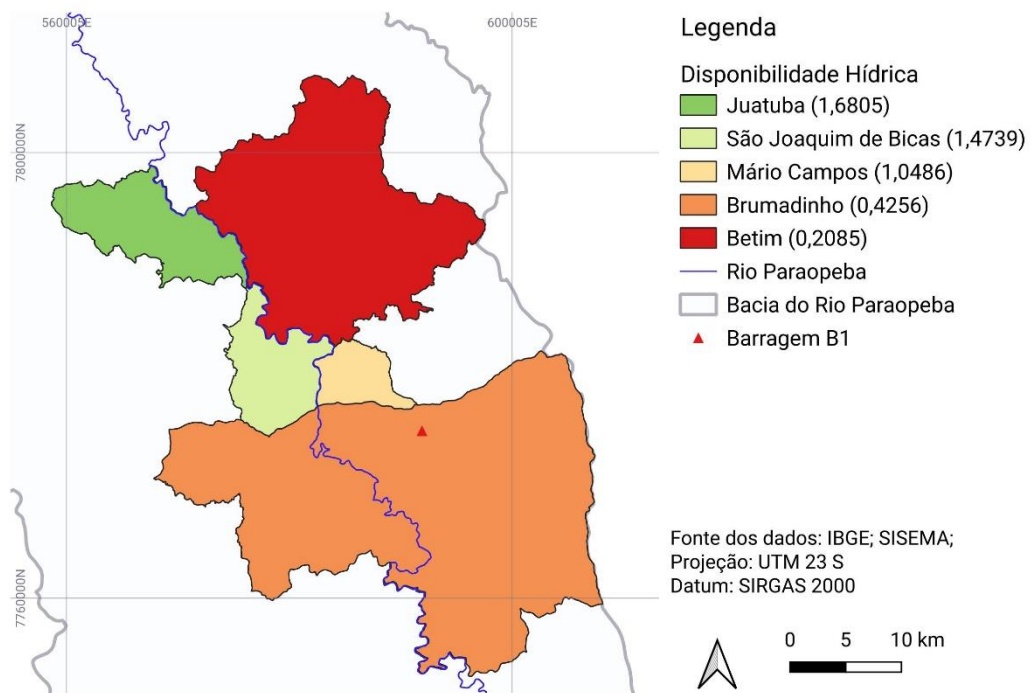
**Tabela 18: Disponibilidade hídrica (mm<sup>3</sup>/ano).**

| Municípios | Disponibilidade hídrica |
|------------|-------------------------|
|            | Q <sub>7 10</sub>       |
| Betim      | 0,2085                  |
| Brumadinho | 0,4256                  |

**Tabela 18: Disponibilidade hídrica (mm<sup>3</sup>/ano).**

| Municípios           | Disponibilidade hídrica |  |
|----------------------|-------------------------|--|
|                      | Q <sub>7 10</sub>       |  |
| Mário Campos         | 1,0486                  |  |
| Juatuba              | 1,6805                  |  |
| São Joaquim de Bicas | 1,4739                  |  |

Fonte: IGAM, 2024

**Figura 19: Disponibilidade hídrica (mm<sup>3</sup>/ano).**

Fonte: IBGE; SISEMA 2022

#### 3.2.3.4 E.04 – Vulnerabilidade hídrica natural da água subterrânea

A disponibilidade natural de água subterrânea foi estimada com base nas reservas exploráveis, ou lâmina explorável (LE) (mm/ano), que correspondem à quantidade máxima de água que pode ser extraída de um aquífero sem prejudicar o manancial. Este indicador foi adotado no estudo realizado no Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de Minas Gerais (ZEE-MG), desenvolvido em parceria entre o SISEMA e a Universidade Federal de Lavras (UFLA) em 2008.

Para a análise, MELLO *et al.*, (2008) estimou que regiões com LE (mm/ano) > 77,5 possuem uma disponibilidade de água subterrânea natural muito alta, enquanto aquelas com LE < 55 possuem uma disponibilidade natural muito baixa. Os municípios analisados apresentaram LE variando entre 55 e 62,5 mm/ano, indicando uma alta vulnerabilidade natural devido às baixas lâminas de exploração produzidas pelo Sistema Aquífero Gnáissico-Granítico, conforme apresentado por MELLO *et al.*, (2008). Para a análise, foi considerada a média dos valores de LE (mm/ano), que é 58,75.

### 3.2.4 Indicadores de Impacto

Foram selecionados dois indicadores de Impacto, os quais são apresentados no **Quadro 4** e em seguida destacados os argumentos e justificativas da pertinência e da relevância para a escolha destes indicadores na composição do modelo FPEIR da área de estudo.

**Quadro 4: Indicadores de Impacto.**

| <b>Nome</b>  | <b>Grandeza</b>  | <b>Unidade</b> | <b>Referência</b>   |
|--|--|----------------|---|
| <b>I.01 Doenças de veiculação hídrica</b>            | Quantidade anual de registros de notificações por doenças de veiculação hídrica          | nº/período     | IPT (2008)<br>MENDES (2022)<br>FELINTO <i>et al.</i> , (2019) |
| <b>I.02 – Situações de conflito de uso das águas</b> | Quantidade de tipos de situação de conflito de uso das águas superficiais e subterrâneas | nº/ano         | IPT (2008)  |

#### 3.2.4.1 I.01 – Doenças de vinculação hídrica

As doenças relacionadas com a água estão intimamente ligadas às pressões sobre os recursos hídricos, enfatizando a necessidade crítica de gerir esses desafios para proteger a saúde pública e garantir o acesso à água potável (IPT, 2008; MENDES, 2022; FELINTO *et al.*, 2019). A investigação sublinha os diversos poluentes como agroquímicos, compostos farmacêuticos e metais pesados que entram nos corpos d'água, impactando a saúde humana (MENDEZ *et al.*, 2024).

Fatores como a gestão inadequada da água, falta de saneamento e resíduos sólidos contribuem para doenças transmitidas pela água e doenças transmitidas pelos mosquitos Aedes, necessitando de intervenções integradas para o controle de doenças e fornecimento de água limpa (OVERGAARD, *et al.*, 2021). Abordagens integradas que analisam parâmetros de qualidade da água e apontam fontes de poluição são vitais para manter a qualidade da água e a saúde do ecossistema, garantindo recursos hídricos sustentáveis para o futuro.

Este indicador é expresso pela quantidade anual de casos confirmados de doenças de veiculação hídrica (DVH) notificadas às secretarias de saúde dos municípios em estudo, conforme apresenta a **Tabela 19**. Para este projeto, foram consideradas as doenças de transmissão hídrica, especificamente as doenças diarreicas agudas (DDA), que podem ser causadas por diversos microrganismos infecciosos (bactérias, vírus e outros parasitas, como protozoários) transmissíveis pela água, a esquistossomose, uma doença parasitária diretamente relacionada ao saneamento precário, causada pelo *Schistosoma mansoni*, e as doenças transmitidas pelo mosquito Aedes, que é o vetor de vírus causadores de arboviroses. Entre as doenças mais comuns desse grupo destacam-se: Dengue, Zika e Chikungunya.

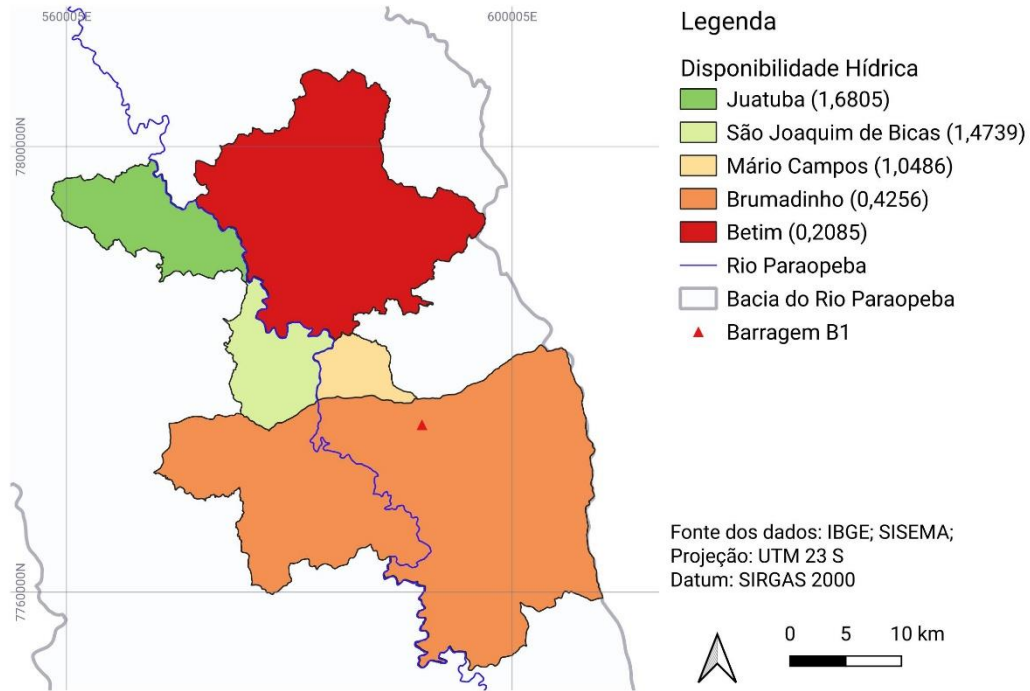
As informações sobre esses agravos foram organizadas com base nos dados disponibilizados pelo Ministério da Saúde e pelas secretarias estaduais e municipais de saúde, levando em consideração as notificações feitas nos últimos 10 anos (2013 – 2023). A **Figura 20** apresenta como as DVHs possuem intensidades de ocorrência distintas em cada município.

**Tabela 19: Quantidade total de casos confirmados de doenças de veiculação hídrica – 2013 – 2023.**

| Municípios           | DDA           | Esquistossomose | Dengue         | Chikungunya  | Zika      | Total          |
|----------------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|-----------|----------------|
| Betim                | 7.823         | 231             | 116.678        | 1.054        | 52        | 125.838        |
| Brumadinho           | 2.348         | 6               | 4.985          | 12           | 2         | 7.353          |
| Juatuba              | 2.085         | 13              | 3.850          | 169          | 1         | 6.118          |
| Mário Campos         | 519           | 13              | 2.412          | 2            | 0         | 2.946          |
| São Joaquim de Bicas | 642           | 1               | 1.307          | 42           | 9         | 2.001          |
| <b>Total</b>         | <b>14.002</b> | <b>269</b>      | <b>129.635</b> | <b>1.289</b> | <b>64</b> | <b>145.259</b> |

Fonte: SES, 2023; \*Doenças Diarreicas Agudas

**Figura 20: Doenças de veiculação hídrica.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.4.2 I.02 – Situações de conflito de uso das águas

Os conflitos pelo uso da água, decorrentes da competição por recursos hídricos limitados, são influenciados por vários fatores e pela intensidade das pressões sobre esses recursos (GLEICK; SHIMABUKU, 2023). Fatores como a economia social, o crescimento populacional, a dinâmica da oferta e da demanda de água, as alterações climáticas e os padrões de utilização do solo desempenham papéis cruciais na exacerbação ou mitigação desses conflitos, influenciando e sendo influenciados por diversos aspectos (IPT, 2008).

No estudo de PEIXOTO *et al.*, (2022), os autores discutem a gestão dos recursos hídricos no Brasil, destacando que as práticas atuais de gestão não resolveram os problemas de escassez hídrica e, em vez disso, reforçaram a influência de grupos dominantes, resultando em conflitos sobre os recursos hídricos. Esses conflitos são frequentemente causados por poluição industrial, atividades agrícolas e mineração, que degradam a qualidade da água e afetam negativamente as comunidades locais, especialmente em áreas urbanizadas e industrializadas.

Na área em estudo, os principais motivos dos conflitos pelo uso das águas estão relacionados ao rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho. Os tipos de conflito incluem o não cumprimento de procedimentos legais e a destruição e/ou poluição dos recursos hídricos. Os dados referentes aos conflitos identificados nos municípios foram compilados a partir da base de dados da Comissão Pastoral da Terra, conforme é representado na **Tabela 20**.

O recorte temporal escolhido foi entre os anos de 2019 e 2022, pois em período anterior a 2019 não houve conflitos pelo uso da água mapeados na área em observação.

**Tabela 20:** Conflitos de uso das águas.

| <b>Municípios</b>    | <b>Conflitos de uso das águas 2019-2022</b> |
|----------------------|---|
| Betim                | 8   |
| Brumadinho           | 32  |
| Juatuba              | 3   |
| Mário Campos         | 0   |
| São Joaquim de Bicas | 8   |

Fonte: CPT, 2024

### 3.2.5 Indicadores de Resposta

Foram selecionados doze indicadores de Resposta, os quais são apresentados no **Quadro 5** e em seguida destacados os argumentos e justificativas da pertinência e da relevância para a escolha destes indicadores na composição do modelo FPEIR da área de estudo.

**Quadro 5: Indicadores de Resposta.**

| <b>Nome</b>                                    | <b>Grandeza</b>   | <b>Unidade</b> | <b>Referência</b>           |
|--|---|----------------|-----------------------------|
| <b>R.01 Coleta de efluentes sanitários</b>     | Proporção de domicílios ligados à rede de esgoto        | %              | IPT (2008)                  |
| <b>R.02 Tratamento de efluentes sanitários</b> | Proporção de municípios com tratamento de esgoto em ETE | %              | IPT (2008)                  |
| <b>R.03 Coleta de resíduos sólidos</b>         | Proporção de municípios com coleta de lixo              | %              | IPT (2008)<br>MENDES (2022) |
| <b>R.04 - Disposição de resíduos sólidos</b>   | Proporção de municípios com aterro sanitário            | %              | IPT (2008)<br>MENDES (2022) |

**Quadro 5: Indicadores de Resposta.**

| Nome  | Grandeza  | Unidade | Referência                               |
|---|---|---------|--|
| <b>R.05 Fiscalizações realizadas</b>  | Quantidade de fiscalizações                             | n°      | IPT (2008)                               |
| <b>R.06 Abrangência da rede de abastecimento de água</b>                                    | Proporção de domicílios ligados à abastecimento de água | %       | IPT (2008)                               |
| <b>R.07 Eficiência no sistema de abastecimento público</b>                                  | Perdas de água  | %       | IPT (2008)                               |
| <b>R.08 Abrangência do monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas</b> | Quantidade de estações de monitoramento                 | n°      | IPT (2008)                               |
| <b>R.09 Abrangência do monitoramento da vazão</b>   | Quantidade de fluviômetros                              | n°      | IPT (2008)                               |
| <b>R.10 Cobertura vegetal nativa</b>  | Proporção de área com Cobertura vegetal                 | %       | IPT (2008)<br>LIU <i>et al.</i> , (2018) |
| <b>R.11 Áreas protegidas</b>  | Proporção de área protegida                             | %       | IPT (2008)                               |
| <b>R.12 Instrumentos Gestão</b>   | Quantidade de instrumentos de gestão                    | n°/6    | IPT (2008)                               |

### 3.2.5.1 R.01 – Coleta de efluentes sanitários

Esse indicador representa o percentual da população urbana municipal atendida por serviço de coleta de esgoto (%), conforme a **Tabela 21**. A adequação e a eficiência desse serviço são essenciais para a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. A falta de coleta de esgoto adequada pode levar à contaminação dos corpos d'água, causando pressão sobre os recursos hídricos e comprometendo a qualidade da água disponível para consumo e outras atividades econômicas (IPT 2008). A **Figura 21** apresenta a situação de cada município em relação a esse indicador.

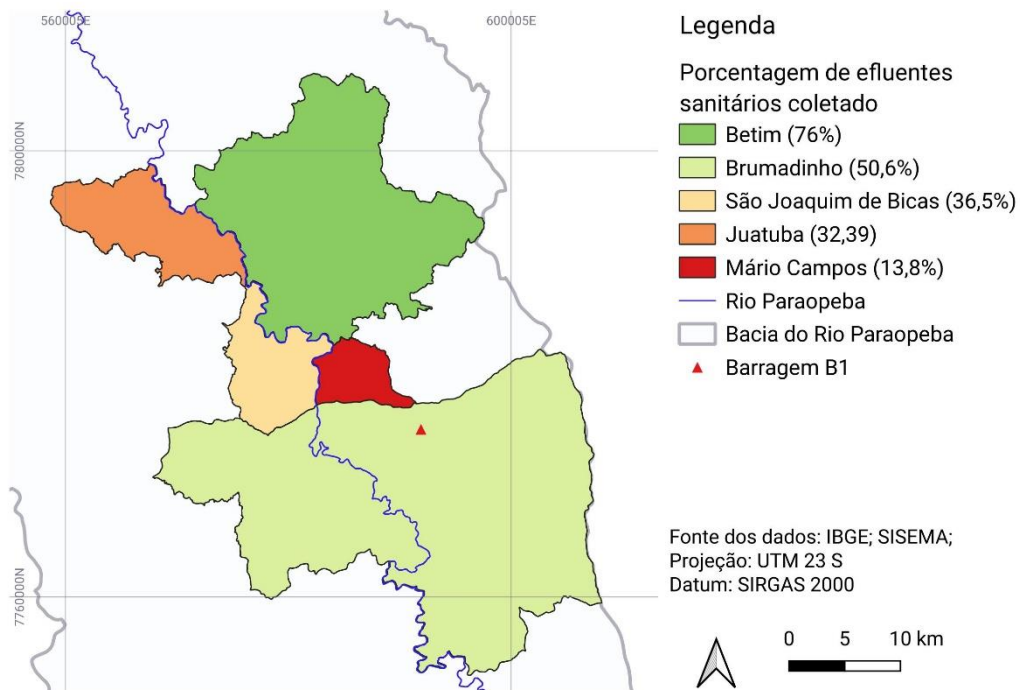
**Tabela 21: Porcentagem de efluentes sanitários coletados.**

| Municípios | Coleta de efluentes sanitários (%) |
|------------|------------------------------------|
|------------|------------------------------------|

|                      |       |
|----------------------|-------|
| Betim                | 76,0  |
| Brumadinho           | 50,6  |
| Juatuba              | 32,39 |
| Mário Campos         | 13,8  |
| São Joaquim de Bicas | 36,5  |

Fonte: ARSAE, 2023

**Figura 21: Porcentagem de efluentes sanitários coletados.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

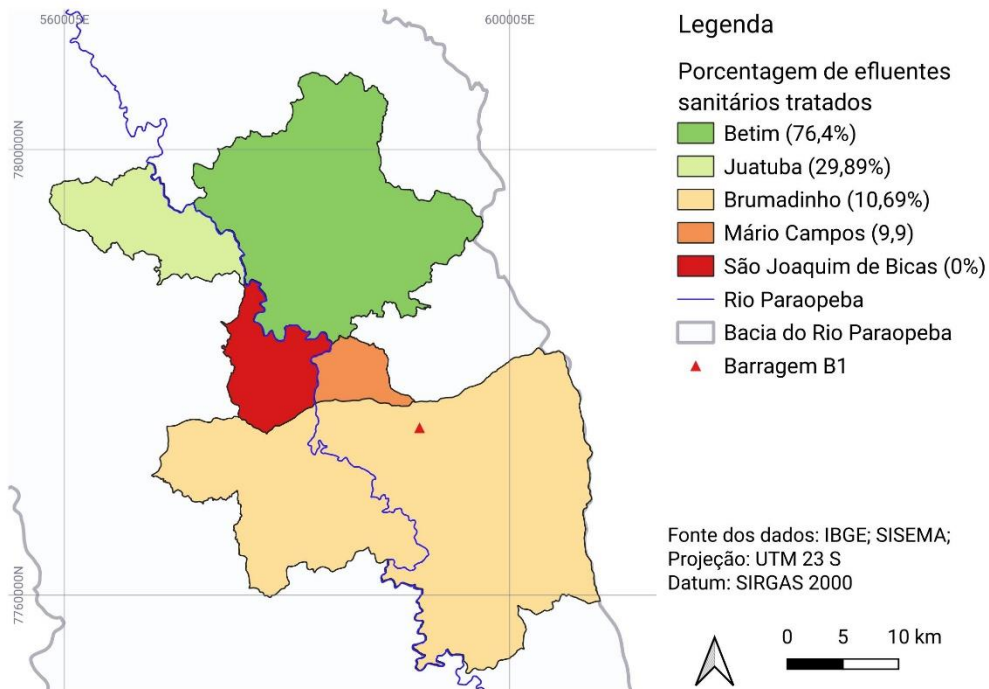
### 3.2.5.2 R.02 – Tratamento de efluentes sanitários

Esse indicador representa o percentual da população urbana municipal atendida por serviço de tratamento de esgoto (%), conforme a **Tabela 22**. A adequação e a eficiência desse serviço são essenciais para a saúde pública e a sustentabilidade ambiental. A falta de tratamento de esgoto adequado pode levar à contaminação dos corpos d'água, causando pressão sobre os recursos hídricos e comprometendo a qualidade da água disponível para consumo e outras atividades econômicas. O tratamento de esgoto é crucial para proteger ecossistemas aquáticos e garantir a sustentabilidade hídrica a longo prazo. A **Figura 22** apresenta os desempenhos dos municípios em relação a esse indicador.

**Tabela 22:** Porcentagem de efluentes sanitários tratados.

| Município            | Tratamento de efluentes sanitários (%) |
|----------------------|--|
| Betim                | 76,4                                   |
| Brumadinho           | 10,69                                  |
| Juatuba              | 29,89                                  |
| Mário Campos         | 9,9                                    |
| São Joaquim de Bicas | 0                                      |

Fonte: SISEMA, 2023

**Figura 22:** Porcentagem de efluentes sanitários tratados

Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.3 R.03 – Coleta seletiva de resíduos sólidos

Esse indicador representa a presença ou não de coleta seletiva do lixo urbano nos municípios. A implementação da coleta seletiva é fundamental para a gestão sustentável de resíduos sólidos. A ausência desse serviço pode resultar no acúmulo de resíduos em aterros sanitários e na contaminação do solo e da água (MENDES, 2022: IPT 2008). Além disso, a coleta seletiva contribui para a redução da pressão sobre os recursos naturais, promovendo a reciclagem e o

reaproveitamento de materiais, e diminuindo a poluição ambiental. O **Quadro 6** apresenta quais municípios dentro da área de estudo realizam essa prática. apresenta a situação de cada município em relação a esse indicador.

**Quadro 6: Coleta seletiva no município**

| <b>Município</b>     | <b>Coleta seletiva</b> |
|----------------------|------------------------|
| Betim                | Sim                    |
| Brumadinho           | Sim                    |
| Juatuba              | Sim                    |
| Mário Campos         | Sim                    |
| São Joaquim de Bicas | Não                    |

Fonte: ARSAE, 2023

#### 3.2.5.4 R.04 - Disposição de resíduos sólidos

Esse indicador representa onde são dispostos os resíduos sólidos coletados no município. A gestão adequada dos resíduos sólidos é crucial para minimizar os impactos ambientais e proteger a saúde pública. Disposição inadequada, como em lixões a céu aberto, pode contaminar o solo e os recursos hídricos, enquanto aterros sanitários bem gerenciados reduzem esses riscos. Além disso, práticas corretas de disposição contribuem para a sustentabilidade ambiental e a redução da pressão sobre os recursos naturais. O **Quadro 7** apresenta quais municípios dentro da área de estudo possuem aterro sanitário para disposição dos resíduos sólidos.

**Quadro 7: Local de disposição de resíduos sólidos.**

| <b>Município</b>     | <b>Disposição de resíduos sólidos</b> |
|----------------------|---------------------------------------|
| Betim                | Sim                                   |
| Brumadinho           | Sim                                   |
| Juatuba              | Sim                                   |
| Mário Campos         | Sim                                   |
| São Joaquim de Bicas | Sim                                   |

Fonte: ARSAE, 2023

### 3.2.5.5 R.05 – Fiscalizações Realizadas

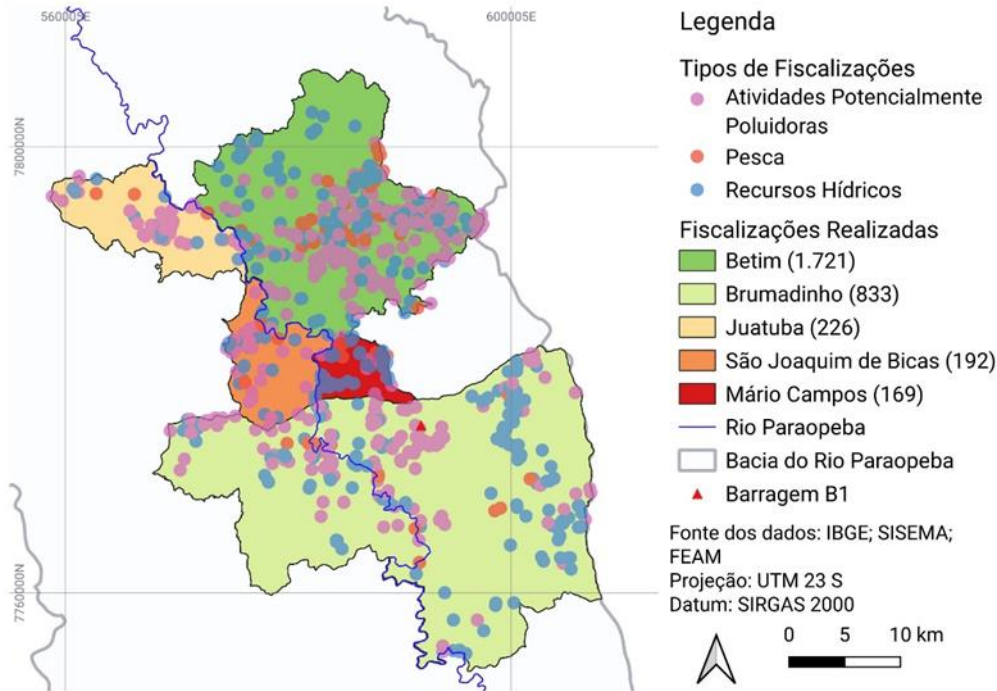
Fiscalizações realizadas pela SEMAD foram informadas pelos técnicos através do Sistema de Fiscalização (SISFIS) (**Tabela 23**). A fiscalização eficaz contribui para a redução da poluição e a promoção de práticas sustentáveis (IPT, 2008). Nesse recorte, foram contabilizadas as fiscalizações da pesca, recursos hídricos e atividades potencialmente poluidoras entre 2006 e 2023, conforme apresentado na **Figura 23** é possível observar a localização das fiscalizações realizadas no período de análise. Esses dados são essenciais para monitorar e controlar o impacto ambiental dessas atividades, assegurando o cumprimento das normas e a proteção do meio ambiente.

**Tabela 23: Fiscalizações realizadas entre 2006 e 2023.**

| <b>Município</b>     | <b>Fiscalizações realizadas (nº)</b> |
|----------------------|--------------------------------------|
| Betim                | 1.721                                |
| Brumadinho           | 833                                  |
| Juatuba              | 226                                  |
| Mário Campos         | 169                                  |
| São Joaquim de Bicas | 192                                  |

**Fonte:** SISEMA, 2023

**Figura 23: Fiscalizações realizadas entre 2006 e 2023.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.6 R.06 – População urbana atendida por abastecimento de água

Esse indicador representa o percentual da população urbana municipal atendida por abastecimento de água (%), conforme a **Tabela 26**. A disponibilidade e a qualidade do abastecimento de água são fundamentais para a saúde pública e o bem-estar da comunidade. A falta de acesso adequado a esse serviço pode levar a problemas de saúde e aumentar a pressão sobre os recursos hídricos, exigindo medidas para garantir a sustentabilidade e a segurança hídrica para todos os habitantes do município (IPT, 2008). Na **Figura 24** podemos observar a diversidade de níveis de abastecimento por município.

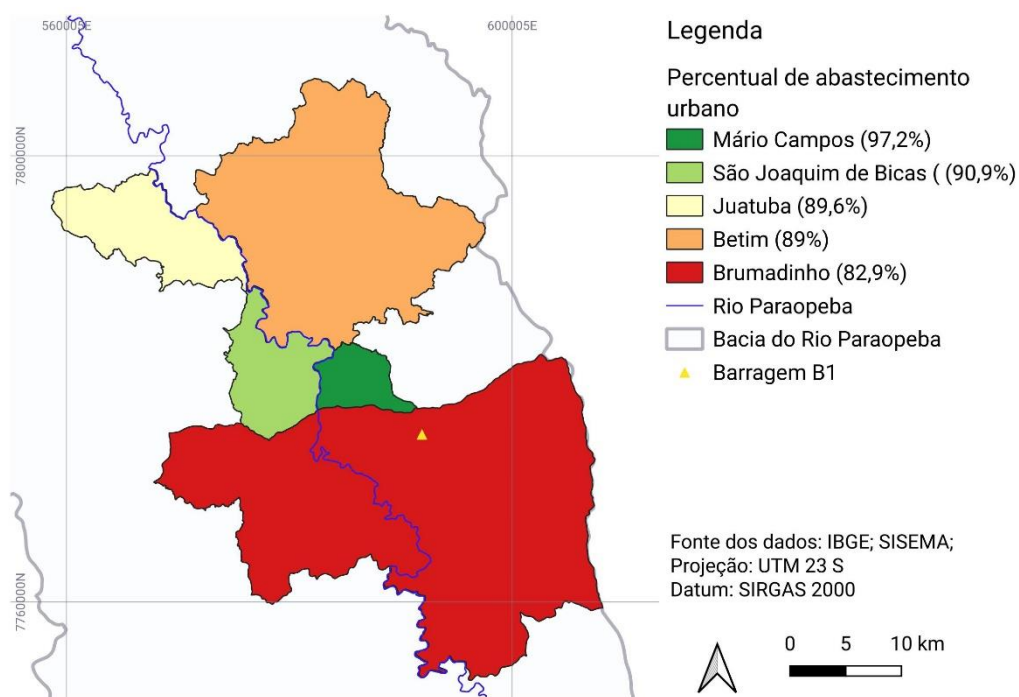
**Tabela 24: Percentual da população urbana atendida por abastecimento de água.**

| Município    | Abastecimento de água (%) |
|--------------|---------------------------|
| Betim        | 89,0                      |
| Brumadinho   | 82,9                      |
| Juatuba      | 89,59                     |
| Mário Campos | 97,2                      |

| Município            | Abastecimento de água (%) |
|----------------------|---------------------------|
| São Joaquim de Bicas | 90,9                      |

Fonte: ARSAE, 2023

**Figura 24: Percentual de abastecimento urbano.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.7 R.07 – Eficiência no sistema de abastecimento público

Esse indicador representa o percentual de perdas de água no sistema de abastecimento público (%), conforme a **Tabela 24**. Perdas de água, que podem ocorrer devido a vazamentos, falhas na infraestrutura ou furtos, têm um impacto significativo na eficiência do sistema. A análise do percentual de perdas de água nos sistemas de abastecimento público dos municípios na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba revela uma questão significativa de eficiência na gestão dos recursos hídricos. Reduzir essas perdas é crucial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, pois melhora a disponibilidade de água potável, diminui os custos operacionais e ajuda a preservar os recursos naturais para as futuras gerações (IPT, 2008). A

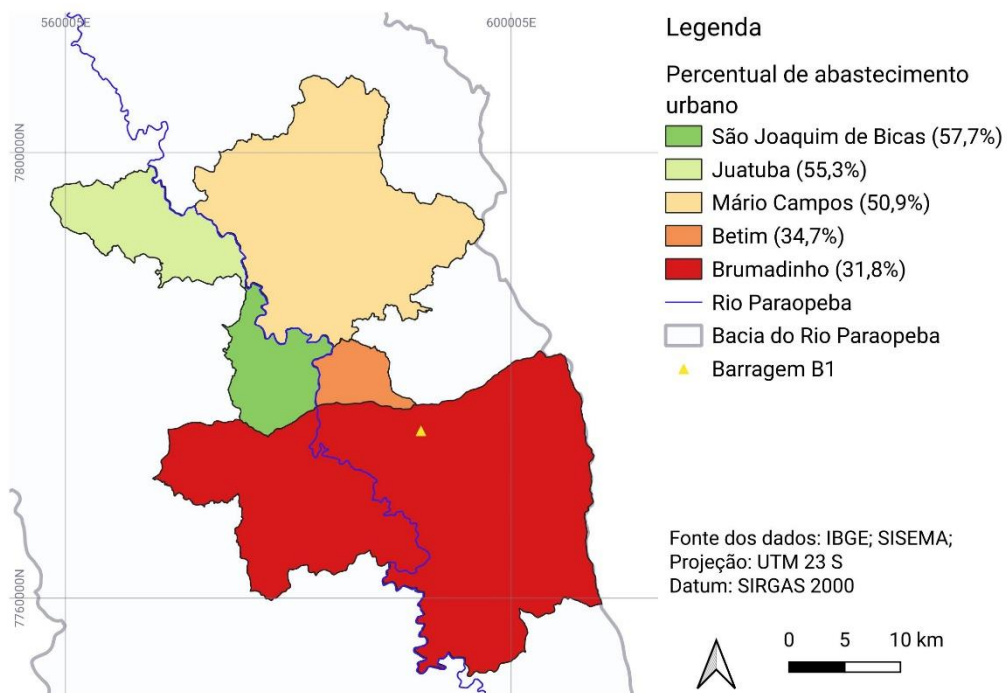
**Figura 25** apresenta o nível de eficiência no abastecimento público entre os municípios em análise.

**Tabela 24: Percentual das perdas de água no abastecimento público.**

| Município            | Perdas de água no abastecimento público (%) |
|----------------------|---|
| Betim                | 50,9  |
| Brumadinho           | 31,8  |
| Mário Campos         | 34,7  |
| Juatuba              | 55,3  |
| São Joaquim de Bicas | 57,7  |

Fonte: ARSAE, 2023

**Figura 25: Perdas de água no abastecimento público.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.8 R.08 –Monitoramento da qualidade das águas superficiais e subterrâneas

Esse indicador é expresso pela quantidade de estações de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas (nº), conforme mostra a **Tabela 25**. O monitoramento contínuo é vital para a gestão eficaz dos recursos hídricos, fornecendo dados essenciais sobre a qualidade

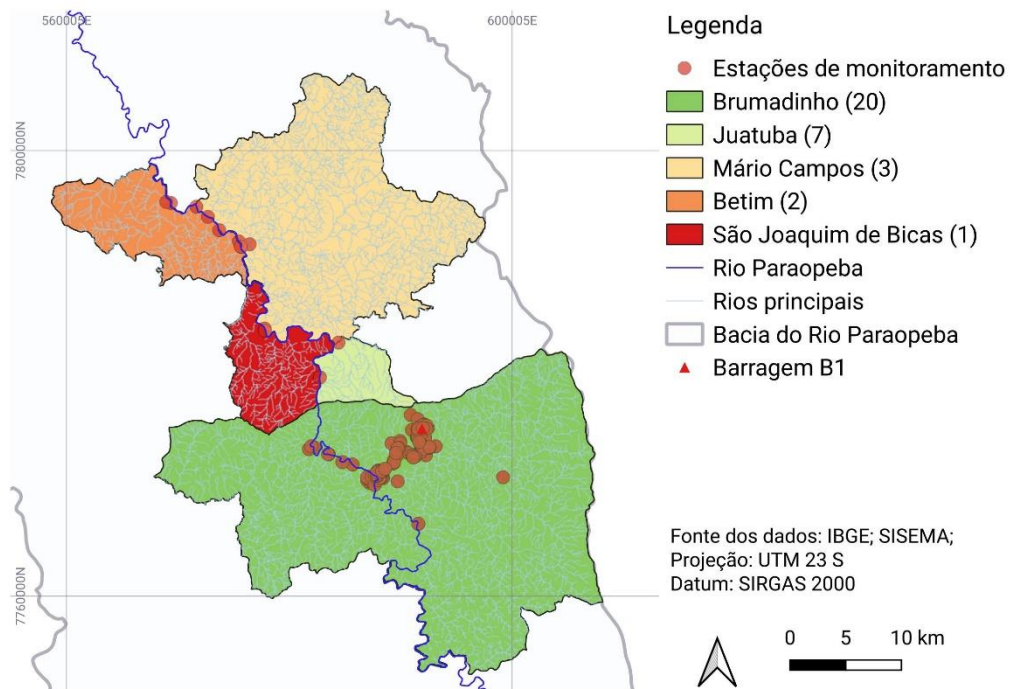
e a quantidade de água. Isso permite a identificação precoce de problemas, como contaminação ou escassez, e a adoção de medidas corretivas (IPT, 2008). A expansão e a manutenção dessas estações são fundamentais para garantir a sustentabilidade e a segurança hídrica a longo prazo. Essas estações de monitoramento ambiental da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba são parte das ações e atividades de recuperação socioambiental, pós-rompimento da Barragem B1, em Brumadinho-MG, no ano de 2019. Na **Figura 26**, é possível observar onde se concentra o monitoramento dentro do contexto da área de estudo.

**Tabela 25: Estações de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas.**

| Municípios           | Estações de Monitoramento de águas (n <sup>o</sup> ) |
|----------------------|--|
| Betim                | 4  |
| Brumadinho           | 199  |
| Juatuba              | 7  |
| Mário Campos         | 3  |
| São Joaquim de Bicas | 0  |

Fonte: SISEMA, 2019

**Figura 26: Estações de monitoramento das águas superficiais e subterrâneas.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.9 R.09 – Abrangência do monitoramento da vazão

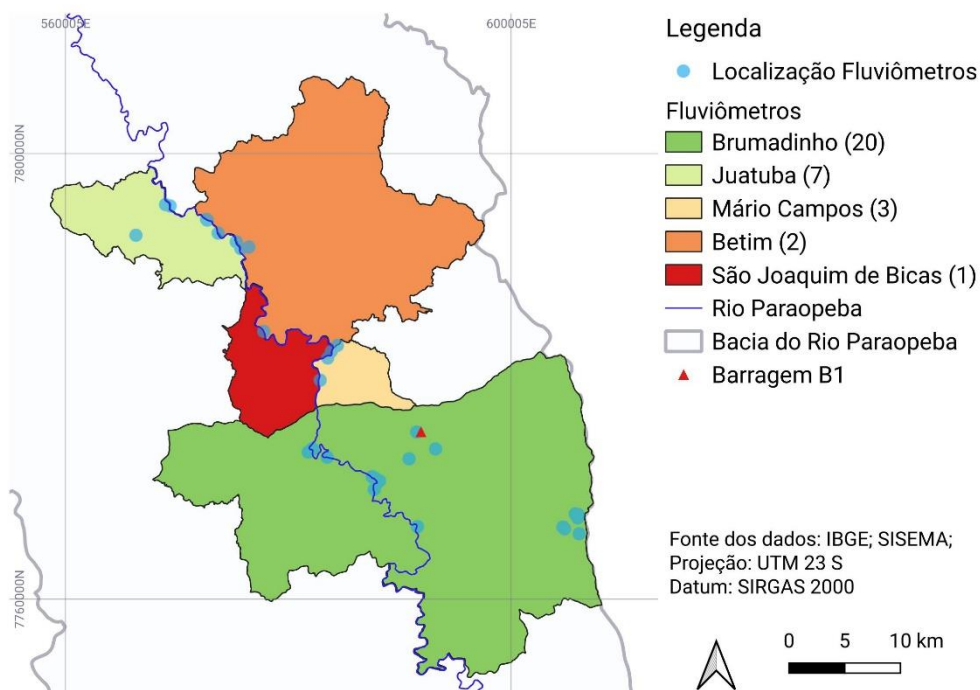
Esse indicador pode ser expresso pelo número de fluviômetros instalados (**Tabela 26**). Na BHRP, há 95 fluviômetros, dos quais 34 estão dentro da área de estudo. Esses dispositivos são essenciais para monitorar o fluxo dos rios e coletar dados hidrológicos. As informações obtidas ajudam na gestão dos recursos hídricos, na previsão de enchentes e secas, e na tomada de decisões para a sustentabilidade e a segurança hídrica da região (IPT, 2008). Na **Figura 27**, é possível observar onde se concentra o monitoramento dentro do contexto da área de estudo.

**Tabela 26: Quantidade de fluviômetros instalados.**

| Município            | Fluviômetros instalados (nº) |
|----------------------|------------------------------|
| Betim                | 2                            |
| Brumadinho           | 20                           |
| Juatuba              | 7                            |
| Mário Campos         | 3                            |
| São Joaquim de Bicas | 1                            |

Fonte: SISEMA, 2023

**Figura 27: Localização dos fluviômetros instalados.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.10 R.10 – Proporção de área com cobertura florestal

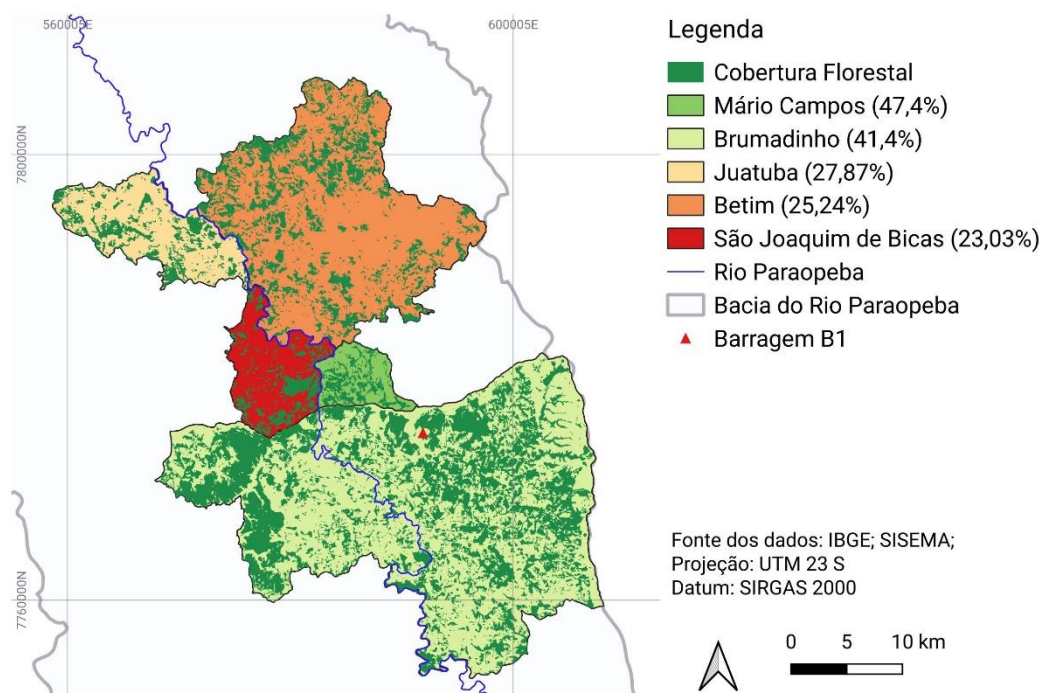
Percentual da área territorial do município coberta por usos e cobertura da terra do tipo florestal, conforme classes mapeadas pelo MAPBIOMAS (MAPBIOMAS, 2022) (**Figura 28**) (**Tabela 27**). Este indicador é crucial para avaliar a preservação dos ecossistemas e a biodiversidade local. A manutenção de áreas naturais contribui para a regulação do ciclo hidrológico, a proteção dos recursos hídricos, e a mitigação dos impactos das mudanças climáticas, promovendo um equilíbrio sustentável entre desenvolvimento e conservação ambiental.

**Tabela 27: Proporção de área com cobertura florestal (km<sup>2</sup>).**

| <b>Município</b>     | <b>Área com cobertura florestal</b> | <b>Área total</b> | <b>Cobertura florestal (%)</b> |
|----------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------------------|
| Betim                | 86,86                               | 344,06            | 25,24                          |
| Brumadinho           | 264,96                              | 639,43            | 41,44                          |
| Juatuba              | 27,04                               | 97,02             | 27,87                          |
| Mário Campos         | 16,69                               | 35,19             | 47,41                          |
| São Joaquim de Bicas | 16,53                               | 71,76             | 23,03                          |

**Fonte:** MAPBIOMAS, 2022

**Figura 28: Localização das áreas com cobertura florestal.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.11 R.11 - Áreas protegidas

Esse indicador relaciona-se com a proporção de área protegida em relação à área total do município (**Tabela 28**). Para delimitação desse indicador, foram contabilizados os instrumentos de proteção ambiental. Entre os dados considerados estão:

- Áreas de delimitação das Reservas Particulares do Patrimônio Natural (RPPN) em Minas Gerais, reconhecidas e homologadas pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF).
- Áreas de Proteção Especial (APE), instituídas pelo Estado de Minas Gerais através de decretos estaduais, para proteção de áreas de interesse especial, como mananciais, locais de patrimônio cultural, histórico, paisagístico e arqueológico.
- Unidades de conservação estaduais em Minas Gerais, sob responsabilidade do Instituto Estadual de Florestas (IEF), classificadas quanto à tipologia de conservação – Proteção Integral ou Desenvolvimento Sustentável.

- Unidades de conservação municipais em Minas Gerais, monitoradas pelo Instituto Estadual de Florestas (IEF), classificadas quanto à tipologia de conservação – Proteção Integral ou Desenvolvimento Sustentável.

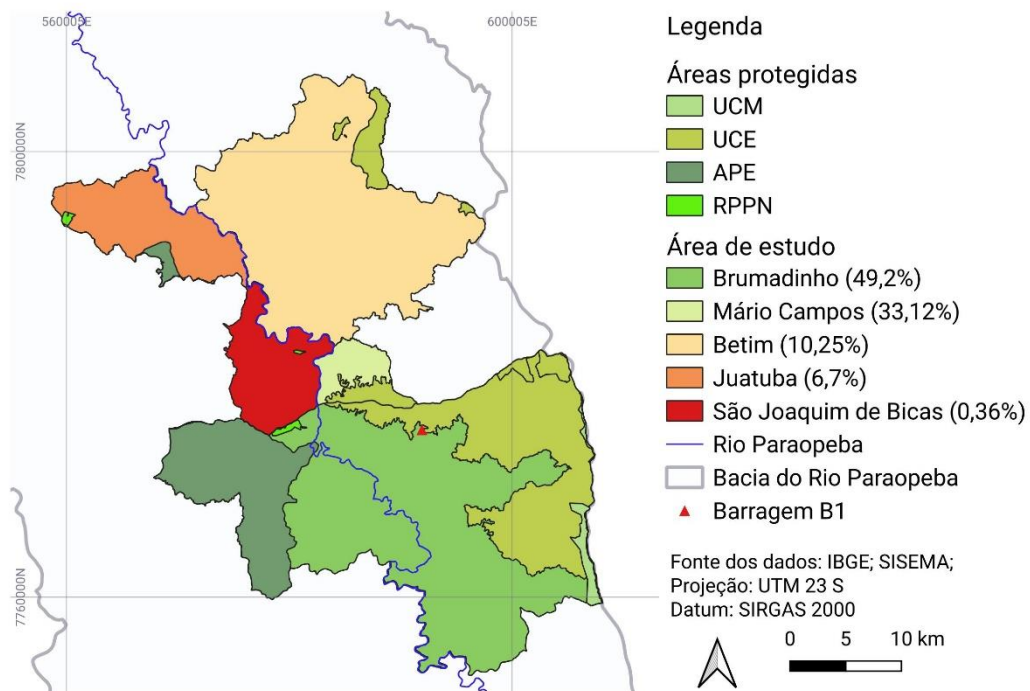
Esse indicador é essencial para avaliar a eficácia das políticas de conservação, promovendo a proteção dos ecossistemas, a biodiversidade e a sustentabilidade dos recursos naturais no município (IPT, 2008). A **Figura 29** mostra a localização das áreas protegidas por município.

**Tabela 28: Proporção de área protegida por Unidade de Conservação (km<sup>2</sup>).**

| Município            | Área protegida | Área total | Área protegida (%) |
|----------------------|----------------|------------|--------------------|
| Betim                | 35,26          | 344,06     | 10,25              |
| Brumadinho           | 314,664        | 639,43     | 49,21              |
| Mário Campos         | 6,567          | 97,02      | 6,77               |
| Juatuba              | 11,654         | 35,19      | 33,12              |
| São Joaquim de Bicas | 0,257          | 71,76      | 0,36               |

Fonte: SISEMA, 2023

**Figura 29: Localização da área protegida.**



Fonte: IBGE; SISEMA 2022

### 3.2.5.12 R.12 – Instrumentos de gestão

Para esse estudo foram selecionados instrumentos que apresentam políticas públicas de planejamento e gestão dos municípios. Esses instrumentos são parte de políticas públicas e de planejamento estratégico, sendo essenciais para a administração municipal e regional em diferentes áreas, como saneamento, resíduos sólidos, desenvolvimento urbano e gestão ambiental. Esse indicador pode ser expresso na quantidade de instrumentos de gestão e planejamento implementados em relação ao total de seis instrumentos (**Quadro 8**).

Avaliar o número de instrumentos implementados é essencial para entender o progresso na gestão ambiental do município. Esses instrumentos incluem planos diretores, políticas de saneamento, programas de conservação, entre outros. A implementação eficaz desses mecanismos contribui para a sustentabilidade, a proteção dos recursos naturais e o desenvolvimento equilibrado da região (IPT, 2008). Para esse estudo foram destacados os seguintes planos:

- **PMGIRS** (Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos): Instrumento político voltado para a gestão de resíduos sólidos no âmbito municipal. Estabelece diretrizes para a coleta, tratamento, e disposição final de resíduos.
- **PMSB** (Plano Municipal de Saneamento Básico): Instrumento político para o planejamento e execução das ações de saneamento básico, incluindo abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem urbana.
- **PDDMA** (Plano Diretor de Desenvolvimento Municipal e Ambiental): Instrumento político que integra o desenvolvimento urbano e ambiental, orientando o crescimento ordenado do município e a preservação ambiental.
- **PSH-RMBH** (Plano de Saneamento Hidrográfico da Região Metropolitana de Belo Horizonte): Instrumento político específico para a gestão dos recursos hídricos na Região Metropolitana de Belo Horizonte, abordando questões de saneamento e gestão hídrica.
- **PD** (Plano Diretor): Instrumento político de planejamento urbano que estabelece diretrizes para o desenvolvimento e ordenamento territorial do município, visando o uso sustentável dos recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida.
- **PDRH Paraopeba** (Plano Diretor de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba): É um documento estratégico que visa a gestão integrada e sustentável dos

recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba. Sua última versão foi elaborada em 2020 e atualmente encontra-se em revisão.

Os planos regionais como PSH-RMBH e PNRH abarcam todos os municípios em análise e estão diretamente relacionados à segurança hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba.

#### Quadro 8: Instrumentos de gestão e planejamento estratégico dos municípios.

| Município            | PMGIRS | PMSB | PDDMA | PSH-RMBH | PD  | PNRH | Total |
|----------------------|--------|------|-------|----------|-----|------|-------|
| Betim                | Sim    | Sim  | Não   | Sim      | Sim | Sim  | 5/6   |
| Brumadinho           | Sim    | Sim  | SI    | Sim      | Sim | Sim  | 5/6   |
| Mário Campos         | Não    | Sim  | Não   | Sim      | Sim | Sim  | 4/6   |
| Juatuba              | Não    | Não  | SI    | Sim      | Sim | Sim  | 3/6   |
| São Joaquim de Bicas | Não    | Não  | Não   | Sim      | Sim | Sim  | 3/6   |

Fonte: SISEMA, 2023 \*SI: Sem informação

### 3.3 Análise multicritério para classificação dos indicadores: utilização do TOPSIS

Para o presente estudo, propomos uma abordagem de seleção de variáveis que formulam o problema como tomada de decisão com múltiplos indicadores (MCDM) baseada no método de pesos de entropia e no modelo TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). O TOPSIS é um método de análise de decisão multicritério, que foi inicialmente proposto por HWANG e YOON (1981). Baseia-se no conceito de que as alternativas escolhidas devem ter a menor distância euclidiana da solução ideal positiva (PIS) (ASSARI, MAHESH; ASSARI, *et al.*, 2012).

O método TOPSIS também se destaca como uma ferramenta valiosa na avaliação de sistemas ambientais em vários campos. Por exemplo, ZHANG *et al.*, (2023) utilizaram o TOPSIS para avaliar o desempenho da governança ecológica agrícola na província de Henan. ELSHOUBAKY *et al.*, (2023) aplicaram o método na seleção de materiais de construção sustentáveis, considerando a avaliação do ciclo de vida. O método também foi o escolhido de Aires e Salgado, que utilizaram o TOPSIS para avaliar a situação dos reservatórios de água no

semiárido com base no Índice de Qualidade da Água (IQA) e na Tomada de Decisão Multicritério (MDCM). Além disso, a extensão do TOPSIS a um ambiente difuso, como descrito por CARNERO (2020), facilita a avaliação da responsabilidade ambiental das organizações de saúde, promovendo a saúde pública por meio da melhoria das práticas de sustentabilidade ambiental. Ao incorporar interações dinâmicas e a tomada de decisão multicritério, o TOPSIS aprimora os processos de decisão, prioriza índices críticos e facilita a melhoria contínua dos sistemas ambientais.

No contexto do método TOPSIS, a "Solução Ideal Positiva" (SIP) e a "Solução Ideal Negativa" (SIN) são conceitos fundamentais. A Solução Ideal Positiva é o cenário em que todos os indicadores de desempenho estão no seu melhor estado possível. Neste estudo, o SIP consistiria nos valores mais altos para os indicadores considerados benéficos para a segurança hídrica, como a alta qualidade das águas, alta disponibilidade de água superficial e subterrânea, alta eficiência e cobertura dos serviços de água e esgoto, boa gestão de resíduos, ampla fiscalização, cobertura vegetal nativa preservada, entre outros.

A Solução Ideal Negativa, por outro lado, representa o oposto. Este é o cenário onde todos os indicadores estão nos seus piores estados possíveis. Para o estudo, o SIN incluiria os valores mais baixos para indicadores positivos (como baixa qualidade das águas) e os valores mais altos para indicadores negativos (como densidade demográfica, crescimento populacional, demanda de água). Este cenário reflete as condições mais desfavoráveis para a segurança hídrica.

Para iniciar a análise com o TOPSIS, foi necessário calcular os pesos de cada indicador ( $w$ ) usando o "Entropy Weight Method". Este método, proposto inicialmente por SHANNON; WIENER em 1949, tem sido aplicado em diversos campos. Por exemplo, YANG *et al.*, (2022) adotaram esse método para resolver problemas matemáticos na tomada de decisões de engenharia, empregando uma versão aprimorada de ponderação de entropia. Além disso, LUO *et al.*, (2022) estabeleceram um quadro de indicadores para avaliar o risco de transmissão da leishmaniose visceral zoonótica do tipo montanha, utilizando o método de peso de entropia em conjunto com o método Delphi, entre outras aplicações.

Diferentemente de abordagens subjetivas, que dependem de opiniões de especialistas ou de outros métodos qualitativos para determinar os pesos, o método da entropia baseia-se em informações quantitativas intrínsecas ao conjunto de dados. Ele emprega o valor de entropia original de cada índice para estabelecer sua ponderação. A premissa central deste método é que

índices com maior dispersão e, conseqüentemente, maior entropia, devem ter maior peso no processo de decisão, pois oferecem uma gama mais ampla de informações úteis.

A aplicação de todas as etapas do método TOPSIS e o cálculo de pesos através do método de entropia foram modeladas utilizando o software Excel® (Microsoft 365 MSO versão 2306 2023) e linguagem Python com as bibliotecas pandas, numpy e matplotlib. As equações e os scripts (códigos) correspondentes utilizados estão disponíveis no Apêndice A e no Apêndice B, respectivamente.

A fim de diagnosticar os municípios quanto à segurança hídrica, a abordagem empregada avaliará 30 indicadores, segmentados de acordo com o modelo FPEIR: sete relacionados a forças motrizes, cinco a pressões, quatro ao estado dos recursos hídricos, dois a impactos e doze a respostas. Para a avaliação de todos os indicadores, considerou-se que os indicadores qualitativos foram codificados como variáveis binárias. Especificamente, o valor "SIM" foi atribuído a 1 e o valor "NÃO" a 0.

No modelo TOPSIS, os critérios são classificados como de benefício (positivo) ou de custo (negativo). Critérios de benefício (+) são aqueles em que valores mais altos são desejáveis, como o IDH ou qualidade da água. Já os critérios de custo (-) são aqueles em que valores mais baixos são preferíveis, como a concentração de parâmetros químicos alterados. Essa classificação é essencial para a normalização dos dados, onde valores são ajustados para permitir comparações justas. Critérios de benefício são maximizados, enquanto critérios de custo são minimizados. Essa etapa garante uma análise precisa, refletindo as prioridades e objetivos do estudo.

A matriz de decisão foi composta por 30 indicadores, segmentados de acordo com o modelo FPEIR. Os pesos dos indicadores foram determinados pelo método de entropia. Além disso, foi atribuído quais indicadores serão considerados benefícios e quais serão custos, conforme apresentado na **Tabela 29**.

**Tabela 29: Pesos dos indicadores calculados com o método da entropia.**

| +/- | Indicador | Peso   | +/- | Indicador | Peso   |
|-----|-----------|--------|-----|-----------|--------|
| -   | FM.01     | 0,0198 | +   | E.04      | 0,0879 |
| -   | FM.02     | 0,0216 | -   | I.01      | 0,0690 |
| -   | FM.03     | 0,0234 | -   | I.02      | 0,0311 |
| -   | FM.04     | 0,0149 | +   | R.01      | 0,0183 |

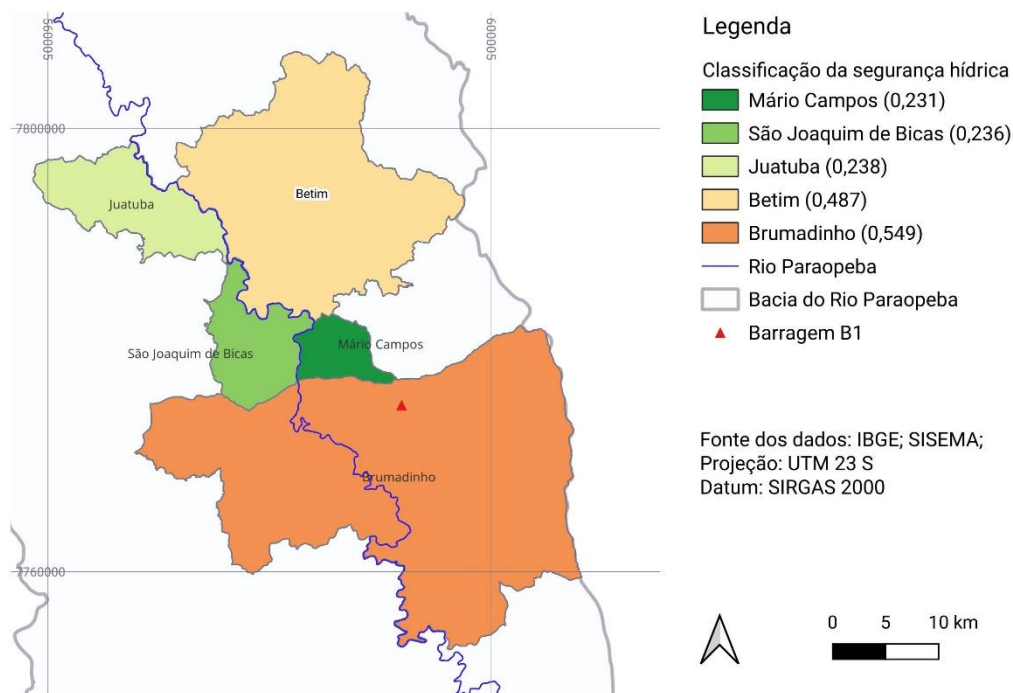
| +/- | Indicador | Peso   | +/- | Indicador | Peso   |
|-----|-----------|--------|-----|-----------|--------|
| -   | FM.05     | 0,0219 | +   | R.02      | 0,0303 |
| -   | FM.06     | 0,0418 | +   | R.03      | 0,0122 |
| -   | FM.07     | 0,0144 | +   | R.04      | 0,0122 |
| -   | P.01      | 0,0507 | +   | R.05      | 0,0463 |
| -   | P.02      | 0,0469 | +   | R.06      | 0,0156 |
| -   | P.03      | 0,0242 | +   | R.07      | 0,0215 |
| -   | P.04      | 0,0530 | +   | R.08      | 0,0709 |
| +   | P.05      | 0,0246 | +   | R.09      | 0,0387 |
| +   | E.01      | 0,0287 | +   | R.10      | 0,0293 |
| -   | E.02      | 0,0531 | +   | R.11      | 0,0267 |
| +   | E.03      | 0,0207 | +   | R.12      | 0,0303 |

A **Tabela 30** apresenta a classificação dos municípios em relação à segurança hídrica, de acordo com o índice de similaridade calculado pelo método TOPSIS. Os municípios com menor pontuação apresentaram maior segurança hídrica (**Figura 30**). Assim, quanto menor a pontuação, mais próximo o município está do cenário ideal de segurança hídrica, que é definido pelos melhores valores possíveis dos indicadores utilizados na análise.

**Tabela 30: Classificação dos municípios de acordo com o método TOPSIS.**

| Município                   | Índice de Similaridade | Classificação |
|-----------------------------|------------------------|---------------|
| <b>Mário Campos</b>         | 0,2317                 | 1°            |
| <b>São Joaquim de Bicas</b> | 0,2364                 | 2°            |
| <b>Juatuba</b>              | 0,2389                 | 3°            |
| <b>Betim</b>                | 0,4873                 | 4°            |
| <b>Brumadinho</b>           | 0,5949                 | 5°            |

**Figura 30: Classificação dos municípios em relação segurança hídrica.**



(Fonte: autoria própria, 2024)

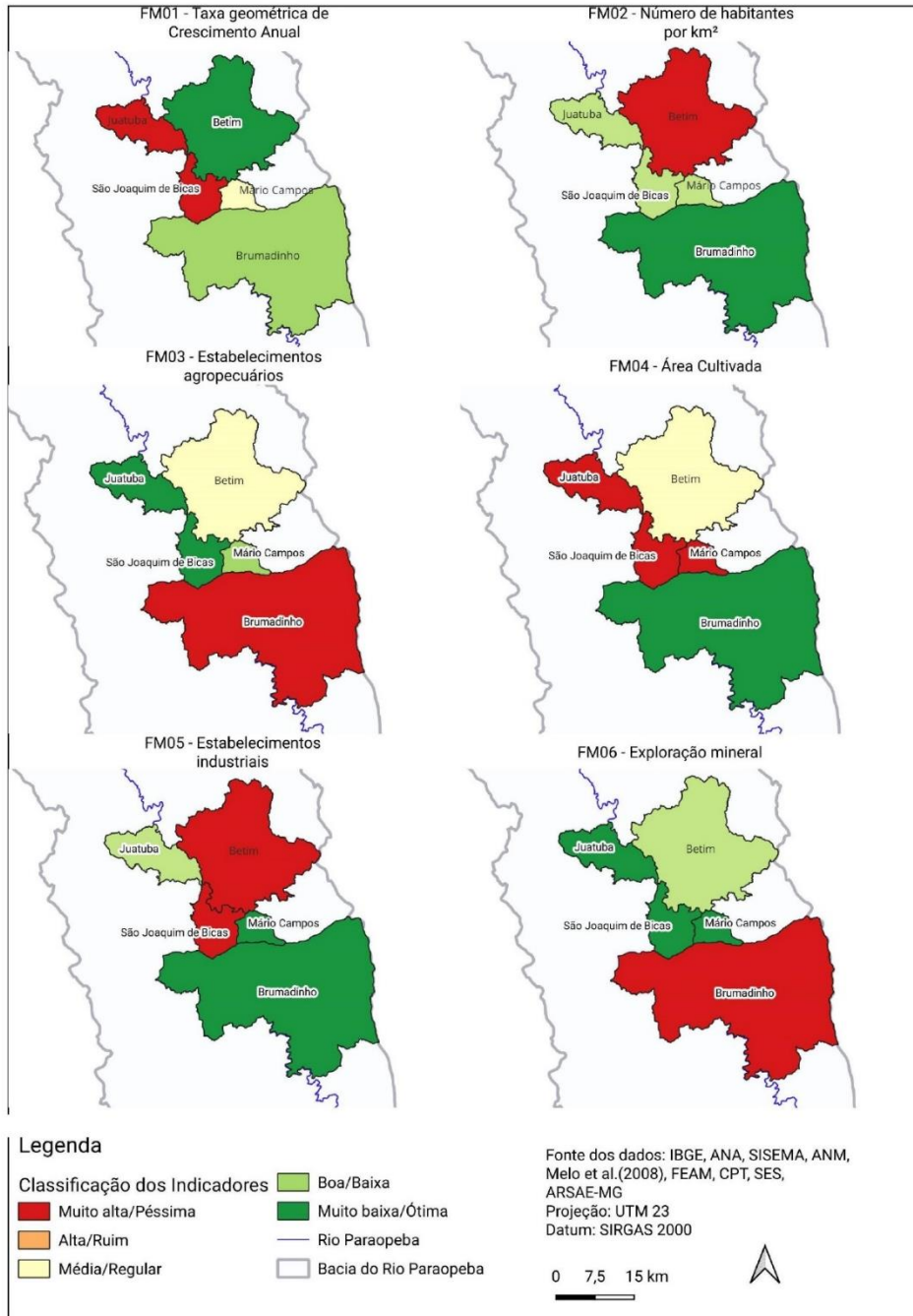
#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os indicadores foram selecionados com base no modelo FPEIR, que abrange indicadores de força, motriz, pressão, impacto e resposta. No modelo FPEIR, os indicadores de força, motriz e pressão foram classificados em cinco categorias, que representam a capacidade de cada indicador de influenciar a condição dos recursos hídricos. Em contraste, os indicadores de estado, impacto e resposta foram igualmente categorizados em cinco níveis, mas com foco em descrever a condição atual dos recursos hídricos. Para ambas as situações, os critérios de classificação foram definidos a partir dos dados disponíveis de cada município, levando em consideração os limites máximos e mínimos do conjunto das informações coletadas.

Considerando o relacionamento dos indicadores apresentados na **Tabela 31**, foi construída uma matriz para análise da situação da qualidade e quantidade das águas superficiais, subterrâneas e de abastecimento dos municípios em análise para entender como os indicadores atuam na porção média da bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP). Nas informações da **Figura 31**, **Figura 32**, **Figura 33**, **Figura 34** e **Figura 35** é possível visualizar os resultados dessa análise de cada indicador em relação aos municípios.

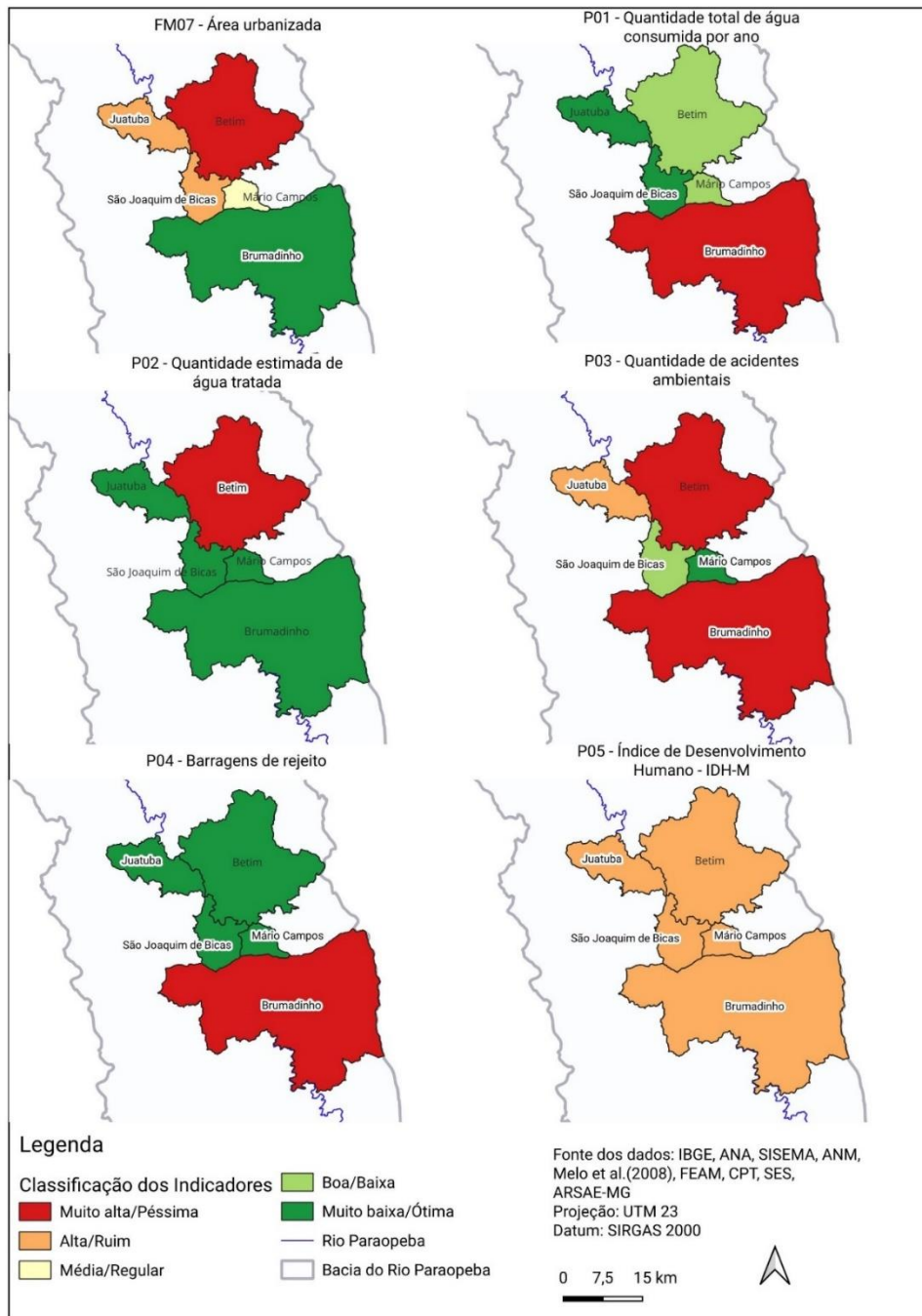
4.1 Análise da qualidade e quantidade das Águas na BHRP

Figura 31: Classificação dos indicadores de Força Motriz (FM1 – FM06).



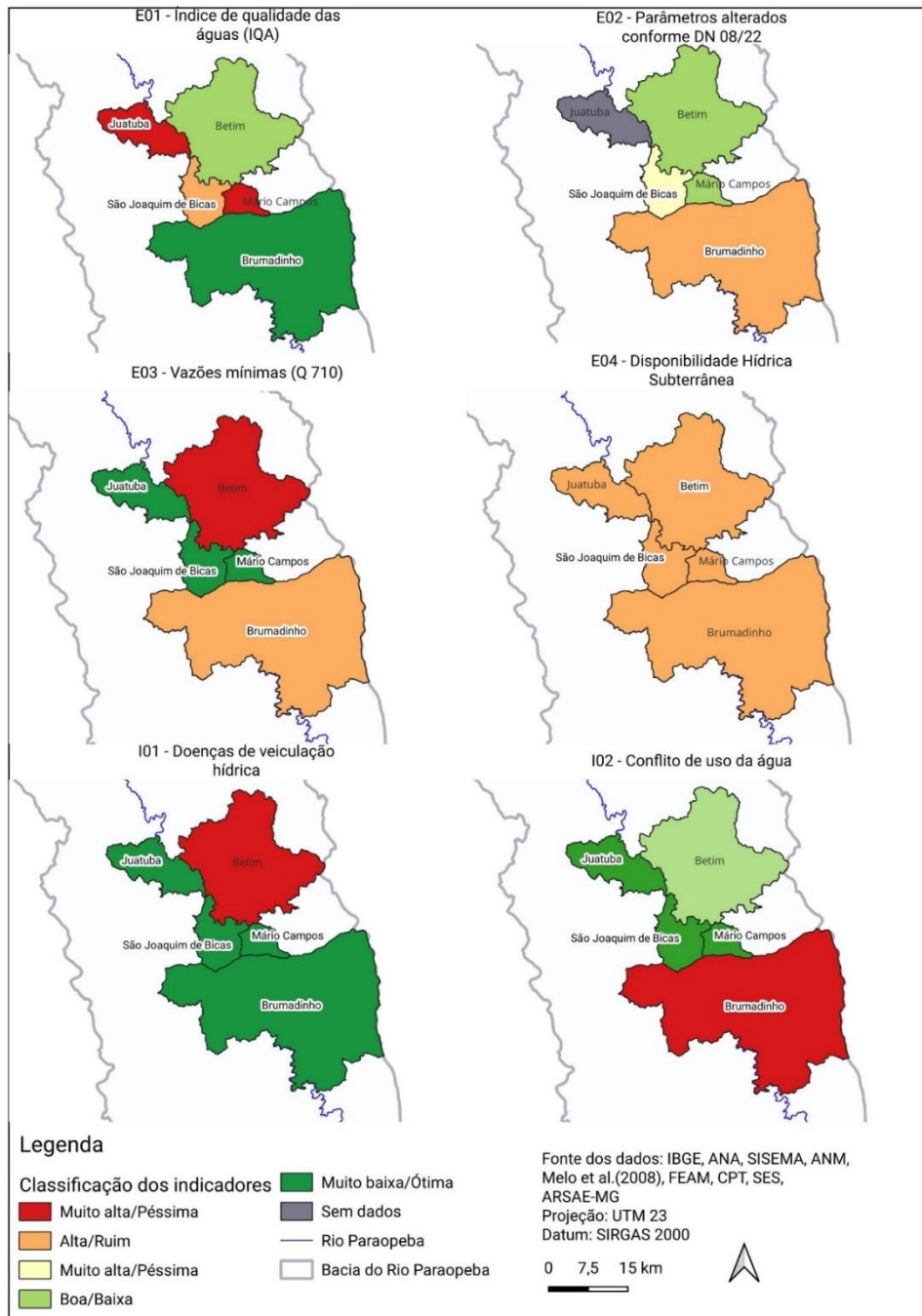
(Fonte: autoria própria, 2024)

**Figura 32: Classificação dos indicadores de Força Motriz (FM07) Pressão (P1 a P5).**



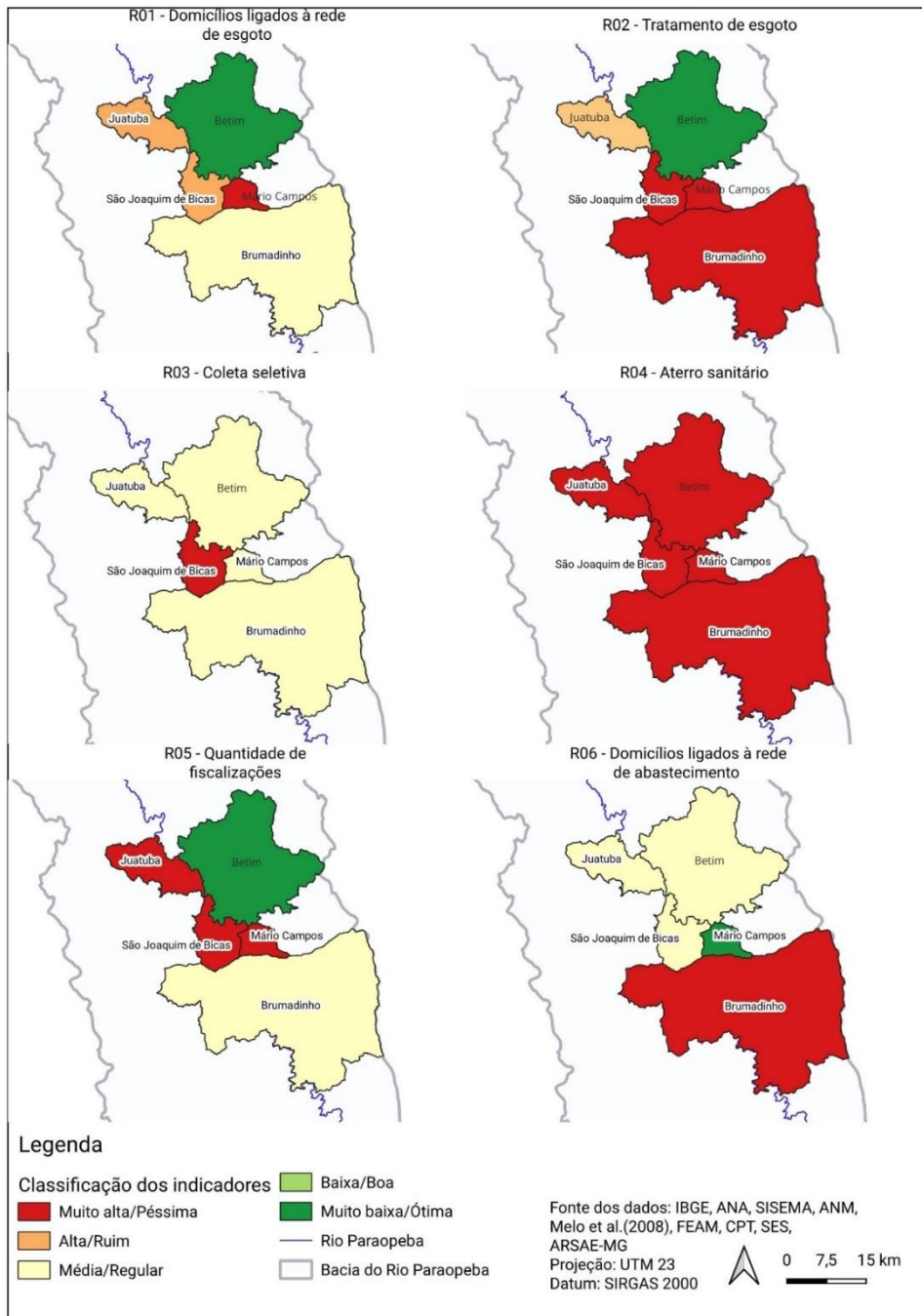
(Fonte: autoria própria, 2024)

**Figura 33: Classificação dos indicadores de Estado e Impacto.**



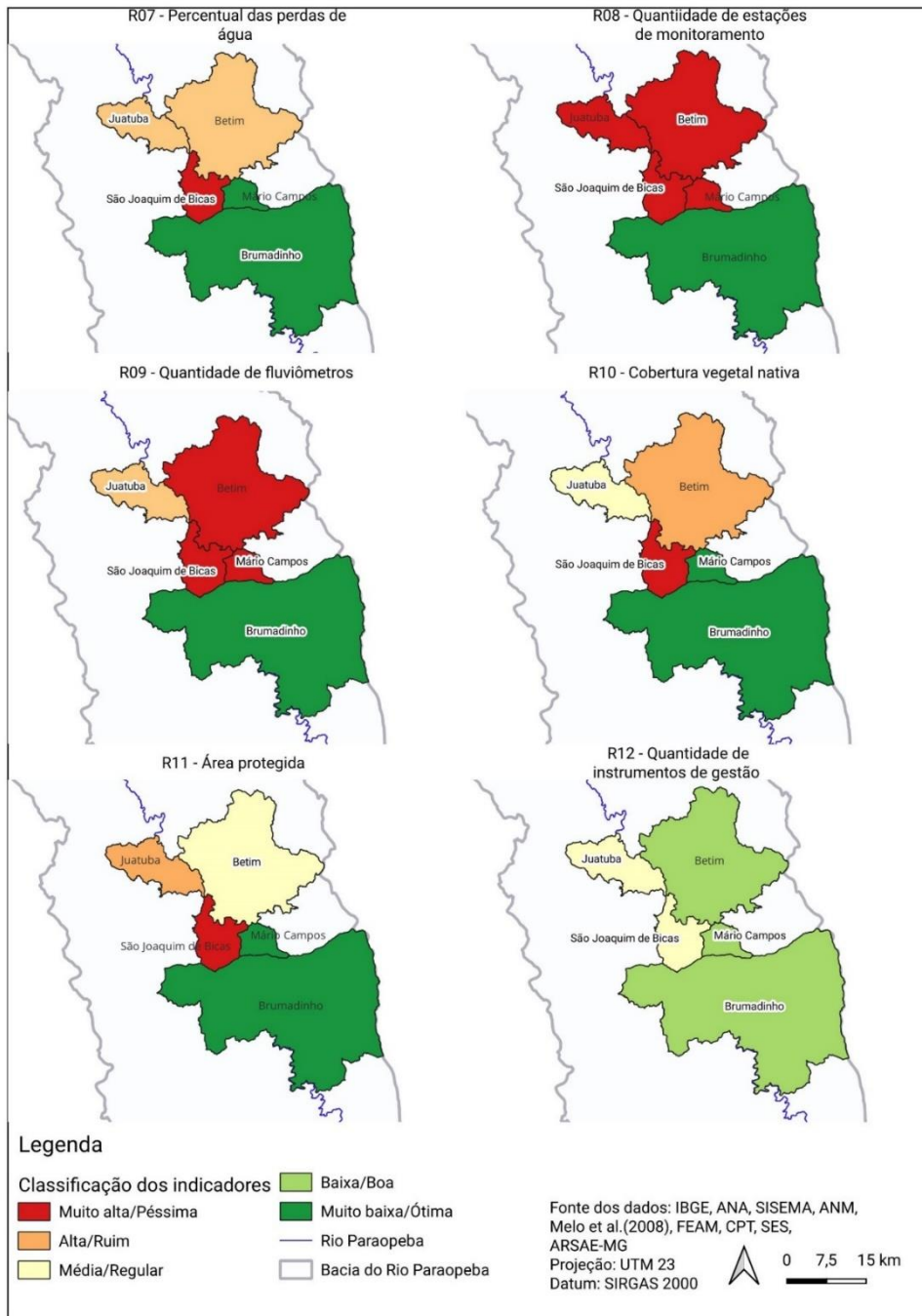
(Fonte: autoria própria, 2024)

**Figura 34: Classificação dos indicadores de Resposta (R01 – R06)**



(Fonte: autoria própria, 2024)

**Figura 35: Classificação dos indicadores de Resposta (R07 – R12)**



(Fonte: autoria própria, 2024)

**Tabela 31:** Indicadores de situação da qualidade e quantidade das águas.

| Indicador    |  |       | Unidade              | Betim         | Brumadinho     | Juatuba      | Mário Campos   | São Joaquim de Bicas |
|--------------|--|-------|----------------------|---------------|----------------|--------------|----------------|----------------------|
| Força motriz | Taxa geométrica de Crescimento Anual       | FM.01 | % a.a.               | 0,69          | 1,14           | 2,75         | 1,57           | 2,5                  |
|              | Número de habitantes por km <sup>2</sup>   | FM.02 | hab./km <sup>2</sup> | 1197,01       | 60,86          | 316,6        | 451,76         | 478,66               |
|              | Estabelecimentos agropecuários             | FM.03 | nº                   | 233           | 443            | 42           | 140            | 120                  |
|              | Área Cultivada                             | FM.04 | %                    | 47,64         | 43,54          | 52,76        | 53,02          | 49,82                |
|              | Estabelecimentos industriais               | FM.05 | nº                   | 48            | 20             | 27           | 13             | 52                   |
|              | Exploração mineral                         | FM.06 | nº                   | 123           | 306            | 32           | 35             | 66                   |
|              | Área urbanizada                            | FM.07 | %                    | 27,82         | 1,62           | 17,02        | 13,86          | 18,97                |
| Pressão      | Quantidade total de água consumida por ano | P.01  | m <sup>3</sup> /ano  | 87,03 milhões | 643,36 milhões | 1,90 milhões | 98,69 milhões  | 2,58 milhões         |
|              | Quantidade estimada de água tratada        | P.02  | m <sup>3</sup> /ano  | 19,16 bilhões | 2,56 bilhões   | 2,28 bilhões | 882,13 milhões | 2,76 bilhões         |
|              | Quantidade de acidentes ambientais         | P.03  | nº                   | 50            | 30             | 19           | 1              | 6                    |
|              | Barragens de rejeito                       | P.04  | nº                   | 3             | 24             | 0            | 3              | 0                    |
|              | IDH-M                                      | P.05  | -                    | 0,735         | 0,712          | 0,705        | 0,678          | 0,674                |
| Estado       | Índice de qualidade das águas (IQA)        | E.01  | -                    | 61,3          | 65,3           | 48,1         | 47,4           | 53,3                 |
|              | Parâmetros alterados conforme DN 08/22     | E.02  | nº                   | 2             | 4              | sd           | 2              | 3                    |
|              | Vazões mínimas (Q <sub>7 10</sub> )        | E.03  | nm <sup>3</sup> /ano | 0,2085        | 0,4256         | 1,0486       | 1,6805         | 1,4739               |
|              | Disponibilidade Hídrica Subterrânea        | E.04  | mm/ano               | 58,75         | 58,75          | 58,75        | 58,75          | 58,75                |
| Impacto      | Doenças de veiculação hídrica              | I.01  | nº                   | 125838        | 7353           | 6118         | 2946           | 2001                 |
|              | Conflito de uso da água                    | I.02  | nº                   | 8             | 32             | 3            | 0              | 8                    |

|          |  | Indicador                                  | Unidade | Betim | Brumadinho | Juatuba | Mário Campos | São Joaquim de Bicas |       |
|----------|--|--|---------|-------|------------|---------|--------------|----------------------|-------|
| Resposta |  | Domicílios ligados à rede de esgoto        | R.01    | %     | 76         | 50,6    | 32,39        | 13,8                 | 36,5  |
|          |  | Tratamento de esgoto                       | R.02    | %     | 76,4       | 10,7    | 29,89        | 9,9                  | 0     |
|          |  | Coleta seletiva                            | R.03    | %     | 1          | 1       | 1            | 1                    | 0     |
|          |  | Aterro sanitário                           | R.04    | -     | 1          | 1       | 1            | 1                    | 1     |
|          |  | Qtd. de fiscalizações                      | R.05    | nº    | 1721       | 833     | 226          | 169                  | 192   |
|          |  | Domicílios ligados à rede de abastecimento | R.06    | %     | 89         | 82,9    | 89,6         | 97,2                 | 90,9  |
|          |  | Percentual das perdas de água              | R.07    | %     | 50,9       | 31,8    | 55,3         | 34,7                 | 57,7  |
|          |  | Qtd. de estações de monitoramento          | R.08    | nº    | 4          | 199     | 3            | 7                    | 0     |
|          |  | Qtd. de fluviômetros                       | R.09    | nº    | 2          | 20      | 7            | 3                    | 1     |
|          |  | Cobertura vegetal nativa                   | R.10    | %     | 25,24      | 41,44   | 27,87        | 47,41                | 23,03 |
|          |  | Área protegida                             | R.11    | %     | 10,25      | 49,21   | 6,77         | 33,12                | 0,36  |
|          |  | Qtd. de instrumentos de gestão             | R.12    | nº    | 5          | 5       | 3            | 4                    | 3     |

(Fonte: autoria própria, 2024) sd: sem dados disponíveis

| Legenda | Estado/Impacto/Resposta (Situação do RH) | Ótima   | Boa         | Regular | Ruim  | Péssima |
|---------|--|---|-------------|---------|-------|---------|
|         |  | Força motriz/ pressão (capacidade de alterar o estado dos RH) | Muito Baixa | Baixa   | Média | Alta    |

#### 4.1.1 Diagnóstico da segurança hídrica na porção média da Bacia do Rio Paraopeba.

A análise das dinâmicas populacionais e econômicas nos municípios que compõem a Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP) revela um cenário complexo e desafiador para a gestão dos recursos hídricos. A combinação de crescimento populacional, intensa industrialização e expansão agropecuária, especialmente em áreas como Betim e Brumadinho, tem levado a um aumento considerável na demanda por água, ao mesmo tempo que potencializa os riscos de poluição e degradação dos recursos hídricos.

Para o diagnóstico foi realizada uma classificação dos municípios através do método TOPSIS, o que permitiu ordenar os municípios em relação aos indicadores de segurança hídrica. Essa análise gerou um ordenamento que reflete a segurança hídrica, sendo liderado por Mário Campos, São Joaquim de Bicas, Juatuba, seguido por Betim e Brumadinho, conforme mostra a **Tabela 30**. Os municípios em posições superiores apresentam uma melhor qualidade de segurança hídrica, com melhores índices de tratamento de esgoto, menor número de acidentes ambientais e melhor cobertura vegetal nativa. Abordar esses desafios específicos é essencial para melhorar a segurança hídrica e a qualidade de vida dos habitantes. Os municípios com as piores classificações apresentam maior insegurança hídrica devido a altos índices de acidentes ambientais, doenças de veiculação hídrica, perda de água e baixa taxa de tratamento de esgoto, como pode ser conferido nos valores dos indicadores por município na **Tabela 31**.

A seguir, é apresentada uma análise detalhada de cada município, destacando os indicadores que mais influenciaram a classificação, tanto os que contribuíram negativamente quanto os que mitigaram os impactos na segurança hídrica.

Na última posição está Brumadinho, o município apresenta diversos fatores que contribuem para sua baixa classificação em relação à segurança hídrica. Um exemplo é o indicador de estações de monitoramento, onde Brumadinho possui o maior quantitativo (199). Esse indicador é de extrema importância para a segurança hídrica, especialmente após o rompimento da barragem do Córrego do Feijão. Apesar de ser considerado como um bom indicador, ele é preocupante dentro do conjunto dos dados, pois essas estações foram instaladas devido à reparação ambiental que a região está sujeita para monitorar os danos causados pelo rompimento da barragem e para saná-los ou mitigá-los.

Em relação ao indicador de doenças de veiculação hídrica (7.353), Brumadinho também merece grande atenção, sendo o segundo município com a maior incidência dessas doenças.

Isso é de extrema importância, pois a ocorrência dessas doenças reflete diretamente problemas na qualidade do saneamento e no acesso a água potável segura, impactando negativamente a saúde pública e a segurança hídrica da região. Quando se consideram esses indicadores de coleta (50,6%) e tratamento de esgoto sanitário (10,7%), Brumadinho apresenta desempenho bom e péssimo, respectivamente.

O município também se destaca negativamente quando se trata de parâmetros alterados conforme a DN08 de 2022. Brumadinho teve a maioria dos parâmetros alterados, conforme mostrado na **Tabela 17**, o que afeta significativamente a segurança hídrica da região.

A exploração mineral intensa, 306 processos minerários ativos, exerce grande pressão sobre os recursos hídricos. A quantidade de barragens de rejeito (24) também representa um risco significativo, aumentando a probabilidade de desastres ambientais. No contexto de Brumadinho, elas possuem um peso muito relevante na análise da segurança hídrica. Essas barragens, especialmente considerando o rompimento da barragem do Córrego do Feijão dentro do município, são um exemplo claro do grande risco de contaminação que estruturas como essas podem causar para os recursos hídricos.

A análise se mostra consistente ao considerar Brumadinho como o município com o pior índice de segurança hídrica. Além dos dados já apresentados, observa-se que Brumadinho lidera em vários aspectos críticos: é o município com a maior quantidade de estabelecimentos agropecuários (443). Brumadinho também possui a maior demanda total de água (643,36 milhões m<sup>3</sup>/ano) e é o maior consumidor de água na região, devido ao grande consumo de água para agricultura e mineração. Além desses indicadores, o município também apresenta uma eficiência no abastecimento hídrico de (31,8%), dentro do conjunto de dados foi classificada como ótima, contudo, em conjunto com a alta demanda, caracteriza um potencial problema de segurança hídrica em futuros cenários de mudanças climáticas, podendo resultar em escassez de água. Principalmente ao observar o indicador E04, que é a lâmina explotável (LE) (mm/ano), constata-se que ela é alta para todos os municípios, indicando uma grande exploração de água subterrânea no território. Isso pode acarretar uma vulnerabilidade significativa.

Em termos de pontos positivos, Brumadinho apresenta uma quantidade significativa de água tratada (2,56 bilhões m<sup>3</sup>/ano), bem como, um bom nível de cobertura vegetal (41.44%). O município também tem áreas protegidas por unidades de conservação (49.21%), o que ajuda a mitigar alguns dos riscos ambientais.

A análise se mostra consistente ao considerar Betim como o segundo município com o pior desempenho em segurança hídrica. Betim enfrenta alta insegurança hídrica devido a vários fatores críticos. O município de Betim experimentou uma alta taxa de crescimento populacional na década de 1990, devido à atração de novas indústrias. No entanto, essa taxa desacelerou significativamente até 2022. Apesar dessa desaceleração, Betim possui a densidade demográfica mais alta da região com 1.197,01 habitantes por km<sup>2</sup>. A combinação de uma densidade elevada com um crescimento populacional que ainda é positivo sugere uma pressão contínua sobre os recursos hídricos, tanto em termos de demanda quanto de poluição potencial por efluentes urbanos e industriais.

A elevada quantidade de estabelecimentos agropecuários (233) em Betim e o fato de 47,64% do território ser de área cultivada pressionam significativamente os recursos hídricos locais. A agricultura intensiva e a agropecuária demandam grandes volumes de água para irrigação e manejo de animais, aumentando o risco de escassez hídrica e poluição das fontes de água. Essa situação compromete a segurança hídrica, afetando o abastecimento humano e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos da região.

A elevada quantidade de estabelecimentos agropecuários (233) e industriais (48) em Betim, junto com a exploração mineral intensa (123 processos ativos) e a presença de barragens (3), pressiona severamente os recursos hídricos locais. A demanda excessiva por água e o risco de contaminação comprometem a segurança hídrica, afetando o abastecimento humano e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos. Essas atividades elevam o risco de escassez hídrica e poluição, tornando urgente a adoção de políticas de gestão sustentável.

Betim enfrenta uma significativa pressão sobre os recursos hídricos devido ao alto consumo de água (87,03 milhões m<sup>3</sup>/ano) e ao tratamento de grandes volumes (19,16 bilhões m<sup>3</sup>/ano). A combinação de atividades agropecuárias, industriais, mineração intensa e barragens, aliada à elevada demanda hídrica, compromete a segurança hídrica, aumentando o risco de escassez e poluição das fontes de água. Essas condições ameaçam o abastecimento humano e a sustentabilidade dos ecossistemas aquáticos, exigindo uma gestão hídrica eficiente e sustentável.

O município de Betim apresentou o maior número de acidentes ambientais (50) entre 2014 e 2022, evidenciando a necessidade de uma fiscalização mais rigorosa em atividades potencialmente poluidoras para evitar riscos aos recursos hídricos. Apesar de terem sido realizadas 1721 fiscalizações de 2006 a 2023, esses esforços ainda podem ser aprimorados para

prevenir acidentes e garantir a proteção das fontes de água, essenciais para o abastecimento e a sustentabilidade ambiental.

Betim lidera no quantitativo de doenças de veiculação hídrica (125.838), especialmente dengue (116.678), possivelmente devido a deficiências no saneamento básico, manejo inadequado de resíduos sólidos e falta de infraestrutura de drenagem urbana. Embora os indicadores de coleta de efluentes sanitários (76%), tratamento (76,4%) e disposição adequada de resíduos sólidos e coleta seletiva mostrem ótimo desempenho, a proliferação de mosquitos transmissores continua sendo um desafio. Nesse sentido, é necessário intensificar ações de educação ambiental e controle de vetores, além de aprimorar a infraestrutura urbana para reduzir esses casos.

Betim apresenta um desempenho insatisfatório na eficiência do abastecimento público (50,90%), com grandes perdas de água ao longo do processo. Essa ineficiência é atribuída à gestão inadequada da concessionária COPASA, responsável pelo atendimento no município. Isso é preocupante, especialmente devido à grande demanda de água no município, levantando a necessidade urgente de melhorias na infraestrutura e na gestão dos recursos hídricos. A redução das perdas é crucial para garantir a disponibilidade de água para a população e para atividades econômicas, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental e a segurança hídrica do município.

São Joaquim de Bicas enfrenta desafios significativos em relação à segurança hídrica, embora menos graves que Brumadinho e Betim. A densidade demográfica (478,66 hab./km<sup>2</sup>) e o crescimento populacional (2.5% a.a.) aumentam a demanda por recursos hídricos. O município trata 2,76 bilhões m<sup>3</sup> de água por ano, mas a alta perda de água (57.7%) é preocupante. Essas perdas indicam ineficiências no sistema de distribuição, comprometendo a disponibilidade de água e aumentando os custos operacionais. Melhorias na infraestrutura e na gestão hídrica são essenciais para garantir a sustentabilidade e atender à crescente demanda.

A ausência de tratamento de esgoto (0%) é crítica e impacta diretamente a saúde pública em São Joaquim de Bicas. A baixa taxa de coleta regular de esgoto (36,5%) e a falta de coleta seletiva agravam a situação. As doenças de veiculação hídrica (2001 casos) refletem esses problemas de saneamento. A combinação desses fatores resulta em sérios riscos à saúde e à qualidade de vida da população, destacando a necessidade urgente de melhorias na infraestrutura de saneamento e na gestão dos resíduos sólidos para proteger os recursos hídricos e a saúde pública.

São Joaquim de Bicas possui uma base agrícola significativa com 120 estabelecimentos agropecuários e uma expressiva proporção de área cultivada (49,82%) do seu território. A predominância de atividades agrícolas ressalta a importância do setor para a economia local. Contudo, essa grande área cultivada pode aumentar a pressão sobre os recursos hídricos, demandando uma gestão eficiente e sustentável da água para garantir a continuidade das atividades agrícolas e a preservação ambiental.

São Joaquim de Bicas possui uma cobertura vegetal nativa de 23,03% e áreas protegidas que correspondem a apenas 0,36% do território total. A relativamente baixa proporção de áreas protegidas sugere uma necessidade urgente de ampliar as zonas de conservação para preservar a biodiversidade e proteger os recursos naturais. A manutenção e ampliação da cobertura vegetal nativa são requisitos essenciais para a sustentabilidade ambiental, ajudando a regular o ciclo da água, proteger o solo e contribuir para a qualidade dos recursos hídricos.

Em quarto lugar, Juatuba enfrenta alguns desafios, embora em menor escala. A quantidade de acidentes ambientais (19) e os casos de doenças de veiculação hídrica (6118) são preocupantes e indicam a necessidade de melhorias na gestão ambiental e no saneamento básico. A baixa taxa de tratamento de esgoto (29,89%) afeta diretamente a saúde pública, contribuindo para a propagação de doenças. Além disso, a alta perda de água (55,3%) durante a distribuição revela ineficiências na infraestrutura hídrica, resultando em desperdício significativo. O aumento da área urbanizada (17,02%) também exerce pressão adicional sobre os recursos hídricos, exigindo um planejamento urbano sustentável. Esses fatores combinados ressaltam a necessidade de uma abordagem integrada para melhorar a gestão dos recursos hídricos, aumentar a eficiência do sistema de distribuição de água e ampliar o tratamento de esgoto, visando garantir a sustentabilidade ambiental e a qualidade de vida da população.

Juatuba tem uma quantidade significativa de água tratada (2,28 bilhões m<sup>3</sup>/ano), o que é essencial para atender às necessidades da população. A alta taxa de domicílios ligados à rede de abastecimento (89,6%) reflete um bom nível de acesso à água potável, garantindo melhores condições de vida para os moradores. No entanto, é crucial continuar aprimorando a infraestrutura para reduzir perdas e melhorar a eficiência no uso dos recursos hídricos, além de expandir o tratamento de esgoto para proteger a saúde pública e o meio ambiente.

Em quinto lugar, Mário Campos enfrenta alguns desafios menores. As doenças de veiculação hídrica (2946 casos) representam um problema significativo, refletindo deficiências

no saneamento básico. A taxa de tratamento de esgoto é muito baixa (9,9%), o que agrava a situação de saúde pública e aumenta o risco de contaminação dos recursos hídricos.

As perdas de água em Mário Campos (34,7%) são elevadas, evidenciando ineficiências na rede de distribuição que resultam em desperdício significativo de recursos hídricos. Além disso, o aumento da área urbanizada (13,86%) representa desafios adicionais para a segurança hídrica, pois a urbanização intensifica a demanda por água e pode comprometer a capacidade de abastecimento e a qualidade dos recursos hídricos.

Mário Campos destaca-se positivamente em vários aspectos. A cobertura vegetal nativa é alta (47,41%), contribuindo para a sustentabilidade e proteção dos ecossistemas. A quantidade de água tratada (882,13 milhões m<sup>3</sup>/ano) é significativa, garantindo o abastecimento da população. Além disso, as áreas protegidas (33,12%) refletem um forte compromisso com a preservação e o monitoramento dos recursos hídricos. Esses fatores mostram que Mário Campos está investindo na conservação ambiental e na gestão eficiente dos recursos hídricos, o que é essencial para a sustentabilidade a longo prazo.

Uma análise dos indicadores de segurança hídrica na porção média da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), representada pelos municípios de Betim, Brumadinho, Juatuba, Mário Campos e São Joaquim de Bicas, destacou o crescimento populacional, a densidade demográfica e atividades ligadas à agricultura como as principais fontes de pressão sobre a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. Uma análise dos indicadores de segurança hídrica na porção médio da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba (BHRP), representada pelos municípios de Betim, Brumadinho, Juatuba, Mário Campos e São Joaquim de Bicas, destacou o crescimento populacional, a densidade demográfica e atividades ligadas à agricultura como as principais fontes de pressão sobre a qualidade e quantidade dos recursos hídricos. A urbanização acelerada contribui significativamente para as pressões nos recursos hídricos, aumentando a demanda e poluição das fontes de água. Para mitigar essas pressões, é essencial implementar tecnologias de reuso de água, desenvolver infraestrutura verde, adotar políticas de gestão sustentável e promover a conscientização pública sobre a importância da conservação hídrica e do uso racional da água.

A agricultura intensiva, mesmo em áreas menos extensas de cultivo, contribui significativamente para a contaminação dos recursos hídricos devido ao uso indevido de fertilizantes e pesticidas. Esse uso pode resultar em salinização e acumulação de metais pesados

nas águas superficiais e subterrâneas, com consequências negativas para os ecossistemas aquáticos.

Para mitigar a contaminação hídrica causada pela agricultura intensiva, recomenda-se adotar práticas agrícolas sustentáveis, como a rotação de culturas, o uso de fertilizantes orgânicos e a adoção de sistemas de irrigação eficientes para reduzir o desperdício de água e a lixiviação de químicos. A pesquisa de ZHANG, X. *et al.*, (2022) avaliou os efeitos de fertilizantes químicos e orgânicos sustentáveis com práticas de economia de água na produção de milho e nas características do solo. Os resultados mostraram que a integração de fertilizantes químicos e orgânicos com irrigação economizadora de água melhora significativamente a saúde do solo e a produtividade das culturas, garantindo a segurança dos recursos hídricos.

A criação de barreiras vegetativas ao redor das áreas de cultivo pode ajudar a filtrar os poluentes antes que eles alcancem os corpos d'água, além de preservar as matas ciliares e áreas de proteção permanente são técnicas de preservação que se mostram muito eficientes. No estudo realizado por RAMIÃO *et al.*, (2022), a modelagem adotada indicou a eficácia de práticas agrícolas sustentáveis na redução de sedimentos e exportação de nutrientes de uma bacia hidrográfica. Os resultados do estudo mostraram que práticas agrícolas sustentáveis podem reduzir substancialmente a exportação de sedimentos e nutrientes, com o maior esgotamento médio combinado de sedimentos, fósforo e nitrato (25%) alcançado quando a incorporação de fertilizantes, cultivo de conservação e faixas de filtro para retenção de sedimentos foram postas em prática simultaneamente. Não menos importante, monitorar regularmente a qualidade da água e educar os agricultores sobre práticas sustentáveis são passos essenciais para proteger os recursos hídricos e os ecossistemas aquáticos locais.

A presença marcante de atividades industriais e de mineração, especialmente em Betim e Brumadinho, introduz contaminações adicionais por resíduos industriais e rejeitos de mineração. Essas atividades podem gerar drenagem ácida de minas e liberar metais pesados, intensificando os riscos ambientais. Prevenir a drenagem ácida de minas é crucial para mitigar os danos ambientais causados pela mineração. Diversas tecnologias de tratamento foram desenvolvidas, incluindo neutralização química, troca iônica e biorremediação, mas enfrentam limitações como baixa eficácia e contaminação secundária (SIMATE, 2021). Estratégias de curto prazo envolvem o controle da migração de contaminantes através da adição de materiais alcalinos, como cal e calcário, focando na remoção de metais e sulfatos (LI *et al.*, 2018). No entanto, a prevenção a longo prazo é mais promissora, focando no controle da fonte por meio

da remoção e encapsulamento de minerais de risco com camadas impermeáveis (SIMATE, 2021).

O desastre do rompimento da barragem do Córrego do Feijão em Brumadinho é um exemplo extremo desses riscos, destacando as severas consequências de práticas inadequadas de gestão ambiental que resultaram em destruição ampla e poluição dos corpos hídricos. Para mitigar danos a médio e longo prazo decorrentes do rompimento de uma barragem, são necessárias diversas medidas. Na esfera humana, é essencial o reassentamento, apoio psicossocial e monitoramento da saúde pública. Na esfera ambiental, deve-se focar na remediação ambiental, reflorestamento e proteção da biodiversidade. Na esfera social, é crucial o engajamento comunitário, reintegração social e oferecimento de educação e capacitação. Na esfera econômica, investimentos em infraestrutura, desenvolvimento econômico e a criação de seguros e fundos de emergência são fundamentais para a recuperação e resiliência das áreas afetadas. O Plano Estadual de Segurança de Barragens é vital para prevenir rompimentos, especialmente em Minas Gerais, onde a fiscalização e manutenção rigorosas são essenciais para garantir a segurança hídrica e ambiental.

Os dados de qualidade das águas do Rio Paraopeba refletem essa situação preocupante, com variações na quantidade de parâmetros alterados conforme a DN 08/22 (COPAM, 2022), que evidenciam a degradação dos recursos hídricos. Betim e Mário Campos apresentam duas alterações cada, Brumadinho quatro e São Joaquim de Bicas três. Essas alterações indicam a deterioração da qualidade da água, atribuída à influência negativa das práticas agrícolas, industriais e urbanas (FEAM, 2024).

As respostas atuais para mitigar essas pressões têm sido insuficientes, como demonstram os impactos contínuos na saúde humana e no ambiente. A eficácia das políticas e práticas de gestão dos recursos hídricos, como o tratamento de efluentes e a gestão de resíduos sólidos, precisa ser ampliada para enfrentar esses desafios de forma mais efetiva. As doenças de veiculação hídrica e os conflitos pelo uso da água refletem diretamente os problemas emergentes. Para melhorar essa situação, é crucial fortalecer as políticas de gestão dos recursos hídricos, pondo em prática e atualizando planos como o Plano Municipal de Saneamento Básico, Plano Diretor de Recursos Hídricos da BHRP e o Plano Estadual de Segurança de Barragens. A integração e eficácia dessas políticas são fundamentais para mitigar os impactos negativos sobre a qualidade da água e para promover um desenvolvimento mais sustentável na região.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo teve como principal objetivo investigar a contribuição do modelo FPEIR no diagnóstico da segurança hídrica do médio curso do Rio Paraopeba, MG. Através de uma metodologia interdisciplinar, buscou-se entender as dinâmicas de pressão e resposta dentro da bacia hidrográfica, avaliando como fatores socioeconômicos e ambientais influenciam a gestão dos recursos hídricos.

Este trabalho contribuiu para o campo da gestão de recursos hídricos ao demonstrar a aplicabilidade do modelo FPEIR em contextos complexos e multidimensionais como a BHRP, oferecendo uma base para o desenvolvimento de políticas públicas e para a adoção de estratégias de gestão que considerem uma visão holística do ambiente. O estudo reiterou a importância de abordagens integradas como o modelo FPEIR em conjunto com um método de análise multicritério, como o TOPSIS, para o diagnóstico e gestão da segurança hídrica. A compreensão aprofundada das forças motrizes e pressões sobre o ambiente e os recursos hídricos pode orientar respostas mais efetivas e sustentáveis, cruciais para proteger os recursos hídricos vitais para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região.

Os resultados demonstraram que o modelo FPEIR é eficaz para correlacionar às interações entre atividades humanas e a saúde ambiental, permitindo a identificação clara de forças motrizes e pressões que impactam a segurança hídrica. A aplicação de indicadores específicos facilitou a análise do estado atual dos recursos hídricos, destacando áreas críticas que necessitam de intervenção para mitigar riscos de contaminação e escassez. A interpretação dos dados dos indicadores confirmou que pressões intensas, como o aumento da atividade industrial e mineradora, além do uso intensivo da terra, estão degradando significativamente a qualidade da água na região. Isso sugere que as respostas atuais, embora bem-intencionadas, são insuficientes e requerem reforço através de políticas públicas mais robustas e engajamento comunitário mais efetivo.

Os municípios de Brumadinho, Betim, Juatuba, São Joaquim de Bicas e Mário Campos foram avaliados quanto à segurança hídrica utilizando o método TOPSIS, considerando indicadores críticos e a presença de planos de gestão. Brumadinho lidera o ranking devido à sua robusta infraestrutura de segurança hídrica. A alta quantidade de água tratada e um número significativo de fiscalizações garantem um controle rigoroso dos recursos. A presença de cinco

dos seis planos de gestão (PMGIRS, PMSB, PSH-RMBH, PD, PNRH) reforça seu compromisso com a segurança hídrica, ajudando a mitigar problemas relacionados à gestão de resíduos e saneamento. Betim ocupa a segunda posição com alta capacidade de tratamento de água e a maior densidade populacional. A adoção de cinco planos de gestão, incluindo PMGIRS, PMSB, PSH-RMBH, PD e PNRH, é crucial para manter a infraestrutura hídrica robusta e a saúde pública, garantindo uma gestão eficiente dos recursos.

Juatuba está em terceiro lugar, destacando-se pelo rápido crescimento e alta cobertura de abastecimento. No entanto, enfrenta desafios no tratamento de esgoto. A adoção de mais planos de gestão, além dos existentes PSH-RMBH, PD e PNRH, é essencial para melhorar a sustentabilidade hídrica e o saneamento básico. São Joaquim de Bicas, na quarta posição, tem uma alta capacidade de tratamento de água e excelente cobertura de abastecimento. Contudo, precisa melhorar no saneamento básico. A adoção dos planos PSH-RMBH, PD e PNRH já contribuiu significativamente, mas a implementação de mais planos pode abordar eficazmente os desafios de saneamento e gestão de resíduos.

Por fim, Mário Campos, em quinto lugar, possui uma excelente cobertura de abastecimento de água e significativa cobertura vegetal nativa. No entanto, enfrenta desafios críticos no saneamento, com apenas uma pequena parte dos domicílios ligados à rede de esgoto. A presença de quatro planos de gestão (PMSB, PSH-RMBH, PD, PNRH) é vital para melhorar a gestão hídrica e sanitária, indicando áreas de necessidade para a adoção de mais planos.

A adoção e implementação de planos de gestão como PMGIRS (Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos), PMSB (Plano Municipal de Saneamento Básico), PDDMA (Plano Diretor de Desenvolvimento Municipal), PSH-RMBH (Plano de Segurança Hídrica da Região Metropolitana de Belo Horizonte), PD (Plano Diretor) e PNRH (Plano Nacional de Recursos Hídricos) são fundamentais para a segurança hídrica dos municípios. Estes planos proporcionam um quadro estruturado para abordar questões críticas de gestão de água, saneamento e resíduos, essencial para a sustentabilidade a longo prazo e a mitigação dos principais problemas enfrentados por cada município.

O estudo enfrentou limitações relacionadas à acessibilidade de dados de longo prazo e à falta de indicadores específicos sobre as dinâmicas locais, como o fornecimento de água mineral e por caminhão-pipa pela empresa Vale S.A., após o rompimento da barragem, como uma medida de mitigação dos danos enquanto a água do Rio Paraopeba continua imprópria para consumo. Até 2022, a Vale S.A havia fornecido cerca de 3,9 bilhões de litros de água para

a população ribeirinha, 100 caminhões-pipa transitando diariamente para entrega emergencial de água entre medidas definitivas e emergenciais (VALE S.A, 2022). Apesar de ser uma prática conhecida nos territórios atingidos, esses dados não são disponibilizados por município. Outro indicador que agregaria valor à análise e refinaria os resultados seria o quantitativo de ribeirinhos e pescadores que abandonaram suas atividades devido à proibição do uso da água bruta do Rio Paraopeba.

Essas lacunas dificultaram uma avaliação mais precisa de algumas respostas e estratégias de gestão adotadas na região. Pesquisas futuras poderiam se aprofundar nas dinâmicas locais e coletar dados primários sobre indicadores que tratem mais detalhadamente o contexto da segurança hídrica para a população atingida nos municípios da Bacia do Rio Paraopeba. De forma complementar, a pesquisa poderia ser expandida para aplicação do modelo FPEIR a outros municípios da bacia. Além disso, seria valioso desenvolver metodologias que integrem melhor a variabilidade climática e os impactos antropogênicos de longo prazo.

Em suma, para enfrentar os desafios identificados na segurança hídrica da Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, é essencial adotar estratégias de resposta robustas e inovadoras. Primeiramente, é crucial aprimorar a infraestrutura de captação e tratamento de água. Adotar tecnologias avançadas de tratamento e expandir os sistemas de reuso de água tratada para irrigação agrícola e processos industriais pode reduzir significativamente a pressão sobre os recursos hídricos naturais.

Em segundo lugar, a gestão integrada dos recursos hídricos deve ser fortalecida. Isso envolve planejamento e gestão participativos, garantindo a ativa participação de todos os atores do processo, incluindo comunidades locais, indústrias e agricultores. A utilização de dados e análises científicas para fundamentar decisões políticas assegura que as medidas adotadas sejam baseadas nas melhores práticas e evidências disponíveis.

Além disso, políticas de sustentabilidade e educação ambiental são fundamentais. Pôr em prática programas educacionais focados na conservação da água e oferecer incentivos fiscais para práticas sustentáveis são medidas que podem promover uma mudança significativa no uso dos recursos hídricos. A restauração ecológica e a proteção de ecossistemas aquáticos também são essenciais. Projetos de reflorestamento nas áreas degradadas e a criação de áreas protegidas ao longo dos rios e reservatórios ajudarão a melhorar a infiltração de água no solo, reduzir a erosão e manter a qualidade da água.

O monitoramento e a avaliação contínuos da qualidade e quantidade da água através de sistemas avançados e tecnologias de automação permitem uma gestão eficaz. Avaliações periódicas dos impactos das atividades humanas são necessárias para ajustar políticas e estratégias de modo a mitigar impactos negativos efetivamente.

Por fim, é imprescindível adaptar-se às mudanças climáticas. Integrar modelos climáticos nas decisões de gestão dos recursos hídricos e construir infraestrutura hídrica resiliente asseguram a segurança hídrica mesmo em condições climáticas adversas. Com a adoção dessas estratégias, espera-se não apenas melhorar a gestão dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Paraopeba, mas também garantir uma qualidade de vida melhor para as comunidades locais e preservar o meio ambiente para as futuras gerações.

## REFERÊNCIAS

- ACOSTUPA, Y. *et al.* Aplicación de la metodología FPEIR al diagnóstico ambiental del Humedal Lucre-Huacarpay, 2017. **Yachay - Revista Científico Cultural**, v. 6, n. 01, p. 90–114, 26 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.36881/yachay.v6i01.33> Acesso em: mar. 2023
- AEDAS - Associação Estadual de Defesa Ambiental e Social Núcleo de Assessoria às Comunidades Atingidas por Barragens (NACAB), Instituto Guaicuy, e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC Minas). (2020). **Relatório Preliminar da Situação de Acesso à Água pelas Comunidades da Bacia do Paraopeba**. Novembro, 2020. Disponível em: [https://portal.pucminas.br/imagedb/documento/DOC\\_DSC\\_NOME\\_ARQUI20201127144630.pdf](https://portal.pucminas.br/imagedb/documento/DOC_DSC_NOME_ARQUI20201127144630.pdf) Acesso em: jun. 2023.
- ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Índice de Segurança Hídrica – ISH: Manual metodológico**, volume I. Agência Nacional de Águas (Brasil). Brasília: ANA, 2019. Disponível em: [https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia\\_ISH.pdf](https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/c349dc5a-0c01-4f14-9519-e3340fef2c66/attachments/Metodologia_ISH.pdf). Acesso em: jan. 2023
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, ANA. **ODS 6 no Brasil: Visão da ANA sobre os indicadores**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019a. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/ods6>. Acesso em: jan. 2023
- \_\_\_\_\_. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2019: informe anual**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019b. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: jan. 2023
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO, ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília: ANA, 2020. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>. Acesso em: jan. 2023
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM. **Cadastro Nacional de Barragens de Mineração**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Mapa> Acesso em: dez. 2023
- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM. **Processos minerários ativos**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://geo.anm.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=6a8f5ccc4b6a4c2bba79759aa952d908> Acesso em: dez. 2023
- AIRES, R. F. DE F.; SALGADO, C. C. R. A TOPSIS-Based Multicriteria Approach for Reservoir Assessment. *Sociedade & Natureza*, v. 36, n. e70948, p. 14, 2024. <https://doi.org/10.14393/SN-v36-2024-70948>.
- AKBARI, M.; MEMARIAN, H.; NEAMATOLLAHI, E.; JAFARI SHALAMZARI, M.; ALIZADEH NOUGHANI, M.; ZAKERI, D. Prioritizing policies and strategies for desertification risk management using MCDM–DPSIR approach in northeastern Iran.

**Environment, Development and Sustainability**, v. 23, n. 2, p. 2503–2523, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00684-3>. Acesso em: jul. 2023.

\_\_\_\_\_. AKBAR, H. *et al.* Comprehensive review of groundwater scarcity, stress, and sustainability index-based assessment. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 18, p. 100782, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100782> Acesso em: 10 de mar. 2023.

ALEXAKIS, D. E. Linking DPSIR Model and Water Quality Indices to Achieve Sustainable Development Goals in Groundwater Resources. **Hydrology**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 90, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/hydrology8020090> Acesso em: 10 de mar. 2023.

ALMEIDA, G. C. *et al.* Morphometric characterization of the Alto does Ipojuca hydrographic basin. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 12, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.29150/2237-2202.2022.251977> Acesso em: jun. 2023

ARAÚJO, M. D. de; RIBEIRO, M. M. R.; BRAGA, C. F. C. Integrando a modelagem da alocação de água ao sistema de indicadores FPEIR: aplicação ao semiárido do Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, n. 6, p. 1167–1181, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019184425>. Acesso em: jul. 2023.

ARMBH, Agência de Desenvolvimento da Região Metropolitana de Belo Horizonte. **Governo de Minas publica edital de licitação do Plano de Segurança Hídrica da RMBH, Belo Horizonte, p.12, 2021.** Disponível em: [http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/ARMBH\\_RMBH\\_PSH\\_RF001\\_R01.pdf](http://www.agenciarmbh.mg.gov.br/wp-content/uploads/2022/05/ARMBH_RMBH_PSH_RF001_R01.pdf) Acesso em: jul. 2023.

ARRIAGADA, K. G. G. **Aplicación de un modelo conceptual DPSIR para la gestión ambiental de lagos en la Cuenca del Río Valdivia.** Departamento de Ingeniería Ambiental - Tesis Pregrado—Concepción, Chile: Universidad de Concepción, 2021. Disponível em: <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/9203> Acesso em: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. ARSAE-MG, AGÊNCIA REGULADORA DE SERVIÇOS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA E DE ESGOTAMENTO SANITÁRIO DO ESTADO DE MINAS GERAIS, 2023. **Panoramas Municipais.** Disponível em: <https://www.arsae.mg.gov.br/panoramas-municipais/>. Acesso em: jan. 2023

ASSARI, A.; MAAHESH, T.; ASSARI, E. Role of public participation in sustainability of historical city: usage of TOPSIS method. **Indian Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 2289–2294, 2012. Disponível em: DOI: [10.17485/ijst/2012/v5i3.2](https://doi.org/10.17485/ijst/2012/v5i3.2) Acesso em: jul. 2023.

BARBADO, N.; LEAL, A. C. Global cooperation on climate change and implementation of SDG 6 in Brazil. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, p. e29110313290, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13290> Acesso em: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. BAGORDO, F. *et al.* Using the DPSIR framework to identify factors influencing the quality of groundwater in Grecia Salentina (Puglia, Italy). **Rendiconti Lincei**, v. 27, n. 1, p. 113–125, mar. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12210-015-0456-8> Acesso em: jul. 2023.

BEEK, E. V.; ARRIENS, W. L. Water Security: Putting the Concept into Practice. **Global Water Partnership Technical Committee (TEC)**, v. 20, p. 55, 2014. Disponível em: [https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/5/Cap.2\\_Seguranca\\_hidrica.pdf](https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11115/5/Cap.2_Seguranca_hidrica.pdf) Acesso em: fev. 2023.

BENCHAWAN, T.; CHAIWAT, R.; ROTCHANATCH, D.; PEERAPAT, K. A Combined DPSIR Framework and Logical Framework Approach for Sustainable Water Resources Management in the Lagoon Floodplain. **Environment and Natural Resources Journal**, [s. l.], v. 21(3), p. 1–11, 2023.

BERBEO, M. A. M.; GONZÁLES, L. F. U.; GIRÓN, J. B. Producto 12.1 Documento con la identificación y priorización de áreas de importancia y singularidad ecológica basada en el marco land sharing/land sparing, buscando maximizar la conservación de la biodiversidad y la productividad de los territorios, acompañados de la identificación de indicadores para el seguimiento del desempeño ambiental en escalas regionales. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2022. Disponível em: <http://hdl.handle.net/20.500.11761/36140>. Acesso em: jul. 2023.

\_\_\_\_\_. BOELEEE, E. *et al.* Water and health: From environmental pressures to integrated responses. **Acta Tropica**, v. 193, p. 217–226, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.actatropica.2019.03.011>. Acesso em: mar. 2023.

BORDON, I. et al. The Brumadinho Mining Disaster: Immediate Impacts of Mine Tailings 5 Days After the Dam Rupture. **Ecotoxicology and Environmental Contamination**, v. 17, n. 2, p. 37–45, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.5132/eec.2022.02.05> Acesso em: dez. 2023

BORJA, Á.; GALPARSORO, I.; SOLAUN, O.; MUXIKA, I.; TELLO, E. M.; URIARTE, A.; VALENCIA, V. The European Water Framework Directive and the DPSIR, a methodological approach to assess the risk of failing to achieve good ecological status. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 66, n. 1–2, p. 84–96, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2005.07.021>. Acesso em: mar. 2023

BOTELHO, R.G.M.; SILVA, A.S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: **Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: VITTE, A. C. e GUERRA, A. J. T. (org.), Bertrand Brasil, 2007, p. 153-223. Disponível em: <https://doi.org/10.18227/2177-4307.acta.v14i36.2120>. Acesso em: jun. 2023.

BRASIL, MMA. **Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm) Acesso em: jul. 2023.

BUTTE, G.; SOLANO-CORREA, Y. T.; PEPPA, M. V.; RUÍZ-ORDÓÑEZ, D. M. A Framework for Water Security Data Gathering Strategies. *Water International*, Colombia, v. 14, n. 18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14182907> Acesso em: dez. 2023.

CARBONARI, L. T.; LIBRELOTTO, L. I. Modelo multicritério de decisão para o projeto de acampamentos temporários planejados voltados a cenários de desastre. *Mix Sustentável*, Santa Catarina, v. 7, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2021.v7.n2.15-17>. Acesso em: nov. 2023.

CARNERO, M. C. Fuzzy TOPSIS Model for Assessment of Environmental Sustainability: A Case Study with Patient Judgements. **Mathematics**, v. 8, n. 11, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/math8111985> Acesso em: jul. 2023.

CARR, E. R.; WINGARD, P. M.; YORTY, S. C.; THOMPSON, M. C.; JENSEN, N. K.; ROBERSON, J. Applying DPSIR to sustainable development. **International Journal of**

**Sustainable Development & World Ecology**, v. 14, n. 6, p. 543–555, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13504500709469753>. Acesso em: jul. 2023

CARVALHO, J. R. M. de; CURTI, W.F.; LIRA, W. S. Processo participativo na construção de indicadores hidro ambientais para bacias hidrográficas. *In: Gestão sustentável dos recursos naturais: uma abordagem participativa*. Campina grande: LIRA, Waleska Silveira e CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde, 2013, p. 31–80. 1v. (EDUEPB). Disponível em: [DOI:10.7476/9788578792824.0002](https://doi.org/10.7476/9788578792824.0002) Acesso em: jul. 2023.

COPAM - CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL. Deliberação Normativa Conjunta COPAM-CERH/MG Nº 8, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2022. Disponível em: <https://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=56521> Acesso em: 12 jun. 2023

CORRÊA, M. A.; TEIXEIRA, B. A. N. Developing sustainability indicators for water resources management in Tietê-Jacaré basin, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, n. 1, p. 8–14, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.4090/juee.2013.v7n1.8-14> Acesso em: mar. 2023.

CPT, Comissão Pastoral da Terra. **Conflitos no Campo Brasil**. Disponível em: <https://www.cptnacional.org.br/downlods/category/6-conflitos-pela-agua>. Acesso em: mar 2023.

\_\_\_\_\_. CHUNG, E-S; LEE, K. S. Prioritization of water management for sustainability using hydrologic simulation model and multicriteria decision making techniques. **Journal of Environmental Management**, v. 90, p. 1502–1511, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.10.008>. Acesso em: jul. 2023

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. ENVIRONMENTAL INDICATORS, EEA: Typology and Overview. European Environment Agency. Technical report Nº 25/1999, p.19. Disponível em: [https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25\\_](https://www.eea.europa.eu/publications/TEC25_) Acesso em: fev.2023

FAO, Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of Food and Agriculture. Overcoming water challenges in agriculture**. Rome, Italy, p.210: FAO, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cb1447en> Acesso em: fev. 2023

\_\_\_\_\_. FELINTO, C. M. R.; RIBEIRO, M. M. R. BRAGA, C. F. C. Aplicação do Modelo Força Motriz-Pressão-Estado-Impacto-Resposta (FPEIR) para Gestão dos Recursos Hídricos em João Pessoa-PB. **Revista DAE**, v. 67, n. 218, p. 118–136, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.038>. Acesso em: fev. 2023

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, FEAM. **Acidentes ambientais - 2020**. Base digital vetorial geoespacial dos acidentes ambientais fiscalizados pela equipe Núcleo de Emergência Ambiental (NEA) da FEAM. Belo Horizonte: 2020. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/9edf3ae2-00ff-4151-a828-a92125781dca>. Acesso em jul. 2023

\_\_\_\_\_. FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE, FEAM. **Resumo da qualidade das águas nos locais monitorados ao longo do rio Paraopeba, após o rompimento das barragens no complexo da Mina Córrego do Feijão da Mineradora Vale/SA, município de Brumadinho - Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2024. Boletim Informativo. Disponível em: <http://www.feam.br/recuperacao-ambiental-da-bacia-do-rio-paraopeba/boletim-informativo-do-cidadao-sobre-a-qualidade-da-agua-no-rio-paraopeba>. Acesso em: jun. 2024

GARI, S. R.; ORTIZ GUERRERO, C. E.; A-URIBE, B.; ICELY, J. D.; NEWTON, A. A DPSIR-analysis of water uses and related water quality issues in the Colombian Alto and Medio Dagua Community Council. **Water Science**, v. 32, n. 2, p. 318–337, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wsj.2018.06.001>. Acesso em: fev. 2023

\_\_\_\_\_. GARI, S. R.; NEWTON, A.; ICELY, J. D. A review of the application and evolution of the DPSIR framework with an emphasis on coastal social-ecological systems. **Ocean & Coastal Management**, v. 103, p. 63–77, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.11.013>. Acesso em: fev. 2023

GIUGNI, M.; KANAKOUDIS, V.; DE PAOLA, F.; KERAMARIS, E. The 5th EWaS International Conference: “Water Security and Safety Management: Emerging Threats or New Challenges? Moving from Therapy and Restoration to Prognosis and Prevention.” Environmental Sciences Proceedings, Italy, v. 21, n. 39, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021039> Acesso em: dez. 2023.

GLEICK, P. H.; SHIMABUKU, M. Water-related conflicts: definitions, data, and trends from the water conflict chronology. **Environmental Research Letters**, v. 18, n. 3, p. 034022, 2023. Disponível em: DOI [10.1088/1748-9326/acbb8f](https://doi.org/10.1088/1748-9326/acbb8f) Acesso em: jan. 2024.

HEINK, U.; KOWARIK, I. What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. **Ecological Indicators**, v. 10, n. 3, p. 584–593, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.09.009>. Acesso em: fev. 2023

HWANG, C.-L.; YOON, K. Multiple attribute decision making: Methods and applications. A state-of-the-art survey. 1. ed. **Springer-Verlag**, 1981. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. ISBN 978-3-540-10558-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9>.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo AGRO 2017**. Disponível em: <https://censoagro2017.ibge.gov.br/> . Acesso em: fev. 2022.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. Brasília: Diário Oficial da União, 04 nov. 2010. Disponível em: <https://censo2010.ibge.gov.br/> Acesso em: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/> Acesso em: jul. 2023.

\_\_\_\_\_. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Indicadores de desenvolvimento sustentável: Brasil 2015. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 351p. ISBN 9788524043475. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=294254> Acesso em: mar. 2023.

INSTITUTE FOR WATER, ENVIRONMENT & HEALTH, UNU-INWEH. **Water Security & the Global Water Agenda. A UN-Water Analytical Brief**. Canada: ONU, 2013. Disponível em: <https://www.unwater.org/publications/water-security-and-global-water-agenda>. Acesso em: fev. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA APLICADA, IPEA. **Cadernos ODS: ODS 6 - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos**, Brasília, Brasil, 2019, p.40. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/ods/publicacoes.html>. Acesso em: fev. 2023

INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS, IGAM. **Avaliação da Qualidade das Águas Superficiais de Minas Gerais em 2020: Resumo Executivo Anual**. Belo Horizonte: 2021. resumo executivo anual. Disponível em:

<http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/4001> Acesso em: dez. 2023

\_\_\_\_\_. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, IPT. **Diagnóstico da situação dos recursos hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Grande (BHRG) – SP/MG (Relatório Síntese – R3)**. São Paulo: IPT, 2008. RELATÓRIO TÉCNICO Nº 96.581-205. Disponível em:

[https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7113/diagnostico\\_sintese.pdf](https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7113/diagnostico_sintese.pdf). Acesso em: fev. 2023.

\_\_\_\_\_. INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS, IGAM. **Base de dados relativa às outorgas de direito de uso da água concedidas pelo Instituto Mineiro de Gestão das Águas (Igam)**. Belo Horizonte: 2024. *Dataset*. Disponível em:

<https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis> Acesso em: dez. 2023

JADON, N.; SHARMA, H. K.; GURUARIBAM, N.; CHAUHAN, A. K. S. Chapter 12 - Recent scenario of agricultural contaminants on water resources. *In: Current Directions in Water Scarcity Research*. Elsevier: Tiwari, A. K *et al.*, 2022. v. 5p. 225–246. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85378-1.00012-X> Acesso em: dez. 2023

\_\_\_\_\_. JIA, K.; YIN, X.; YANG, J.; DENG, L. Investigating the Impact of Urbanization on Water Ecosystem Services in the Dongjiang River Basin: A Spatial Analysis. **Remote Sensing**, v. 15, n. 9: 2265, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs15092265> Acesso em: dez. 2023

\_\_\_\_\_. JIA, X.; O’CONNOR, D.; HOU, D.; JIN, Y.; LI, G.; ZHENG, C.; OK, Y. S.; TSANG, D. C. W.; LUO, J. Groundwater depletion and contamination: Spatial distribution of groundwater resources sustainability in China. **Science of The Total Environment**, v. 672, p. 551–562, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.457>. Acesso em: jul. 2023.

KOLOSOVA, O.; VADIM, G. Socio-environmental monitoring as the indicator of ecological consciousness. *Научный альманах стран Причерноморья.*, [s. l.], v. 4, n. 8, 2016. Disponível em: <https://cyberleninka.ru/article/n/socio-environmental-monitoring-as-the-indicator-of-ecological-consciousness> Acesso em: fev. 2024.

KULDNA, P. *et al.* An application of DPSIR framework to identify issues of pollinator loss. **Ecological Economics**, v. 69, n. 1, p. 32–42, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.01.005>. Acesso em: jul. 2023.

KURKA, T.; BLACKWOOD, D. Participatory selection of sustainability criteria and indicators for bioenergy developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 92–102, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.062> Acesso em: Jul. 2023.

LAWNICZAK-MALIŃSKA, A.; NOWAK, B; PAJEWSKI, K. Agricultural Pressures on the Quality of Ground and Surface Waters in Catchments of Artificial Reservoirs. **Water**, v. 15, n. 4, p. 661, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15040661> Acesso em: dez. 2023

\_\_\_\_\_. LATINOPOULOS, D.; BAKAS, T.; KAGALOU, I.; SPILIOTIS, M. Threat Prioritization and Causality Relations for Sustainable Water Management under the Circular

Economy Principles: Case Study in Laspias River, Greece Using eDPSIR and DEMATEL. *In: EWaS5*. MDPI, 2022, p. 59. Disponível em:

<https://doi.org/10.3390/environsciproc2022021059>. Acesso em: mar. 2023.

LEWISON, R. L.; RUDD, M. A.; AL-HAYEK, W.; BALDWIN, C.; BEGER, M. How the DPSIR framework can be used for structuring problems and facilitating empirical research in coastal systems. *Environmental Science & Policy*, v. 56, p. 110–119, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.11.001>. Acesso em: jul. 2023.

LI, Y.; LI, W.; XIAO, Q.; SONG, S. Acid mine drainage remediation strategies: A review on migration and source controls. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 35, n. 3, p. 148–158, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.19150/mmp.8464> Acesso em: nov. 2023.

LI, Y.; LI, W.; XIAO, Q.; SONG, S. Acid mine drainage remediation strategies: A review on migration and source controls. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 35, n. 3, p. 148–158, 2018. <https://doi.org/10.19150/mmp.8464> Acesso em: jun. 2023.

LIMA, R. P., ELMIRO, M. A. T., NERO, M. A., TEMBA, P. DA C., FONSECA, B. M., & CASTIGLIONE, L. H. G. (2021). ASSESSMENT OF DIGITAL TERRAIN MODELS IN DAM BREAK SIMULATION STUDIES. *Boletim De Ciências Geodésicas*, 27(spe), e2021005. <https://doi.org/10.1590/s1982-21702021000100005>

LIMA, C. F.; FARIA, R. F.; MAGALHÃES, R.; MOREIRA, G.; SANTOS, R. da S.; BERILLI, S. da S. Contribuições do passado em auxílio ao futuro: técnicas de recuperação de áreas afetadas por ruptura de barragem de rejeito - um estudo de caso. *Enciclopédia Biosfera*, v. 13, n. 23, p. 359–368, 2016. Disponível em: DOI:10.18677/Enciclopedia\_Biosfera\_2016\_031 Acesso em: dez. 2023

LISBOA, G. P. *et al.* Environmental fragility of land systems in a hydrographic basin located in the south region of the state of Bahia, Brazil. *Caminhos de Geografia*, v. 24, n. 91, p. 189–207, 2023. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/62194>. Acesso em: dez. 2023.

\_\_\_\_\_. LIU, X.; LIU, H.; CHEN, J.; LIU, T.; DENG, Z. Evaluating the sustainability of marine industrial parks based on the DPSIR framework. *Journal of Cleaner Production*, v. 188, p. 158–170, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.271>. Acesso em: mar. 2023

LOPES, P. P.; RODOVALHO, E. DA C.; EL HAJJ, T. M. Brazilian mining sector and its environmental impact: a review of cradle-to-cradle options applied to residues, waste, and tailings. *HOLoS*, v. 6, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.15628/holos.2022.9413> Acesso em: jan. 2023.

LÓPEZ-RAMOS, A.; MEDRANO-BARBOZA, M.-B.; ACOSTA, L. M.-; ACUÑA, G. J. Assessment of Morphometric Parameters as the Basis for Hydrological Inferences in Water Resource Management: A Case Study from the Sinú River Basin in Colombia. *International Journal of Geo-Information*, v. 11, n. 9, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi11090459> Acesso em: jun. 2023.

LUO, Z.; ZHOU, Z.; HAO, Y. Establishment of an indicator framework for the transmission risk of the mountain-type zoonotic visceral leishmaniasis based on the Delphi-entropy weight method. *Infect Dis Poverty*, v. 11, n. 122, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s40249-022-01045-0>. Acesso: mar. 2023.

MACHADO, F.H. **Proposição de indicadores de segurança hídrica: Seleção, validação e aplicação na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim, Jundiá - SP, Brasil.** Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista (Unesp), São Paulo, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/153669>. Acesso em: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. MALEKMOHAMMADI, B.; JAHANISHAKIB, F. Vulnerability assessment of wetland landscape ecosystem services using driver-pressure-state-impact-response (DPSIR) model. **Ecological Indicators**, v. 82, p. 293–303, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.06.060>. Acesso em: fev. 2023.

MANGI, S. C.; ROBERTS, C. M.; RODWELL, L. D. Reef fisheries management in Kenya: Preliminary approach using the driver–pressure–state–impacts–response (DPSIR) scheme of indicators. **Ocean & Coastal Management**, v. 50, p. 463–480, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2006.10.003>. Acesso em: fev. 2023

MARTÍN, L.; MONTICO, S. Diseño de un sistema de indicadores para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en la Cuenca del Arroyo Ludueña, Santa Fe. **Water**, v. 29, p. 28, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.35305/curiham.v29i.190> Acesso em: nov. 2023.

\_\_\_\_\_. MARTINS, J. H.; CAMANHO, A. S.; GASPAR, M. B. A review of the application of driving forces – Pressure – State – Impact – Response framework to fisheries management. **Ocean & Coastal Management**, v. 69, p. 273–281, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2012.07.029>. Acesso em: fev. 2023.

\_\_\_\_\_. MARTTUNEN, M.; LIENERT, J.; BELTON, V. Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations. **European Journal of Operational Research**, Switzerland, v. 263, n. 1, p. 1–17, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.04.041>. Acesso em: dez. 2023.

MAXIM, L.; SPANGENBERG, J. H.; O’CONNOR, Martin. An analysis of risks for biodiversity under the DPSIR framework. **Ecological Economics**, v. 69, n. 1, p. 12–23, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.03.017>. Acesso em: fev. 2023.

MCDONOUGH, W.; BRAUNGART, M. Design for the triple top line: New tools for sustainable commerce. **Corporate Environmental Strategy**, v. 9, p.251–258, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1066-7938\(02\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S1066-7938(02)00069-6) Acesso em: 01 mar. 2023.

MENDEZ, F. et al. The invisibility of health effects associated with water pollution within disease burden estimates: Analysis from a Colombian Andean watershed. **PLOS WATER**, v. 3, n. 2, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pwat.0000125> Acesso em: jan. 2024

\_\_\_\_\_. MENDES, J. P. **Indicadores de sustentabilidade para gestão da segurança hídrica nas bacias hidrográficas PCJ: estudos de caso das sub-bacias dos Rios Atibaia e Piracicaba.** Dissertação de mestrado em Sustentabilidade—Campinas, São Paulo: Pontifícia Universidade Católica de Campinas, 2022. Disponível em: <https://repositorio.sis.puc-campinas.edu.br/xmlui/handle/123456789/16552> Acesso em: jun. 2023

MICROSOFT CORPORATION. *Microsoft 365 MSO versão 2306* [Excel]. 2023. Disponível em: <https://www.microsoft.com/pt-br/microsoft-365>. Acesso em: jun. 2023.

MISECKAITE, O. Chapter 7 - Agricultural contamination. In: **Current Directions in Water Scarcity Research** Elsevier: Tiwari, A. K *et al.*, Elsevier, 2022. v. 5p. 101–107. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85378-1.00012-X> Acesso em: dez. 2023

MOSAFAAIE, J.; JAM, A. S.; TABATABAEI, M. R.; KOUSARI, M. R. Trend assessment of the watershed health based on DPSIR framework. **Land Use Policy**, v. 100, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.104911>. Acesso em: fev. 2023.

MUDD, G. M. Mining and Water Resources. *In: Encyclopedia of the World's Biomes*. Elsevier: Goldstein, M. I., DellaSala, D. A., 2020. p. 45–54. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12131-1> Acesso em: dez. 2023

NERO M.A., DE MORAIS V.T.P., ELMIRO M.A.T, GARCIA R. A., CINTRA J. P., MANCIPEMUÑOZ N. A. Assessment of the influence of DTM quality on dam rupture simulation processes. **MOJ Eco Environ Sci**. 2024; 9(2):61-70. Disponível em: DOI: [10.15406/mojes.2024.09.00308](https://doi.org/10.15406/mojes.2024.09.00308) Acesso em: jul. 2024.

NETO, F. O. L. **Aplicação do modelo DPSIR na bacia hidrográfica do Rio Guaribas, Ceará, Brasil: subsídios para gestão ambiental local**. 2013. p.173 f. Dissertação (mestrado em geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/16889> Acesso em: fev. 2023.

NICHOLSON, E.; COLLEN, B.; BARAUSSE, A.; BLANCHARD, J. L.; COSTELLOE, B. T.; SULLIVAN, K. M. E.; UNDERWOOD, F. M.; BURN, R. W.; FRITZ, S.; JONES, J. P. G.; MCRAE, L.; POSSINGHAM, H. P.; MILNER-GULLAND, E. J. Making Robust Policy Decisions Using Global Biodiversity Indicators. **PLoS ONE**, v. 7, n. 7, p. e41128, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0041128>. Acesso em: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. NIEMEIJER, D.; DE GROOT, R.S. Framing environmental indicators: moving from causal chains to causal networks. **Environment, Development and Sustainability**, v. 10, n. 1, p. 89–106, 2008. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-006-9040-9>. Acesso em: 01 mar. 2023.

NKIAKA, E. *et al.* Evaluating the accuracy of gridded water resources reanalysis and evapotranspiration products for assessing water security in poorly gauged basins. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 26, n. 22, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-26-5899-2022> Acesso em: mar. 2023.

NUNES, P.; VICENTE, J.; VEIGA, A. L.; MONTEIRO, C.; DIAS, T. Dados hidrográficos abertos para a sociedade. **REVISTA INTERNACIONAL MAPPING**, Lisbon, v. 32, p. 34–48, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.59192/mapping.393> Acesso em: jun. 2023.

OLIVEIRA, G.; SCAZUFCA, P.; SAYON, P. L. **Ranking do Saneamento do Instituto Trata Brasil de 2023**. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2023. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2023/>. Acesso em: 01 jun. 2023.

\_\_\_\_\_. OPERATION AND DEVELOPMENT, OECD ,1993. OCDE core set of indicators for environmental performance reviews. A synthesis report by the Group on the State of the Environment. **Environment monographs**. Paris, 1993, nº83, 39 p. Disponível em: [https://doi.org/10.1787/eco\\_outlook-v1993-1-en](https://doi.org/10.1787/eco_outlook-v1993-1-en). Acesso em: fev. 2023.

OVERGAARD, H. J. et al. Integrated disease management: arboviral infections and waterborne diarrhoea. **Policy & practice**, v. 99, p. 583–592, 2021. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.2471/BLT.20.269985> Acesso em: jan. 2024.

OWSIŃSKI, J. W. On the optimal division of an empirical distribution (and some related problems). **Przegląd Statystyczny**, v. 59, n. 1, p. 109–122, 2012. Disponível em: <https://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-4602d046-3cd1-4338-bfca-b0d709fba4c1> Acesso em: jun. 2023.

PATRÍCIO, J.; ELLIOTT, M.; MAZIK, K.; PAPADOPOULOU, K.-N.; SMITH, C. J. DPSIR—Two Decades of Trying to Develop a Unifying Framework for Marine Environmental Management? **Frontiers in Marine Science**, v. 3, 2016. Disponível em: [doi:10.3389/fmars.2016.00177](https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00177) Acesso em: mar. 2023.

PEIXOTO, F. DA S., SOARES, J. A., & RIBEIRO, V. S. Conflicts over water in Brazil. *Sociedade & Natureza*, 34, e59410, (2022). Disponível em: <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-59410> Acesso em: mar 2023.

PINTO, R.; DE JONGE, V.N.; NETO, J.M.; *et al.* Towards a DPSIR driven integration of ecological value, water uses and ecosystem services for estuarine systems. **Ocean & Coastal Management**, v. 72, p. 64–79, 2013. Disponível em: [10.1016/j.ocecoaman.2011.06.016](https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.06.016) Acesso em: abr. 2023.

PIRES, J. S. R.; SANTOS, J. E. dos; DEL PRETTE, M.E. A Utilização do Conceito de Bacia Hidrográfica para a Conservação dos Recursos Naturais. In: **CONCEITOS DE BACIAS HIDROGRÁFICAS Teorias e aplicações**. Ilhéus, Ba: Alexandre Schiavetti, Antônio F. M. Camargo, Editus, 2002, p. 17 a 35. Disponível em: [http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos\\_de\\_bacias.pdf](http://www.uesc.br/editora/livrosdigitais2015/conceitos_de_bacias.pdf) Acesso em: jun. 2023.

\_\_\_\_\_. PIRRONE, N.; TROMBINO, G.; CINNIRELLA, S.; ALGIERI, A.; BENDORICCHIO, G.; PALMERI, L. The Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) approach for integrated catchment-coastal zone management: preliminary application to the Po catchment-Adriatic Sea coastal zone system. **Regional Environmental Change**, v. 5, n. 2–3, p. 111–137, 2005. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10113-004-0092-9> Acesso em: jun. 2023

PORTO, M. F. A.; PORTO, R.L. Gestão de bacias hidrográficas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 43–60, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200004> Acesso em: jun. 2023.

\_\_\_\_\_. PNUMA, Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente. **Metodologia para a elaboração de Relatórios GEO Cidades: Manual de Aplicação, Versão 2**. Escritório Regional para a América Latina e o Caribe, Brasília: PNUMA, 2004. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4218641/mod\\_resource/content/1/356\\_Manual\\_GEO\\_Cidades\\_port.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4218641/mod_resource/content/1/356_Manual_GEO_Cidades_port.pdf). Acesso em: jun. 2023.

\_\_\_\_\_. PORTO, D. T.; BASSO, L. A.; STROHAECKER, T. M. Diagnóstico ambiental da bacia hidrográfica do rio Mampituba, região sul do Brasil, utilizando a matriz FPEIR. **Geosul**, v. 34, n. 72, p. 28–50, 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/1982-5153.2019v34n72p28>. Acesso em: jun. 2023.

\_\_\_\_\_. PROJETO MAPBIOMAS – Coleção 8 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Disponível em: <https://doi.org/10.58053/MapBiomias/VJIJCL> Acesso em: dez. 2023

PUNIA, A.; SINGH, S. K. Chapter 1 - Contamination of water resources in the mining region. In: **Contamination of Water**. Academic Press: Ahamad, A., Siddiqui, S.I., Singh, P., 2021. p. 3–17. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824058-8.00015-3> Acesso em: 11 jan. 2023.

PUTRO, U. S.; RESPATI, G. Navigating Water Sustainability in Mineral Mining with a Systems Thinking-Based Approach. **Indonesian Journal of Multidisciplinary Science**, v. 2,

n. 9, p. 3070–3084, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.55324/ijoms.v2i9.539> Acesso em: dez. 2023.

RAMIÃO, J. P.; SANTOS, C. C.; PINTO, R.; PASCOAL, C. Modeling the Effectiveness of Sustainable Agricultural Practices in Reducing Sediments and Nutrient Export from a River Basin. **Water**, v. 14, n. 23, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14233962>. Acesso em: jun. 2023.

RAPPORT, D.; FRIEND, A. Projet d'établissement d'un système général d'information sur l'environnement au Canada: l'approche agression-réaction. Monograph, Canadá, 1979. Disponível em: <https://publications.gc.ca/site/eng/9.896799/publication.html> Acesso em: fev. 2023.

REKOLAINEN, S.; KÄMÄRI, J.; HILTUNEN, M.; SALORANTA, T. M. A conceptual framework for identifying the need and role of models in the implementation of the water framework directive. **International Journal of River Basin Management**, v. 1, p. 347–352, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635217>. Acesso em: fev. 2023.

SALAMÉ, L.; BOGARDI, J. J.; SEBESVARI, Z.; TOCKNER, K.; YAZICI, B. Drivers, Pressures and Stressors: The Societal Framework of Water Resources Management. **Handbook of Water Resources Management: Discourses, Concepts and Examples**, [s. l.], p. 329–364, 2020. Disponível em: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-60147-8\\_11](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-60147-8_11) Acesso em: jun. 2023

SAMPATH, D. M. R.; FREITAS, J. G. D.; DIAS, J. A. Extending the DPSIR framework to analyse Driver-Pressure-State-Impact-Response of sand dune management in Manawatu-Whanganui (New Zealand) since the 19th century. **Ocean & Coastal Management**, v. 230, p. 106348, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2022.106348>. Acesso mar. 2023

SES-MG, Secretária de Estado de Saúde de Minas Gerais. **Painel Arboviroses: Vigilância Epidemiológica**, 2023. Disponível em: <https://www.saude.mg.gov.br/aedes>. Acesso em: jan. 2024.

SHANNON, C. E.; WEAVER, W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: **University of Illinois Press**, 1949. Disponível em: [https://pure.mpg.de/rest/items/item\\_2383164/component/file\\_2383163/content](https://pure.mpg.de/rest/items/item_2383164/component/file_2383163/content). Acesso: mar. 2023.

SHI, S.; TAO, X.; CHEN, X. *et al.* Evaluation of urban water security based on DPSIR model. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 880, n. 1, p. 012023, 2021. Disponível em: [10.1088/1755-1315/880/1/012023](https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012023). Acesso em: mar. 2023.

SIMATE, G. S. Prevention Processes for Acid Mine Drainage. *Em: ACID MINE DRAINAGE*. 1. ed. **CRC Press**: Geoffrey S. Simate, Sehliselo Ndlovu, 2021. (Engineering & Technology). p. 332(22). Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9780429401985>. Acesso em: jun. 2023.

SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS SISEMA. **Rompimento da Barragem B1 em Brumadinho/MG - Monitoramento ambiental**, 2019. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/geonetwork/srv/por/catalog.search#/metadata/be4e64-0ac8-4ee6-ad48-7f980fa29ff5>. Acesso em: 11 jan. 2023.

\_\_\_\_\_. SISTEMA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE DE MINAS GERAIS SISEMA. **Infraestrutura de Dados Espaciais do Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos**. 2023. Disponível em: <https://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/webgis>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SOARES, S.; VASCO, P. Water Quality Simulation in the Bois River, Goiás, Central Brazil. **Sustainability**, v. 15, n. 4, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15043828> Acesso em: dez. 2023

SOUZA, P. M. de; PEREIRA, S. F. P.; ROCHA, R. M.; ALVES, M. H. D. Integration of Statistical Models and Computer Simulation in Environmental Accidents: A Study on Leakage of Red Mud in the Pará River, Amazon, Brazil. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 32, n. 10, p. 1997–2008, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210091> Acesso em: dez. 2023

SVARSTAD, H.; PETERSEN, L. K.; ROTHMAN, D.; SIEPEL, H.; WÄTZOLD, F. Discursive biases of the environmental research framework DPSIR. **Land Use Policy**, v. 25, n. 1, p. 116–125, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.03.005> Acesso mar. 2023.

TUNÇ, G.; KAMAN, H. Salinity Problem in Agricultural Lands. **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**, v. 10(11), p.2232–2236, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.24925/turjaf.v10i11.2232-2236.5549> Acesso em: 01 mar. 2023

\_\_\_\_\_. TSCHERNING, K; HELMING, K; KRIPPNER, B. *et al.* Does research applying the DPSIR framework support decision making? **Land Use Policy**, v. 29, n. 1, p. 102–110, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2011.05.009> Acesso em: fev. 2022.

URZÚA, C.; VILBERT, J. An Oddity in the Human Development Index. **Investigaciones Económicas**, v. 83, n. 327, p. 55–79, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2015397/v1> Acesso em: jan. 2024

VALE S.A. Balanço da Reparação: 1º Semestre de 2022. 2022. Disponível em: [https://vale.com/documents/d/guest/val3862-2\\_revista-balanco-da-reparacao-1-sem-22\\_final](https://vale.com/documents/d/guest/val3862-2_revista-balanco-da-reparacao-1-sem-22_final). Acesso em: mai. 2024.

VERO, S. E. *et al.* Agricultural Case Studies. In: **Encyclopedia of Inland Waters (Second Edition)**. Elsevier: MEHNER, T.; Tockner K. v. 4p. 68–83. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819166-8.00095-5>. Acesso em: dez. 2023

\_\_\_\_\_. WANG, B. *et al.* A SEEC Model Based on the DPSIR Framework Approach for Watershed Ecological Security Risk Assessment: A Case Study in Northwest China. **Water**, v. 14, n. 1, p. 106, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w14010106>. Acesso em: fev. 2023.

WARSI, T.; MUKHERJEE, S.; BISWAS, G.; MITRAN, T.; RIZVI, S. S. Chapter 23 - Urban water resources and its sustainable management. Em: **Current Directions in Water Scarcity Research**. Elsevier: Srivastav, A. L., Madhav, S., Bhardwaj, A. K., Jones, E. V., 2022. v. 6p. 489–509. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91838-1.00020-8> Acesso em: dez. 2023

WILD, M.; ROUHANI, S.; OEHRIG, J.; ALVES, P. H. G. Using Spatiotemporal Ratio Analyses to Quantitatively Estimate Water Quality Recovery of the Rio Doce. **Integrated Environmental Assessment and Management**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ieam.4813> Acesso em: dez. 2023

WWAP, World Water Assessment Programme. The United Nations World Water Development Report 4: managing water report under uncertainty and risk (Vol. 1), Knowledge Base (Vol. 2) and Facing the Challenges (Vol. 3). Paris, UNESCO, 2012. Disponível em: <https://digitallibrary.un.org/record/3892696?ln=en&v=pdf>. Acesso em: fev. 2023.

YANG, J.; XING, S.; QIU, R.; CHEN, Y. Mathematical Problems in Engineering Decision-Making Based on Improved Entropy Weighting Method: An Example of Passenger Comfort in a Smart Cockpit of a Car. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 1, n. 1, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2022/6846696>. Acesso: mar. 2023.

\_\_\_\_\_. YIN, J.; YUAN, J. DPSIR-TOPSIS Model-Based Assessment of Green Development Performance in Beijing, Tianjin, and Hebei. *Advances in Engineering Technology Research, China*, v. 1, n. 2, p. 554–559, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.56028/aetr.2.1.544> Acesso em: nov. 2023.

ZAMZOW, K.; CHAMBERS, D. M. Potential Impacts to Wetlands and Water Bodies Due to Mineral Exploration, Pebble Copper-Gold Prospect, Southwest Alaska. **Environments**, v. 6, n. 7, p. 84, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/environments6070084> Acesso em: dez. 2023

ZHANG, P.; ZHANG, J.; GE, R.; ZHOU, Q The impact of agricultural international trade on agro-ecological environment based on TOPSIS model *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*, vol.8, no.2, 2023, pp.1931-1940. Disponível em: <https://doi.org/10.2478/amns.2023.1.00297> Acesso em: jul. 2023.

ZHANG, X.; BASHIR, M. A.; RAZA, Q.; LIU, X. Evaluating the effects of sustainable chemical and organic fertilizers with water saving practice on corn production and soil characteristics. **Phyton-International Journal of Experimental Botany**, v. 92, n. 5, p. 1349–1390, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.32604/phyton.2023.026952>. Acesso em: jun. 2023.

## APÊNDICE A - PROCEDIMENTOS E FÓRMULAS PARA O CÁLCULO DA ENTROPIA E APLICAÇÃO DO MÉTODO TOPSIS

As etapas **(1 a 4)** representam os cálculos dos pesos ( $w$ ) pelo método da Entropia e são descritos a seguir:

1. **Etapa 1:** Construir uma matriz de decisão “A” composta por municípios e indicadores é descrita pela Equação 1:

$$A = (x_{ij})_{n \times m} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \cdots & x_{nm} \end{pmatrix} \quad (1)$$

Onde  $n$  = município e  $m$  = Indicadores

2. **Etapa 2:** Em seguida calcula-se a proporção relativa de  $v_{ij}$  para cada objeto de avaliação  $i$  em  $p_{ij}$  pela Equação 2.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^m x_{ij}} \quad (2)$$

3. **Etapa 3:** A entropia de cada indicador é calculada usando a Equação 3.

$$e_j = -k \sum_{j=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (3)$$

Onde,  $k = 1/\ln(n)$ ;  $n$  é o número total de indicadores; e  $p_{ij}$ , é a valores normalizados.

4. **Etapa 4:** Calcular os pesos ( $w$ ) correspondentes de cada critério. O cálculo para o peso da entropia é realizado através da Equação 4.

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)} \quad (4)$$

Onde,  $0 \leq w_j \leq 1$ ,  $\sum w_i = 1$ .

Portanto, o resultado é uma matriz de pesos  $w = (w_1, w_2, \dots, w_m)$ , onde  $w_i$  é o peso do  $i$ -ésimo índice. Com os pesos já definidos, pode-se iniciar a descrição do algoritmo de análise multicritério

Após o cálculo dos pesos, inicia-se a aplicação do método TOPSIS, que será descrita nas etapas **5 a 10** apresentadas pelas equações a seguir:

5. **Etapa 5:** Normalização da Matriz de Decisão por meio da Equação 5.

$$R = r_{ij} (m \times n) = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m x_{ij}^2}} \quad (5)$$

6. **Etapa 6:** Construção da Matriz Normalizada Ponderada: Multiplica cada valor normalizado pelo peso do respectivo indicador por meio da Equação 6.

$$V = v_{ij} (m \times n) = r_{ij} \times w_{ij} \quad (6)$$

7. **Etapa 7:** Determinação das Soluções Ideais Positiva e Negativa por meio da Equação 7 e da Equação 8.

Solução Ideal Positiva  $A^+$ : Contém os melhores valores para cada indicador.

$$SIP = v^+ = (\max_i v_{ij} | j \in j_b), (\min_i v_{ij} | j \in j_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (7)$$

Solução Ideal Negativa  $A^-$ : Contém os piores valores para cada indicador

$$SIN = v^- = (\min_i v_{ij} | j \in j_b), (\max_i v_{ij} | j \in j_{nb}) | \in [1 \dots m] \quad (8)$$

Onde  $J_b$  é um conjunto de critérios benéficos e  $J_{nb}$  é um conjunto de critérios não benéficos.

8. **Etapa 8:** Cálculo das Distâncias Euclidianas utilização da distância Euclidiana para calcular a distância de cada alternativa ao SIP e SIN para medir a separação do desempenho da alternativa  $i$  do SIP e SIN usando a Equação 9 e a Equação 10.

$$SIP = D_i^+ = \left[ \sum_{j=1}^m (V_i - V_j^+)^2 \right]^{0,5} \quad (9)$$

$$SIN = D_i^- = \left[ \sum_{j=1}^m (V_i - V_j^-)^2 \right]^{0,5} \quad (10)$$

9. **Etapa 9:** Cálculo do Índice de Proximidade relativa (CC) para cada alternativa, conforme a Equação 11.

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (11)$$

Este índice varia entre 0 e 1, onde valores mais próximos de 1 indicam maior proximidade da solução ideal.

10. **Etapa 10:** Ordenar as alternativas em ordem decrescente do coeficiente de proximidade. Assim, os valores mais altos do coeficiente de proximidade indicam as melhores performances em relação aos critérios de avaliação.

## APÊNDICE B - Códigos em python para o cálculo da ENTROPIA e aplicação do método TOPSIS

Cálculo da Entropia:

1. Importação das bibliotecas necessárias
  - import pandas as pd
  - import numpy as np
  
2. Normalização dos dados
  - def normalize\_column(col):
    - col\_min = col.min()
    - col\_max = col.max()
    - return (col - col\_min) / (col\_max - col\_min)
    - normalized\_corrected\_df = corrected\_df.apply(normalize\_column, axis=1)
  
3. Cálculo da entropia
  - k = 1.0 / np.log(len(normalized\_corrected\_df.columns))
  - entropy = -k \* (normalized\_corrected\_df \* np.log (normalized\_corrected\_df + 1e-9)).sum(axis=1)
  
4. Cálculo dos pesos
  - diversity = 1 - entropy
  - weights = diversity / diversity.sum()
  - weights\_sorted = weights.sort\_values(ascending=False)
  - print(weights\_sorted)

Aplicação do TOPSIS:

1. Matriz de decisão
  - decision\_data = {adicione aqui os dados da matriz de decisão}
  
2. Pesos dos critérios (calculados no ENTROPIA)
  - weights\_data = {
    - 'Indicator':}
  - decision\_df = pd.DataFrame(decision\_data)
  - weights\_df = pd.DataFrame(weights\_data)
  
3. Normalização da matriz de decisão
  - normalized\_decision\_df = decision\_df.iloc[:,1:]. apply (lambdax:x/np.sqrt(np.sum(x\*\*2)), axis=0)
  
4. Aplicação dos pesos
  - weighted\_normalized\_df = normalized\_decision\_df \* weights\_df['Weight'].values
  
5. Determinação das soluções ideal positiva (SIP) e ideal negativa (SIN)
  - SIP = weighted\_normalized\_df.max()
  - SIN = weighted\_normalized\_df.min()

6. Cálculo das distâncias para SIP e SIN
  - `dist_SIP = np.sqrt(((weighted_normalized_df - SIP)**2).sum(axis=1))`
  - `dist_SIN = np.sqrt(((weighted_normalized_df - SIN)**2).sum(axis=1))`
7. Cálculo dos índices de similaridade
  - `similarity_index = dist_SIN / (dist_SIP + dist_SIN)`
  - Classificação das alternativas
  - `ranking = similarity_index.rank(ascending=False)``print(ranking)`