MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Urbana
Curso de Graduação em Engenharia Urbana

Lara Peixoto Moraes

Priorização de Nascentes e Propostas de Manejo Sustentável na Sub-bacia do Rio das Mortes (MG)

Ouro Preto

2025

Lara Peixoto Moraes

PRIORIZAÇÃO DE NASCENTES E PROPOSTAS DE MANEJO SUSTENTÁVEL NA SUB-BACIA DO RIO DAS MORTES (MG)

Projeto Final de Curso apresentado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Urbana na Universidade Federal de Ouro Preto.

Orientadora: Profa. Drª. Aline de Araújo Nunes

OURO PRETO

2025

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M827p Moraes, Lara Peixoto.
Priorização de nascentes e propostas de manejo sustentável na sub-bacia do Rio das Mortes (MG). [manuscrito] / Lara Peixoto Moraes. - 2025.
82 f.

Orientadora: Profa. Dra. Aline de Araújo Nunes.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Urbana .

1. Hidrologia. 2. Nascentes. 3. Sistemas de informações geográficas - SIG. 4. Método Analytic Hierarchy Process. I. Nunes, Aline de Araújo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 62:711.4

Bibliotecário(a) Responsável: Soraya Fernanda Ferreira e Souza - SIAPE: 1.763.787

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA URBANA

FOLHA DE APROVAÇÃO

Lara Peixoto Moraes

Priorização de nascentes e propostas de manejo sustentável na sub-bacia do rio das Mortes (MG)

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Urbana da Universidade Federal
de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira Urbanista

Aprovada em 29 de agosto de 2025

Membros da banca

Doutora - Aline de Araújo Nunes - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Doutora -Mila Correa Sampaio (Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará)
Engenheira - Marina da Silva Reis Assis (Universidade Federal de Ouro Preto)

Aline de Araújo Nunes, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 08/09/2025

Documento assinado eletronicamente por **Aline de Araujo Nunes**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 08/09/2025, às 11:38, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 , informando o código verificador **0974752** e o código CRC **5E9C91F8**.

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3559-1471 - www.ufop.br

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e por me conceder forças e sabedoria ao longo desta caminhada. À minha família e amigos, pelo amor incondicional, apoio, compreensão e incentivo em todos os momentos da minha formação, por acreditarem em mim e estarem sempre presentes nos desafios e conquistas.

À minha orientadora, pela dedicação, paciência, ensinamentos, conselhos e por todo o conhecimento compartilhado durante este trabalho. Aos professores do curso, que contribuíram de maneira significativa para a minha formação acadêmica e profissional.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, colaboraram para a realização deste trabalho e/ou fizeram o processo se tornar mais leve, o meu sincero muito obrigada.

“O que você faz hoje pode melhorar todos os seus amanhãs.”

(Ralph Marston)

RESUMO

A degradação das nascentes constitui um dos principais fatores de comprometimento da qualidade e disponibilidade hídrica em diversas bacias hidrográficas do país. Nesse cenário, torna-se fundamental a identificação de nascentes prioritárias para ações de conservação e/ou recuperação, de modo a subsidiar estratégias de gestão sustentável dos recursos hídricos. O presente estudo propõe um diagnóstico ambiental voltado à caracterização e hierarquização das nascentes da sub-bacia do Rio das Mortes no contexto do projeto de priorização elaborado pelo Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional, que subsidiou a seleção da faixa de estudo. A primeira etapa consistiu na avaliação das séries históricas de vazão e precipitação, associada à análise do uso e ocupação do solo. Essa investigação evidenciou tendência de redução das vazões mínimas ao longo dos anos, sem correspondência com a variabilidade pluviométrica, indicando que os impactos são majoritariamente de origem antrópica. As atividades agropecuárias, industriais e urbanas foram identificadas como os principais vetores de pressão sobre o ciclo hidrológico local. Para hierarquizar as áreas mais suscetíveis, aplicou-se o método Analytic Hierarchy Process (AHP), que possibilitou a elaboração de um mapa de vulnerabilidade considerando os parâmetros – uso e ocupação do solo, hidrogeologia, declividade e precipitação. Os resultados mostraram que mais de 50% da área apresenta alta suscetibilidade à degradação de nascentes, sendo selecionados nove pontos prioritários para intervenção ao cruzar as informações com a presença de outorgas subterrâneas e enquadramento dos cursos d'água. Entre as estratégias de conservação propostas destacam-se o cercamento das Áreas de Preservação Permanente (APPs), o reflorestamento com espécies nativas, a criação de corredores ecológicos, a adoção de práticas conservacionistas de manejo do solo, a implementação de programas de educação ambiental e o incentivo por meio de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA).

Palavras-chaves: nascentes, hidrologia, geoprocessamento, AHP, conservação ambiental.

ABSTRACT

The degradation of springs is one of the main factors compromising water quality and availability in several river basins across the country. In this context, the identification of priority springs for conservation and/or restoration actions is essential to support strategies for the sustainable management of water resources. This study proposes an environmental diagnosis aimed at the characterization and prioritization of springs in the Rio das Mortes sub-basin, within the framework of the prioritization project developed by the Ministry of Integration and Regional Development, which guided the selection of the studied area. The first stage consisted of assessing historical series of streamflow and precipitation, associated with the analysis of land use and land cover. This investigation revealed a trend of decreasing minimum flows over the years, without correspondence to rainfall variability, indicating that the impacts have predominantly anthropogenic origin. Agricultural, industrial, and urban activities were identified as the main drivers of pressure on the local hydrological cycle. To rank the most susceptible areas, the Analytic Hierarchy Process (AHP) method was applied, which enabled the development of a vulnerability map considering parameters such as land use and land cover, hydrogeology, slope, and precipitation. The results showed that more than 50% of the area presents high susceptibility to spring degradation, with nine priority points selected for intervention by cross-referencing the information with groundwater rights and watercourse classifications. Among the proposed conservation strategies, the following stand out: fencing of Permanent Preservation Areas (PPAs), reforestation with native species, creation of ecological corridors, adoption of soil conservation management practices, implementation of environmental education programs, and incentives through Payment for Environmental Services (PES).

Keywords: springs, hydrology, geoprocessing, AHP, environmental conservation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ciclo natural da água 14
Figura 2 – Ciclo urbano da água 15
Figura 3 – Fluxograma metodológico 28
Figura 4 – Localização da sub-bacia do Rio das Mortes 29
Figura 5 – Rede hidrográfica da sub-bacia do Rio das Mortes 30
Figura 6 – Mapa da tipologia do solo da sub-bacia do Rio das Mortes 31
Figura 7 – Mapa do uso e cobertura do solo na sub-bacia das Mortes 32
Figura 8 – Estações fluviométricas e pluviométricas do Rio das Mortes 34
Figura 9 – Área de contribuição da estação Campolide 45
Figura 10 – Dados das precipitações anuais da estação Porto do Elvas 46
Figura 11 – Dados das precipitações anuais da estação Campolide 46
Figura 12 – Dados das precipitações anuais da estação Barroso 46
Figura 13 – Comparação do uso e ocupação do solo 49
Figura 14 – Mapa Hidrogeológico 50
Figura 15 – Mapa de Declividades 51
Figura 16 – Mapa da precipitação média anual 52
Figura 17 – Mapa de vulnerabilidade de nascentes 54
Figura 18 – Localização das nascentes selecionadas para intervenção 56
Figura 19 – Nascentes B1, B2 e B3 57
Figura 20 – Nascentes A1, A2 e A3 58
Figura 21 – Nascentes A4 e A5 59
Figura 22 – Nascente A6 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantitativo de áreas da sub-bacia.....31

Tabela 2 – Estações selecionadas 35

Tabela 3 – Critérios, subcritérios e pesos atribuídos ao Método AHP 40

Tabela 4 – Teste de Mann-Kendall para as estações fluviométricas.....43

Tabela 5 – Teste de Mann-Kendall para as estações pluviométricas.....47

Tabela 6 – Quantitativo de áreas do uso e ocupação solo 47

Tabela 7 – Quantitativo de áreas do domínio hidrogeológico 50

Tabela 8 – Quantitativo de áreas da declividade 51

Tabela 9 – Disposição da matriz pareada.....53

Tabela 10 – Disposição da matriz normalizada 53

Tabela 11 – Apresentação dos autovetores 53

Tabela 12 – Cálculo da Razão do índice de Consistência.....54

Tabela 13 – Quantitativo das áreas de vulnerabilidade 55

Tabela 14 – Outorgas subterrâneas 55

SUMÁRIO

1 Introdução 10

1.1 Justificativa 11

1.2 Objetivos 12

1.2.1 Objetivo Geral 12

1.2.2 Objetivos Específicos 12

2 Revisão Bibliográfica 13

2.1 Dinâmica das bacias hidrográficas e recarga hídrica 13

2.2 Influência das nascentes na disponibilidade hídrica 18

2.3 Recuperação e conservação de nascentes 21

2.4 Instrumentos da gestão urbana 24

2.5 Método da Análise Hierárquica de Processos (AHP) 25

3 Metodologia 28

3.1 Caracterização da área de estudo 28

3.1.1 Tipologia, uso e ocupação do solo 30

3.1.2 Vegetação nativa e climatologia 32

3.1.3 Dados socioeconômicos 33

3.2 Análise estatística de séries históricas de chuva e vazão 33

3.3 Análise de uso e ocupação do solo 37

3.4 Desenvolvimento do mapa de vulnerabilidade de nascentes 38

3.4.1 Definição dos parâmetros e critérios analisados 38

3.4.2 Determinação das matrizes e da Razão de Consistência 40

3.4.3 Obtenção das áreas e nascentes prioritárias 41

3.5 Propostas para intervenção e recuperação das nascentes 41

4 Resultados e discussões 43

4.1 Análise estatística das séries de vazão e precipitação 43

4.2 Análise de uso e ocupação do solo – refinamento da área de estudo.47

4.3 Desenvolvimento do mapa de vulnerabilidade de nascentes 48

4.3.1 Definição dos parâmetros e critérios analisados 48

4.3.2 Determinação das matrizes e da Razão de Consistência 52

4.3.3 Obtenção das áreas e nascentes prioritárias 54

4.4 Propostas para intervenção e recuperação das nascentes 56

5 Conclusão 62

5.1 Sugestões para os próximos trabalhos 63

Referências 65

ANEXO A – Artigo aprovado no Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos 71

APÊNDICE A – Resultados da aplicação do método de Dupla Massa 80

1 INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são unidades territoriais naturais delimitadas pelo relevo, responsáveis pela captação e drenagem das águas pluviais para um curso d'água principal e seus afluentes. Segundo Tucci (2001), uma bacia hidrográfica pode ser compreendida como um sistema dinâmico, onde os fatores climáticos, geológicos e antrópicos interagem, influenciando diretamente a disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos. Para o autor, a sua importância está no fato de que, dentro de uma bacia, há uma profunda interdependência dos seres vivos que dela se servem, entre si e com o ambiente, incluindo as populações humanas.

As nascentes, por sua vez, constituem a origem dos cursos d'água dentro das bacias hidrográficas, sendo essenciais para a manutenção do equilíbrio hídrico e ecológico da região. Elas garantem o fluxo contínuo dos rios, sustentam ecossistemas aquáticos e terrestres e contribuem para o abastecimento hídrico de comunidades diversas (Calheiros *et al*., 2009).

No entanto, a degradação das nascentes tem se tornado um problema crescente devido à expansão urbana desordenada e do setor agropecuário (Ferreira *et al*., 2020). No Brasil, muitas cidades e comunidades rurais foram historicamente formadas próximas a corpos hídricos devido à disponibilidade de água para consumo, irrigação, transporte e desenvolvimento econômico, razão pela qual muitas áreas de preservação permanente (APPs) acabam não sendo protegidas (Borges *et al*., 2011).

Os fatores mencionados comprometem a recarga dos aquíferos e a qualidade da água, tornando essencial a adoção de medidas de preservação e recuperação das áreas de nascentes. Além disso, é fundamental realizar o monitoramento contínuo dessas áreas, mesmo quando algumas delas não são acessíveis fisicamente, sendo o uso de imagens de satélite e sistemas de georreferenciamento uma alternativa viável para essa supervisão (Castro *et al*., 2014). Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo identificar as nascentes prioritárias na sub-bacia do Rio das Mortes, localizada no estado de Minas Gerais, visando propor intervenções adequadas ao contexto regional.

1.1 Justificativa

Regiões de nascentes desempenham um papel fundamental no ciclo hidrológico e na sobrevivência das comunidades biológicas, influenciando na disponibilidade e na qualidade da água (Meister, 2017). No entanto, ações antrópicas, como a ocupação urbana irregular e práticas agropecuárias inadequadas, têm comprometido a sustentabilidade dos recursos hídricos a longo prazo (Oliveira, 2024).

Nesse contexto, diversas iniciativas vêm sendo desenvolvidas para mitigar os impactos ambientais e promover a recuperação de nascentes e bacias degradadas. Entre elas, está o projeto “Proposição de carteira de projetos de intervenção vislumbrando o aumento da recarga das vazões afluentes, ampliação da flexibilização operativa dos reservatórios e melhoria da navegabilidade nas bacias dos rios São Francisco, Parnaíba, Paranaíba e Grande”, realizado pelas Universidades Federais de Ouro Preto e Viçosa, em parceria com o Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional (Brasil, 2023). Esse projeto objetiva identificar áreas prioritárias para intervenções que garantam a proteção e recuperação de nascentes, assegurando a manutenção dos serviços ecossistêmicos e o equilíbrio ambiental.

O presente estudo integra esse conjunto de pesquisas, contribuindo para a primeira meta estabelecida pelo projeto: a proposição de estratégias para a recuperação e preservação de nascentes. A área de estudo selecionada é a sub-bacia do Rio das Mortes, inserida na bacia hidrográfica do Rio Grande.

De acordo com dados do MapBiomas (2023), essa bacia é predominantemente antropizada, principalmente por atividades agropecuárias, mas também apresenta um aumento significativo da porção urbana ao longo dos anos. Assim sendo, cresce o alerta para contaminação dos cursos d’água através do uso e manejo inadequado de produtos agrícolas, e para a maior impermeabilização do solo, a qual dificulta a recarga hídrica.

Dessa forma, esta pesquisa busca contribuir para a identificação de áreas que demandam por maior atenção, permitindo o melhor planejamento de estratégias e práticas sustentáveis que garantam a preservação dos recursos hídricos para as gerações futuras.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho é a identificar nascentes prioritárias da sub-bacia hidrográfica do Rio das Mortes, localizada na bacia do Rio Grande, e propor intervenções para a recuperação e preservação dessas áreas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar o mapeamento e a caracterização da sub-bacia, considerando seus aspectos físicos, ambientais e socioeconômicos;
- Levantar e analisar estatisticamente as séries históricas de precipitação e vazão, estabelecendo relações com as mudanças no uso e ocupação do solo entre 1985 e 2023;
- Definir a área de estudo a partir da avaliação integrada de parâmetros hidrológicos, ambientais e sociais;
- Aplicar a metodologia AHP para atribuir pesos aos critérios definidos e elaborar o mapa de vulnerabilidade das nascentes;
- Correlacionar os resultados obtidos com as dinâmicas sociais e a qualidade da água, de modo a identificar as áreas mais críticas;
- Selecionar as nascentes prioritárias e propor medidas voltadas à sua conservação e/ou recuperação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as bases teóricas essenciais para a compreensão deste estudo, as quais partem de conceitos e experimentos consolidados por outros estudiosos. Os temas foram selecionados de acordo com sua correlação existente e a relevância desta no entendimento dos objetivos mencionados, sendo eles: a dinâmica das bacias hidrográficas e recarga hídrica, a influência das nascentes na disponibilidade hídrica e segurança ambiental, a recuperação e conservação de nascentes, instrumentos da gestão urbana e, por fim, o Método da Análise Hierárquica de Processos (AHP).

2.1 Dinâmica das bacias hidrográficas e recarga hídrica

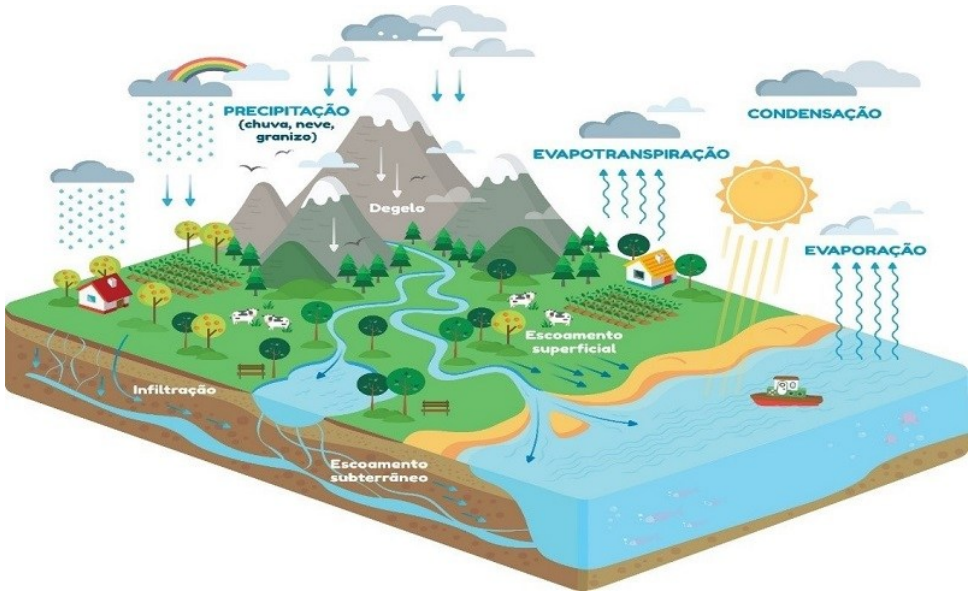
Segundo Silveira (1997), o estudo dos recursos hídricos implica em conhecimento do ciclo hidrológico, seus componentes e as relações entre eles. Compreender o funcionamento cíclico da água no planeta é fundamental e ponto de partida para qualquer análise no campo da hidrologia.

Para a compreensão do ciclo hidrológico, pode-se descrevê-lo como tendo início com a evaporação da água dos oceanos. O vapor resultante é transportado pelo movimento das massas de ar e, sob determinadas condições, é condensado, formando as nuvens que por sua vez podem resultar em precipitação. A precipitação que ocorre sobre a terra é dispersa de várias formas. A maior parte fica temporariamente retida no solo próximo de onde caiu e finalmente retorna à atmosfera por evaporação e transpiração das plantas. Uma parte da água restante escoa sobre a superfície do solo (escoamento superficial) ou através do solo para os rios (escoamento subsuperficial), enquanto parte penetra profundamente no solo (infiltração e percolação), indo suprir o lençol d'água subterrâneo (Vilella e Mattos, 1975). A Figura 1 representa em síntese o processo descrito pelos autores.

O ciclo hidrológico compõe-se de uma série de variáveis hidrológicas interconectadas e que, por diversos fatores biofísicos, influenciam e são influenciadas pelas descargas fluviais e desempenham um papel decisivo na regulação da rede de drenagem de uma bacia hidrográfica (Diaz, 2020). Para Tucci (1997) e Silveira (2001)

a bacia hidrográfica constitui uma área de captação natural das precipitações e, em função de suas vertentes, desenvolve uma rede de drenagem constituída por cursos que confluem até resultar em um leito com ponto de saída, denominado exutório. Assim, é possível considerá-la como diretamente afetada pelo ciclo da água ao mesmo tempo em que se torna um importante mecanismo da engrenagem, visto que atua na recepção, infiltração, escoamento, armazenamento e recondução dos fluxos.

Figura 1 – Ciclo natural da água



Fonte: EPAL (2025)

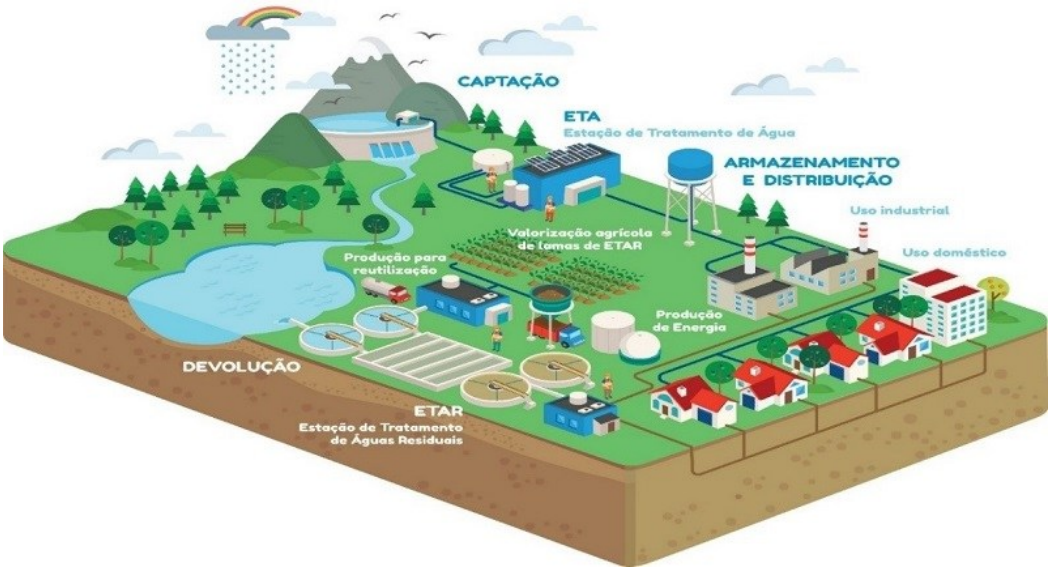
Como a bacia hidrográfica é o ambiente unitário de integração das águas com o meio físico, o meio biótico e o meio social, econômico e cultural, adotá-la como unidade ideal de planejamento e intervenção é uma das alternativas para promover a gestão destas áreas (Machado, 2003). Vale ressaltar, que a delimitação de uma bacia hidrográfica está atrelada a fatores como a topografia e relevo, rede de drenagem, divisores naturais, padrões de chuva e outros que caracterizam determinada região, onde um ciclo hidrológico próprio existe e acaba sendo alterado ao longo do tempo.

De acordo com Tucci (2003), o ciclo hidrológico natural é constituído por diferentes processos físicos, químicos e biológicos. Quando o homem entra dentro deste sistema e se concentra no espaço, produz grandes alterações que modificam drasticamente

este ciclo e trazem consigo impactos significativos (muitas vezes de forma irreversível) no próprio homem e na natureza.

Oliveira (2024) afirma que algumas dessas alterações podem ocorrer por meio das forças da natureza, mas o processo natural tem sido acelerado pelas derivações antropogênicas decorrentes do desenvolvimento urbano e rural desordenado e pela falta de planejamento sobre a utilização dos recursos naturais, o que influencia no seu sistema hídrico. Por exemplo, no Brasil, a ANA – Agência Nacional de Águas – afirma que no tocante à dinâmica da água no território brasileiro, as principais entradas correspondem à chuva sobre todo o território e às vazões procedentes de outros países na bacia Amazônica. Parte dessa água é consumida pelas diferentes atividades econômicas, parte retorna ao ambiente e outra parte sai do território para o Oceano Atlântico ou para países vizinhos na bacia do Prata, pelos rios Paraguai, Paraná e Uruguai. Desse modo, quando locadas em zonas urbanas adensadas ou em zonas rurais de caráter agropecuário, o número de atividades e a necessidade do recurso cresce, consumindo mais e devolvendo menor quantidade ao ciclo. É como se novas etapas entrassem na rota cíclica da natureza, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Ciclo urbano da água



Fonte: EPAL (2025)

Para estudar o ciclo da água na cidade é necessário considerar que a urbanização, mesmo em condições de planejamento, resultará em modificações no meio ambiente alterando suas características desde o clima, relevo, tipos e formação do solo, recursos hídricos e cobertura vegetal (Silva; Oliveira; Sousa, 2023).

Nas áreas urbanas, para Seraphim e Bezerra (2019), os principais fatores que acarretam na perda da infiltração natural estão relacionados com (i) o selamento do solo, que consiste na expansão de áreas impermeáveis (ruas, estacionamentos, telhados, calçadas, dentre outros) e que resultam em área com inexistência de infiltração e no aumento na velocidade do escoamento; (ii) a compactação do solo, associada ao processo de movimentação da terra, por meio de corte, terraplanagem e fundação, além da passagem excessiva de maquinários pesados e pessoas e (iii) a cobertura vegetal, que afeta as taxas de infiltração da água quando o processo de urbanização sobrevém à perturbação do solo por meio da retirada da vegetação nativa, principalmente a cobertura arbórea com suas raízes profundas, as substituindo por gramíneas ou deixando o solo exposto.

O processo de infiltração da água no solo é de extrema importância para a recarga dos reservatórios subsuperficiais. As águas subsuperficiais abastecem em períodos de estiagem a flora e os canais abertos, além de constituírem fontes constantes para o abastecimento doméstico e demandas industriais, urbanas e agrícolas (Coelho Netto, 1995). Já o aumento da velocidade do escoamento superficial, acaba causando inundações nas cidades, onde geralmente o deságue é dado em canais ou galerias retificadas, que por sua vez não suportam o volume de água. Assim sendo, tais condições não prejudicam apenas o ambiente natural, mas também as atividades socioeconômicas e o bem estar da população.

Além da impermeabilização direta nas cidades, a remoção vegetação nativa contribui ativamente na minimização da taxa de infiltração, principalmente nas zonas rurais. A pesquisa realizada por Palivoda e Povaluk (2015) em onze nascentes da região rural de Itaiópolis-SC, constatou que apenas 11% delas estão conservadas, não sendo respeitado o raio mínimo da área de preservação permanente, cuja invasão fora para fins de cultivo agrícola e/ou pastos, causando insuficiência de matas ciliares.

Ademais, o manejo inadequado do solo nos cultivos também tem forte influência na infiltração, uma vez que o não revolvimento do solo no sistema de plantio direto, tende a ocasionar compactação do solo pelo tráfego intensivo de máquinas, o que pode diminuir consideravelmente a infiltração (Mancuso *et al*., 2014).

No estudo do Planalto de Loess – China, Du, Zhang e Li (2021) constataram que a proporção de recarga de água subterrânea pela água do solo sob diferentes tipos de uso da terra seguiu a seguinte ordem: florestas > pastagens > áreas de arbustos > terras agrícolas. Esse fenômeno ocorre devido ao menor grau de evaporação e fracionamento da água do solo nas três últimas categorias, o que faz com que a precipitação se torne a principal fonte de recarga da água no solo.

Nesse contexto, surge ainda outro desafio significativo para as bacias hidrográficas: as mudanças climáticas, que têm impactado o planeta principalmente por meio do efeito estufa. Segundo Wanders *et al*. (2015), as secas prolongadas são consideradas indicadores das mudanças climáticas e afetam de maneira substancial o ciclo hidrológico. A ocorrência de secas é induzida pela precipitação inferior à média histórica e/ou por anomalias térmicas, que, por sua vez, contribuem para a redução da umidade do solo.

As condições anteriormente mencionadas resultam em um déficit na recarga hídrica das bacias hidrográficas, uma vez que reduzem a taxa de infiltração da água, comprometendo a capacidade de armazenamento dos aquíferos. Estes, por sua vez, continuam sendo explorados para o abastecimento público e/ou para atividades econômicas. Simultaneamente, a reposição hídrica proveniente das precipitações tem mostrado uma diminuição nas ocorrências significativas, especialmente nas áreas urbanizadas e antropizadas.

Melo Neto, Chagas e Méllo Junior (2013) definem o termo recarga como a quantidade de água, por unidade de área, que penetra no subsolo até atingir o lençol freático contribuindo para aumentar a reserva subterrânea permanente ou temporária de aquíferos, os quais constituem fontes alternativas ou fontes primárias de exploração de água, dependendo de características climatológicas e hidrogeológicas da região onde esteja localizado.

Sendo assim, De Vargas *et al.* (2023) alertam para o fato de que a recarga de água subterrânea integra o ciclo hidrológico e possui relação direta com disponibilidade hídrica subterrânea e superficial das bacias hidrográficas. Ressaltam ainda que para atender à crescente demanda, deve-se ampliar os esforços para o delineamento e preservação das áreas de recarga, pois a definição de zonas potenciais de recarga pode ser crucial para a segurança hídrica de uma cidade ou região. A importância da segurança hídrica, foi reforçada quando ganhou lugar entre os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). O Objetivo número 6 tem o intuito de "*assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento básico*" (Organização das Nações Unidas, 2015).

A segurança hídrica envolve a avaliação dos riscos associados à gestão sustentável da água, considerando tanto a oferta em termos de quantidade e qualidade, quanto os impactos sobre a sociedade, a infraestrutura e os ecossistemas (Tucci; Chagas, 2017). Assim, o aumento da recarga hídrica é crucial para o equilíbrio do ciclo hidrológico e das bacias hidrográficas na contemporaneidade, uma vez que contribui para a garantia da segurança hídrica, assegurando a disponibilidade de água potável, com repercussões diretas na segurança alimentar e econômica da sociedade.

2.2 Influência das nascentes na disponibilidade hídrica

As nascentes integram o sistema hidrológico e desempenham múltiplas funções nos ecossistemas. Elas apresentam características físico-químicas específicas que criam um microambiente único na interface entre os ambientes terrestre e aquático, contribuindo para o equilíbrio desses sistemas (Meister, 2017). Dessa forma, as nascentes assumem um papel crucial na preservação da integridade das bacias hidrográficas.

Felippe *et al*. (2009) destacaram que, apesar da indiscutível importância ambiental das nascentes, são escassos os estudos que as tratam como foco principal, o que resulta na ausência de um conceito amplamente consolidado na literatura científica. Além disso, o termo "nascente" é exclusivo da língua portuguesa, e suas traduções em outros idiomas frequentemente remetem mais ao conceito de "fluxo" do que à ideia específica associada ao termo em português. Esse cenário motivou dois dos autores

a desenvolverem, em 2013, um estudo com o objetivo de contribuir para o avanço da discussão conceitual sobre as nascentes de cursos d'água. Para isso, utilizaram um painel de especialistas e propuseram uma definição multidisciplinar, alinhada às exigências teóricas e práticas apresentadas pela comunidade acadêmica.

No estudo mencionado, foram selecionados quinze conceitos para o termo "nascente", os quais foram submetidos à votação por especialistas de diversas áreas do conhecimento. Como resultado, as duas definições mais aceitas foram a estabelecida pela Resolução CONAMA 303/2002, que define nascente como o *"local onde aflora naturalmente, mesmo que de forma intermitente, a água subterrânea",* e a proposta por Felippe e Junior (2009), que a descreve como *"um sistema ambiental caracterizado por uma feição geomorfológica ou estrutura geológica onde ocorre a exfiltração da água, de forma temporária ou perene, formando canais de drenagem a jusante."*

Assim sendo, ao correlacionar os conceitos, uma nascente pode ser considerada, então, como um sistema ambiental em que o afloramento da água subterrânea ocorre naturalmente de modo temporário ou perene, e cujos fluxos hidrológicos na fase superficial são integrados à rede de drenagem (Felippe; Junior, 2013).

Embora haja divergência quanto à definição exata do termo "nascente", é consenso na literatura científica sobre a importância dessas formações e a necessidade de sua preservação para o equilíbrio ambiental. Esse consenso decorre da relação estreita entre as nascentes e a recarga hídrica das bacias hidrográficas. A área potencial de recarga de uma nascente e seu entorno estão localizadas em regiões onde ocorre um aquífero superficial, sendo o tipo de solo determinado por análises físico-químicas. Sabe-se que os aquíferos são recarregados diretamente pelas águas de infiltração vertical, provenientes da superfície, que percolam com maior facilidade e velocidade em fraturas de rochas e em materiais menos densos. Nesse contexto, as porções superiores da encosta a montante da nascente são classificadas como zonas de recarga (Cajado, 2022).

É amplamente reconhecido que, por muitos anos, o planejamento urbano desconsiderou as bacias hidrográficas, tratando-as apenas como áreas para uso e

descarte, sem a devida conscientização sobre a importância desses sistemas no ciclo hidrológico (Tucci, 2003). Nesse contexto, a urbanização desordenada pode ser considerada uma das principais causas da degradação das nascentes, pois, além da invasão das áreas responsáveis pela sua preservação, frequentemente ocorreu o aterramento e/ou rebaixamento do lençol freático para viabilizar construções de caráter impermeável. Dessa forma, foi estabelecido um ciclo prejudicial à recarga hídrica e à dinâmica das bacias hidrográficas nas áreas urbanas.

Outra dimensão da problemática ocorre nas zonas rurais, onde a ação antrópica, especialmente o desmatamento para a prática de lavouras, pastagens e mineração, compromete a preservação das matas ciliares – vegetação essencial para a proteção dos corpos d'água – e gera processos erosivos que podem assorear e reduzir a oxigenação das nascentes (Palivoda; Povaluk, 2015). Além disso, a presença de animais e a infiltração de agrotóxicos contribuem significativamente para a contaminação da água.

Segundo Meister (2017), a crescente degradação das nascentes pode estar impactando significativamente o cotidiano das pessoas, e suas consequências podem ser extremamente devastadoras. Cerca de um bilhão de pessoas não têm acesso à água potável, adequada para consumo, conforme relatório anual de 2014 da Food and Agriculture Organization (FAO), uma das agências da Organização das Nações Unidas (ONU) voltada para alimentação e agricultura. O documento ainda projeta que, até 2050, aproximadamente dois bilhões e quinhentos milhões de pessoas poderão ser privadas de acesso à água potável (Martins, 2021).

Não é por acaso que a água é um recurso natural fundamental para o desenvolvimento social e econômico contemporâneo, o que a torna um tema central em diversas conferências internacionais. Esse cenário evidencia a necessidade de instrumentos legislativos voltados para o enfrentamento da escassez hídrica, sendo a conservação das nascentes uma das principais estratégias, devido ao seu papel crucial na garantia da disponibilidade de água.

No Brasil, os principais instrumentos da legislação que tem o tema das nascentes como referência, são a Lei n°12.651/2012, cuja proposta define a obrigatoriedade de

uma Área de Preservação Permanente (APP) nas imediações de nascentes, contemplando um raio de 50 metros, e a Lei 14.653/2023, a qual estabelece regras para recuperação, recomposição da vegetação nativa circundante e proteção das nascentes, além de incluí-las como atividades passíveis de financiamento com recursos públicos.

No entanto, a mera delimitação das áreas não constitui uma solução suficiente para a problemática da degradação das nascentes, uma vez que, além do descumprimento das normas legais em algumas situações, a contaminação e/ou danos às áreas podem originar-se de fontes externas, não restritas ao seu entorno imediato. Assim, é fundamental que as disposições previstas nos instrumentos legais mais recentes sejam efetivamente implementadas para garantir a eficácia das medidas de proteção.

2.3 Recuperação e conservação de nascentes

A recuperação e conservação das nascentes é de extrema importância para o equilíbrio dos recursos hídricos, pois elas são um dos principais instrumentos da recarga hídrica cujo papel indispensável na vertente ambiental, social e econômica foi previamente descrito nesse trabalho. As etapas desse processo são citadas por diversos estudiosos, projetando um senso comum de que é necessário isolar, plantar espécies nativas e conscientizar a população, nessa ordem. Porém, antes de implantá-las é preciso conhecer e entender seu contexto individualmente. Para Cajado (2022), isso deve ser feito de tal modo que possibilite a viabilidade de um plano de revitalização adequado e que compreenda as particularidades físicas do ambiente, bem como leve em consideração as necessidades daqueles que fazem uso desses recursos.

Segundo Pinto *et al*. (2004), a quantidade e qualidade de água das nascentes de uma bacia hidrográfica podem ser alteradas por diversos fatores, destacando-se a declividade, o tipo de solo e o uso da terra, principalmente das áreas de recarga, pois influenciam no armazenamento da água subterrânea e no regime da nascente e dos cursos d’água. Dessa forma, os autores enfatizam a importância de estudar as interações entre os recursos naturais e as ações antrópicas nas bacias hidrográficas,

com destaque para a caracterização do meio físico dessas bacias, especialmente nas áreas de recarga das nascentes. O objetivo é identificar os pontos críticos, visando à preservação e manutenção da disponibilidade de água.

Neste contexto, destaca-se a aplicação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e do Sensoriamento Remoto (SR). De acordo com Lopes e Ferreira (2005), citados por Castro *et al*. (2014), um SIG pode ser definido como a integração técnica e conceitual das ferramentas desenvolvidas pela informática para capturar, armazenar, processar dados e apresentar informações espaciais georreferenciadas. Para a formação de um banco de dados para um SIG, os mesmos são coletados por meio de mapas cartográficos, dados de campo como tipo de solo, precipitação, imagens de satélite, fotografias aéreas, que são armazenados e manipulados segundo a informação que se deseja obter. Dessa forma, vem se tornando uma ferramenta de enorme valia no planejamento e gestão na tomada de decisões.

O método de SR, por sua vez, vem sendo aplicado para o monitoramento de coberturas vegetais, queimadas e dinâmicas de alterações da paisagem, permitindo que se estabeleçam ações prioritárias para a conservação da biodiversidade e seu desenvolvimento sustentável (Ribeiro *et al.*, 2019). No caso das bacias hidrográficas, o mapeamento voltado para a caracterização física permite a obtenção de dados sobre topografia, hidrografia e o tipo, uso e cobertura do solo. Do ponto de vista qualitativo, é possível identificar pontos de monitoramento, restrições e impactos ambientais, entre outros aspectos. Além disso, os *softwares* de SIG fornecem dados quantitativos que são utilizados em estudos hidrológicos das bacias, como a área de cobertura de cada tipologia de solo e a determinação do talvegue principal.

Castro *et al.* (2014) elencam em seu estudo alguns trabalhos notáveis que ilustram o funcionamento e eficácia do SIG na gestão ambiental. De acordo com a análise dos autores, Martins et al. (2005) utilizaram os parâmetros fisiográficos juntamente com informações do uso da terra e ocupação humana para determinar o grau de deterioração de uma sub-bacia e propor um zoneamento ambiental. Os resultados obtidos permitiram avaliar a deterioração ambiental da sub-bacia e abrir possibilidades para elaborar prognósticos para um maior equilíbrio no futuro manejo da sub-bacia e

de sua preservação tendo, como pressuposto, o equilíbrio possível entre o desenvolvimento com a preservação ambiental.

No caso das nascentes, o sensoriamento remoto colabora na delimitação das suas áreas de proteção, na identificação da vegetação nativa e dos cursos d'água que dependem da recarga hídrica associada a elas. Se usado corretamente, o geoprocessamento tem potencial para ser aliado direto da manutenção do volume de água, inclusive nos períodos de estiagem.

Após a conclusão da fase de estudos, é fundamental dar continuidade às demais etapas do processo de revitalização das nascentes. Com a delimitação do raio das Áreas de Preservação Permanente (APPs), o isolamento da área pode ser realizado de maneira eficaz. A instalação de cercas, juntamente com bebedouros no perímetro, impede a passagem de animais e reduz o risco de contaminação da área (Baggio *et al*., 2013).

No que diz respeito à recomposição da vegetação, Moraes (2013) distingue duas abordagens de intervenção: as técnicas não intervencionistas, que envolvem a eliminação das fontes de degradação, como o fogo, a presença de espécies invasoras ou animais, e dependem da proximidade de florestas remanescentes para auxiliar na regeneração natural da área degradada; e as técnicas intervencionistas, como nucleação, enriquecimento e plantio total, que, além de eliminar as fontes de degradação, empregam ações mais diretas, como a semeadura direta e o plantio de mudas de espécies florestais. A escolha da abordagem a ser utilizada depende das características específicas do ambiente em questão.

É também fundamental direcionar a devida atenção à conservação do solo, visto que seus poros permitem a passagem de água e consequente afloramento das nascentes, além de ser o berço da vegetação. A técnica da deposição de material orgânico na superfície do solo, conhecida como serapilheira, a qual é composta por folhas, ramos, órgãos reprodutivos e detritos, é de grande importância para a ciclagem de nutrientes e a manutenção da umidade e atividade biológica da área, mantendo a produtividade de ecossistemas florestais (Henriques *et al*., 2016). Ademais, o uso de algumas técnicas compensatórias como as curvas de nível e bacias de infiltração é

capaz de reduzir a velocidade do escoamento superficial e mitigar erosões em zonas propensas.

Por fim, uma etapa crucial é a conscientização da população sobre a importância da conservação das nascentes. Uma vez alcançada, essa conscientização facilita todos os outros processos, visto que, se a maioria da população se engajar, a degradação será significativamente reduzida. Esse objetivo pode ser alcançado por meio da mobilização e educação socioambiental, não apenas de forma explicativa, mas, principalmente, prática, permitindo que as pessoas se sintam integradas e comprometidas com uma causa diretamente vinculada à sua própria sobrevivência.

Um exemplo de aplicação das etapas descritas é projeto de recuperação de nascentes intitulado "*Água é vida: recuperação de nascentes na Comunidade Macaúba, Catalão (GO)".* O trabalho teve início em agosto de 2019 com reuniões comunitárias a fim de conhecer a realidade e as principais nascentes da comunidade, a metodologia utilizada envolveu a realização do cercamento da APP, limpeza da área e plantio das mudas de espécies nativas do Cerrado, distribuídas em espaçamentos de 3,0 x 3,0 (m). Cerca de um ano depois, as quatro nascentes selecionadas voltaram a verter no período de cheia (Reis *et al*., 2020).

Diante desse panorama, percebe-se que a recuperação das nascentes não pode ser tratada apenas como um processo ecológico ou hidrológico. Ela depende de um planejamento territorial que articule gestão ambiental e instrumentos da política urbana, garantindo a integração entre conservação e ordenamento do espaço.

2.4 Instrumentos da gestão urbana

A recuperação de nascentes no contexto urbano exige a articulação entre políticas ambientais e instrumentos do planejamento urbano. O Estatuto da Cidade – Lei nº 10.257/2001, estabelece que o planejamento municipal deve integrar aspectos ambientais e territoriais, utilizando instrumentos como o zoneamento ambiental, o zoneamento territorial ambiental (ZTA) e a definição de áreas de preservação permanente (APPs) para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos (Brasil, 2001).

A integração entre gestão urbana e gestão das águas é um desafio reconhecido na literatura. Estudos sobre a Região Metropolitana de São Paulo destacam a importância de adequar a legislação urbanística aos instrumentos ambientais, especialmente nas áreas de proteção e recuperação de mananciais (APRM). Isso envolve o alinhamento entre Planos Diretores Participativos (PDP) e Planos de Desenvolvimento e Proteção Ambiental (PDPA) (Alvim; Kato; Bruna, 2012). Essa integração permite que medidas de proteção de nascentes sejam previstas desde o planejamento urbano, evitando que a expansão urbana comprometa a recarga hídrica e a qualidade da água (Tucci; Mendes, 2006).

Casos concretos demonstram que a aplicação desses instrumentos é viável. Em São José dos Campos (SP), o Programa de Revitalização de Nascentes estruturou-se como política pública municipal, combinando planejamento ambiental, educação ambiental e participação comunitária. O programa articulou ações como cercamento de nascentes, revegetação e incorporação dessas áreas nos planos setoriais da cidade (Penido, 2013).

Assim, observa-se que uma abordagem integrada, que una políticas municipais, legislação ambiental e participação social é capaz de fomentar a restauração de nascentes em áreas urbanas, trazendo benefícios mútuos, como a geração de renda por meio de incentivos fiscais e o aumento da segurança hídrica de longo prazo. A efetividade das políticas públicas para a restauração de nascentes depende não apenas da legislação e da participação comunitária, mas também de métodos técnicos que permitam hierarquizar e priorizar áreas críticas. Nesse sentido, a aplicação de ferramentas multicritério, como o AHP, oferece suporte científico e transparente às tomadas de decisão.

2.5 Método da Análise Hierárquica de Processos (AHP)

O Método da Análise Hierárquica de Processos (AHP) é um modelo proposto por Thomas L. Saaty na década de 1970, sendo apoio multicritério à decisão que decompõe um problema complexo em uma hierarquia de critérios e subcritérios, obtendo prioridades por meio de comparações par a par entre elementos dessa estrutura (Saaty, 2008).

O procedimento do Método AHP resulta em uma comparação pareada dos fatores baseada em uma matriz quadrada na qual o número de linhas e colunas é definido pelo número de fatores a serem ponderados, e a importância de cada um é comparada com os demais (López, 2019).

Sua aplicação inicia pela definição do objetivo decisório, seguida da identificação dos critérios e, quando necessário, subcritérios, finalizando com as alternativas a serem avaliadas. Essa representação hierárquica permite capturar tanto aspectos qualitativos quanto quantitativos do problema (Saaty, 2008).

Os julgamentos são feitos dois a dois usando a escala fundamental de 1 a 9 (e seus recíprocos), na qual 1 indica “igual importância” e 9 “importância extrema”. A escala traduz julgamentos qualitativos em razões numéricas, facilitando o cálculo das prioridades. Dadas as matrizes de comparação, as prioridades podem ser obtidas via autovetor principal ou via média geométrica das linhas. Em seguida, as prioridades locais são agregadas ao longo da hierarquia para produzir os escores finais das alternativas (Saaty, 2008).

Como julgamentos humanos podem ser inconsistentes, o AHP mede a consistência por meio do Índice de Consistência (IC) e da Razão de Consistência (RC), definida como RC = IC / IR, onde IR é o Índice Aleatório de Saaty pré-definido pelo autor de acordo com a quantidade de critérios avaliados e o IC calculado pela relação do maior autovalor da matriz – nomeado λ máximo – e o número de atributos analisados. A literatura recomenda RC ≤ 0,10 como limite de consistência aceitável (Saaty, 1980; Saaty, 2008).

Para decisões envolvendo múltiplas áreas de atuação, é comum agregar julgamentos por média geométrica das matrizes ou dos vetores de prioridade individuais, obtendo-se uma matriz ou solução grupal sobre a qual se checa a consistência e se prossegue à síntese (Saaty, 2008).

Um exemplo de aplicação do método no contexto da conservação de nascentes, é o estudo de Kassa *et. al* (2023), que usou fatores como geologia, solo, densidade de drenagem, uso e ocupação do solo e declividade para identificar zonas potenciais de recarga de águas subterrâneas.

Além do setor ambiental, o AHP é amplamente utilizado em gestão, logística, e políticas públicas. Rosa, Steiner e Colmenero (2015) aplicaram o modelo para definição estrutural e operacional de centros de distribuição de uma empresa do ramo alimentício, enquanto França (2024) utilizou a metodologia para decidir sobre a coleta seletiva em municípios paraenses.

3 METODOLOGIA

Este tópico apresenta a metodologia adotada para a identificação e a proposição de intervenções voltadas à recuperação das nascentes na sub-bacia do Rio das Mortes. O processo metodológico contemplou: a caracterização da área de estudo; a análise das séries fluviométricas e pluviométricas da região; a avaliação do uso e ocupação do solo ao longo dos anos; a elaboração do mapa de vulnerabilidade das nascentes; e, por fim, a seleção dos casos mais críticos, nos quais foram sugeridas estratégias conservacionistas específicas. O fluxograma da Figura 3 sintetiza a organização dessas etapas.

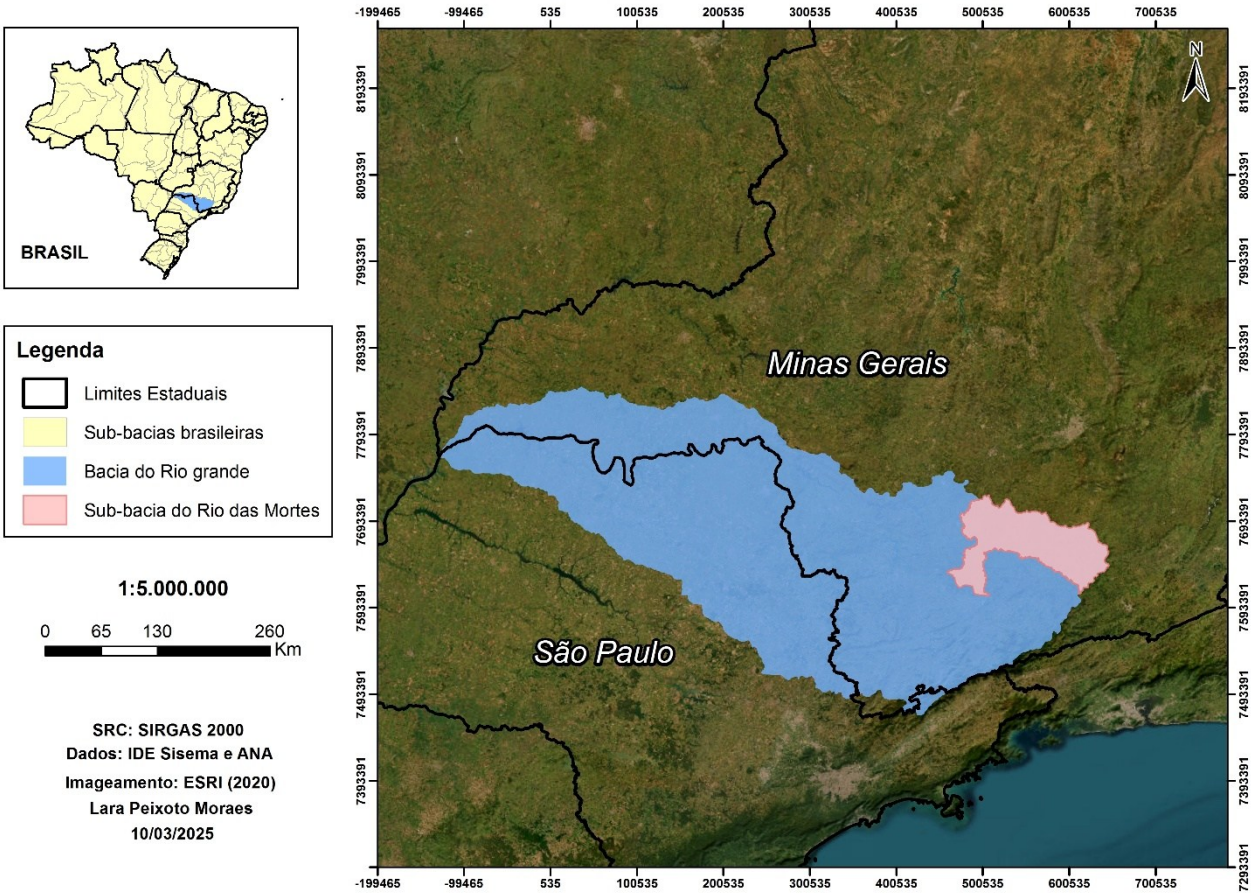
Figura 3 – Fluxograma metodológico

Fonte: Autora (2025)

3.1 Caracterização da área de estudo

A sub-bacia do Rio das Mortes ou GD2, possui área de 10.540 km² (IGAM, 2024) e está localizada na porção nordeste da Bacia Hidrográfica do Rio Grande (Figura 4), abrangendo 42 municípios mineiros, sendo 10 deles por inteiro, tais como Barbacena, Lavras e São João Del Rei.

Figura 4 – Localização da sub-bacia do Rio das Mortes



Fonte: Autora (2025)

A área é dividida em outras 10 sub-bacias (Figura 5) e toda rede hídrica desagua no Rio Grande, o principal rio da bacia.

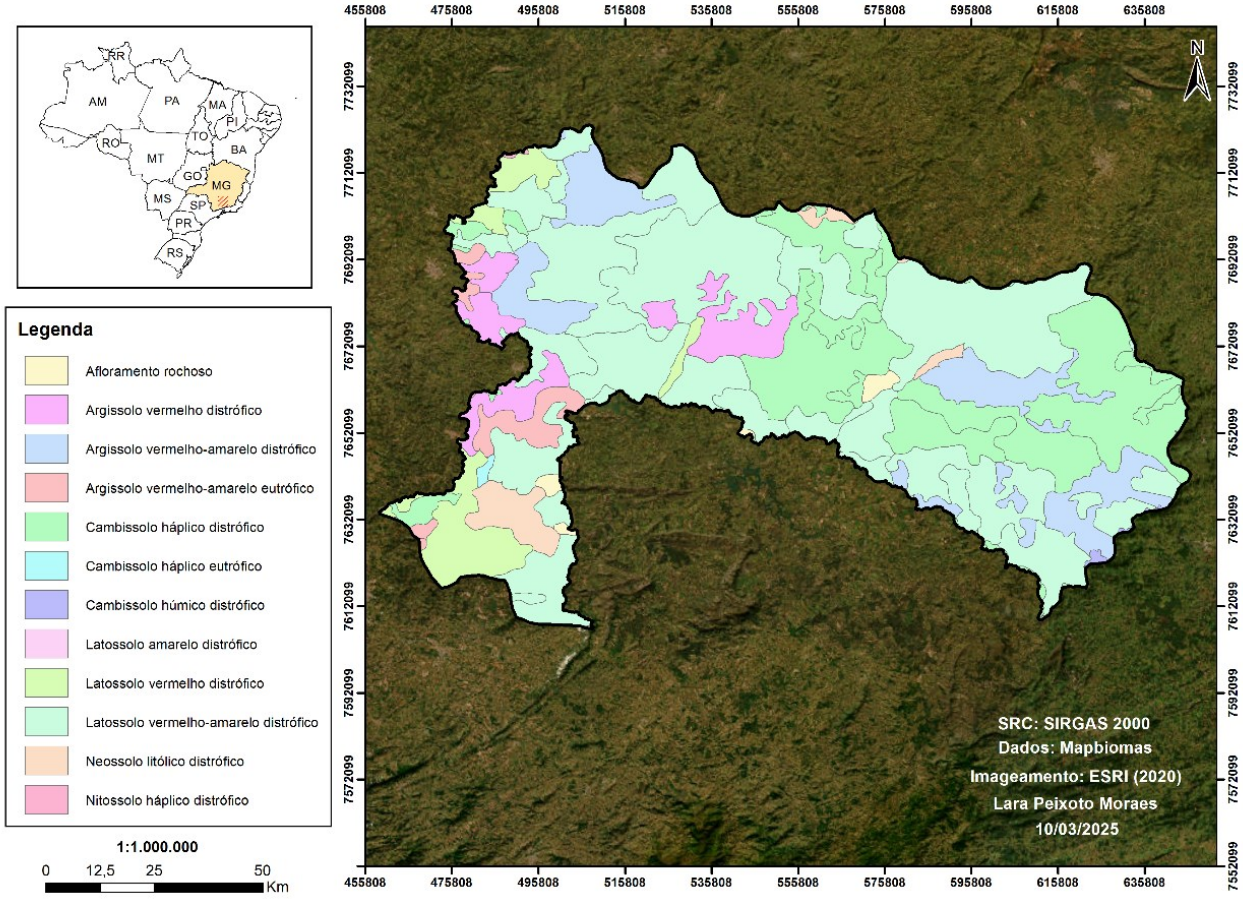
Figura 5 – Rede hidrográfica da sub-bacia do Rio das Mortes

Fonte: PDRH – GD2 (2014)

3.1.1 Tipologia, uso e ocupação do solo

De acordo com dados coletados no IDESisema, a região de estudo apresenta tipologia de solo diversa (Figura 6), sendo predominante o Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico e o Cambissolo Háplico Distrófico, ambos classificados dentro do grupo hidrológico tipo B. Os solos deste grupo são descritos por Sartori (2010) como solos com taxas moderadas de infiltração quando completamente molhados, moderadamente profundos a profundos, moderadamente drenados a bem drenados, com textura moderadamente fina a moderadamente grossa, detentores de uma taxa moderada de transmissão de água. Sendo assim, favorecem uma recarga relativamente eficiente e equilibrada das nascentes, garantindo que elas tenham aporte de água subterrânea ao longo do tempo, sem extremos de excesso ou limitação de infiltração.

Figura 6 – Mapa da tipologia do solo da sub-bacia do Rio das Mortes



Fonte: Autora (2025)

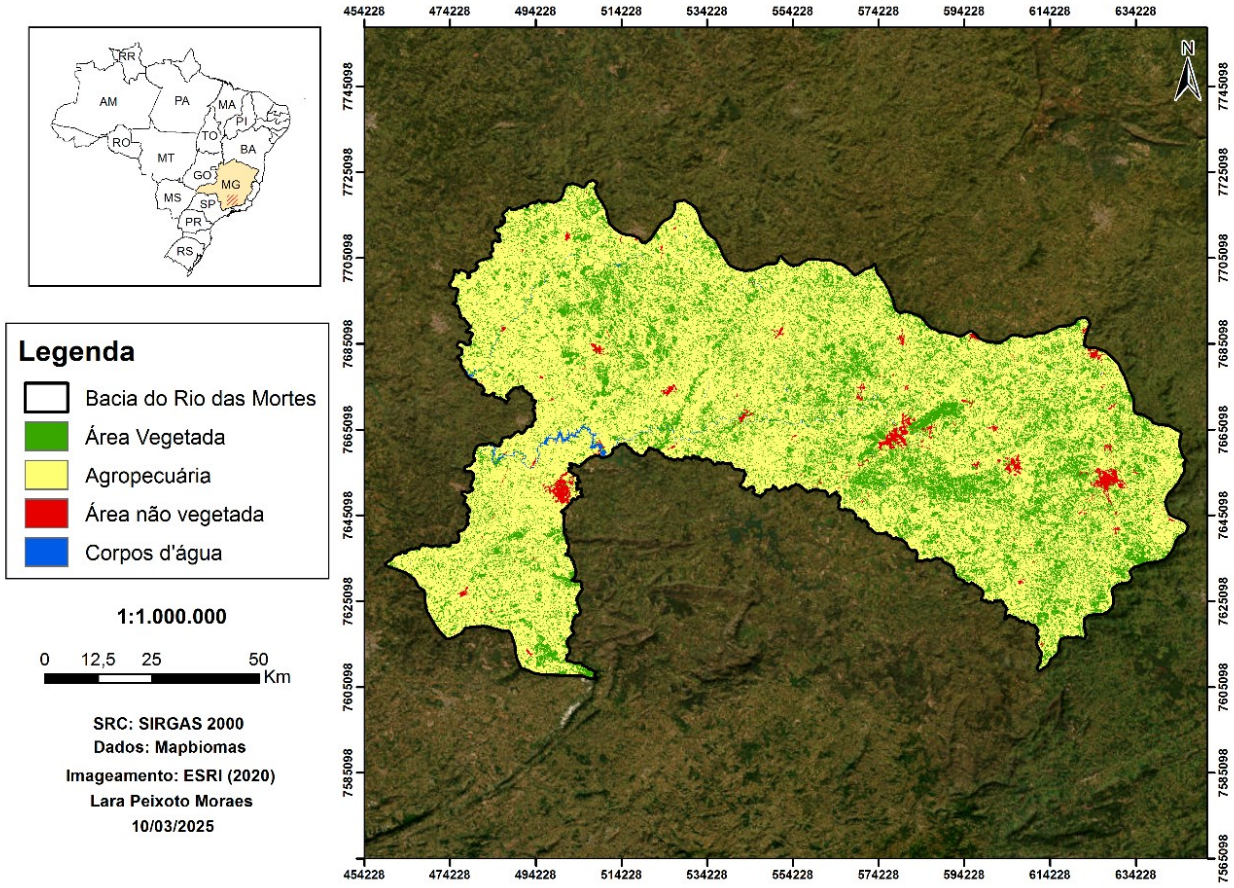
No que confere ao uso do solo da área, destaca-se a grande extensão das atividades agropecuárias, as quais somadas à área vegetada preenchem cerca de 98% do território. A porcentagem restante advém das áreas não vegetadas e dos corpos d'água. Tais informações são representadas na Figura 7 e na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantitativo de áreas da sub-bacia

Tipo de uso	Área (km²)	Área (%)
Agropecuária	7.851,0	74,5%
Área Vegetada	2.431,0	23,1%
Área não vegetada	153,5	1,5%
Corpos d'água	97,5	0,9%

Fonte: Autora (2025)

Figura 7 – Mapa do uso e cobertura do solo na sub-bacia das Mortes



Fonte: Autora (2025)

3.1.2 Vegetação nativa e climatologia

O único bioma da bacia é Mata Atlântica, caracterizado por englobar um diversificado conjunto de ecossistemas florestais com estruturas e composições florísticas bastante diferenciadas, acompanhando as características climáticas das regiões onde ocorre, tendo como elemento comum a exposição aos ventos úmidos que sopram do oceano (SOS, 2006).

Segundo o Plano Diretor de Recursos Hídricos da área, o clima predominante na região mais alta – Serra da Mantiqueira – é o tropical de altitude, com temperaturas inferiores a 0°C nos meses de junho a agosto, quando as massas frias podem provocar geadas. Já nos vales fluviais e vales encaixados na região central, onde são característicos os menores índices de pluviometria, as temperaturas no verão são

mais elevadas, alcançando valores extremos de até 35°C. Os meses mais chuvosos são coincidentes com a primavera/verão (setembro a março) e os de estiagem, com o outono/inverno (abril a agosto).

3.1.3 Dados socioeconômicos

A análise econômica da bacia, sob o ponto de vista do PIB municipal, mostra uma distribuição muito desigual da riqueza interna, resultando em maior concentração de população nos municípios com maior PIB (PDRH, 2014). As maiores participações correspondem às cidades de Barbacena, Lavras, São João Del Rei, Três Pontas e Campo Belo, nessa ordem. Segundo o IBGE esses cinco municípios concentram mais da metade do PIB e da população.

Dessa forma, a renda mensal da população varia de 2,0 salários mínimos per capta no município mais rico – Barbacena – a 1,6 salários em cidades menores como Bom Sucesso e Cana Verde (IBGE Cidades, 2022).

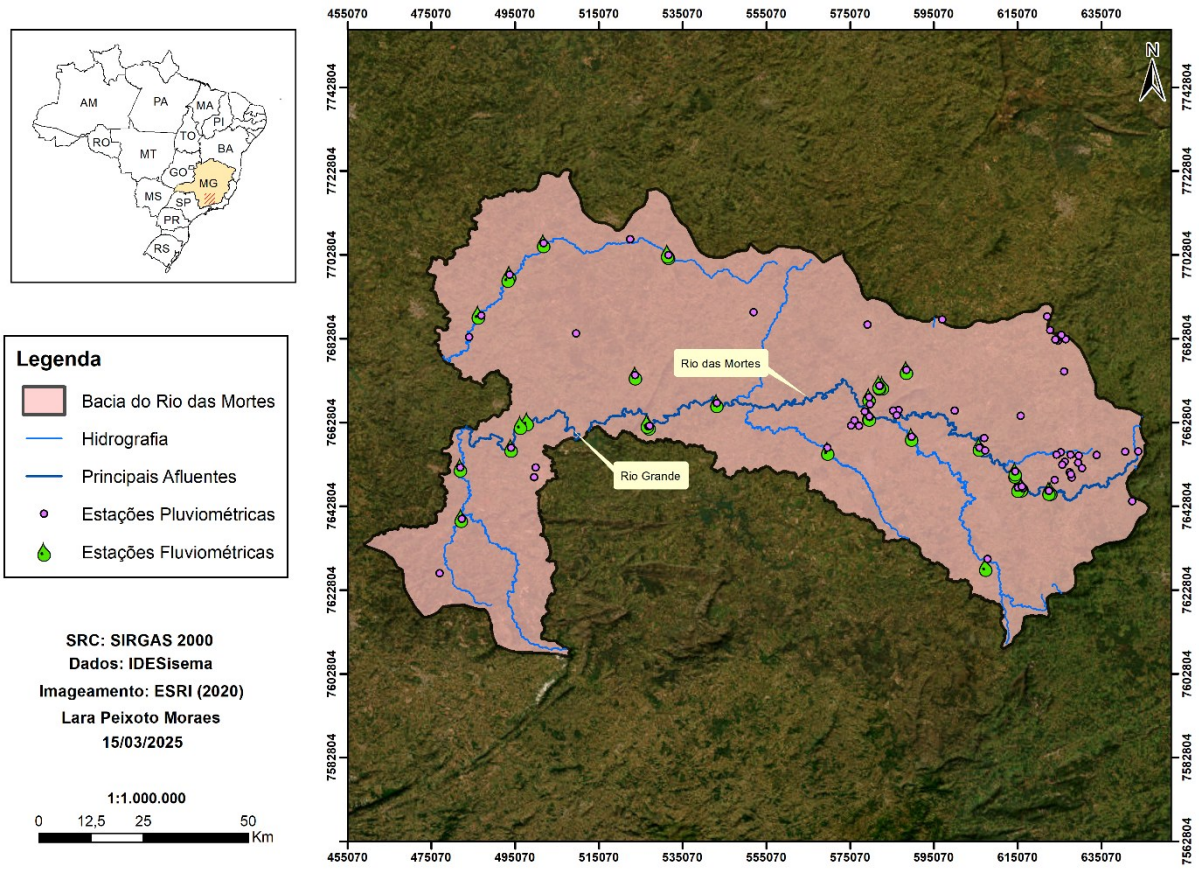
A atividade econômica de serviço está distribuída em 15 municípios, e está combinada com o setor industrial e o de impostos nas principais economias. O setor industrial predomina, também em 15 municípios, enquanto a agropecuária está distribuída em 20 municípios, com exclusividade em 17 deles (PDRH, 2014).

3.2 Análise estatística de séries históricas de chuva e vazão

A análise das estações fluviométricas é fundamental para compreender a disponibilidade hídrica e a dinâmica das vazões dos rios da bacia ao longo do tempo. De forma complementar, os dados provenientes das estações pluviométricas possibilitam identificar os fatores que influenciam a recarga hídrica, especialmente quando relacionados ao uso e ocupação do solo na região. Para esta etapa, foram utilizados os dados disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), acessíveis por meio do portal HidroWeb.

Previamente, as estações da bacia foram demarcadas via *shapefile* fornecido pelo IDESisema e apresentadas em mapa (Figura 8).

Figura 8 – Estações fluviométricas e pluviométricas do Rio das Mortes



Fonte: Autora (2025)

O passo seguinte consistiu na verificação dos valores apresentados pelas 108 unidades de monitoramento no portal HidroWeb, com objetivo de selecionar os pontos capazes de oferecer no mínimo 30 anos de informações registradas para o desenvolvimento do estudo, pois esse intervalo permite agrupar uma quantidade representativa de dados em relação a variabilidade natural do clima/hidrologia, gerando maior confiança nas análises estatísticas. As 20 estações pluviométrica e 10 fluviométricas que atenderam o referido critério são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Estações selecionadas

Tipo	Nome	Código	Série Histórica	Latitude (°)	Longitude (°)
Pluviométrica	Lavras	2145036	1961/1998	-21,2333	-45,0000
Pluviométrica	Carmo da Cachoeira	2145044	1983/2024	-21,4611	-45,2214
Pluviométrica	Usina Couro do Cervo	2145007	1941/2024	-21,3436	-45,1703
Pluviométrica	Santana do Jacaré	2045004	1941/2016	-20,9050	-45,1250
Pluviométrica	Carandaí	2043018	1941/2024	-20,9558	-43,8008
Pluviométrica	São Tiago	2044050	1984/2024	-20,8972	-44,5003
Pluviométrica	Ponte Fernão Dias	2044027	1966/2024	-20,7408	-44,7833
Pluviométrica	Resende Costa	2044038	1975/2024	-20,9236	-44,2383
Pluviométrica	Campolide	2143005	1941/2024	-21,2789	-43,8200
Pluviométrica	Ibertioga	2143008	1941/2024	-21,4272	-43,9594
Pluviométrica	Barroso	2143006	1941/2024	-21,1872	-43,9800
Pluviométrica	Vargem do Engenho	2143007	1941/2024	-21,1928	-43,6139
Pluviométrica	Barbacena	2143055	1961/1998	-21,2500	-43,7667
Pluviométrica	Porto Tiradentes	2144002	1941/2024	-21,1225	-44,2325
Pluviométrica	Porto do Elvas	2144009	1941/2024	-21,1650	-44,1356
Pluviométrica	Vila Rio das Mortes	2144024	1967/2024	-21,1894	-44,3289
Pluviométrica	São João Del Rei	2144032	1915/1998	-21,1333	-44,2667
Pluviométrica	Bom Sucesso	2144000	1941/2024	-21,0339	-44,7719
Pluviométrica	Ibituruna	2144023	1967/2024	-21,1431	-44,7378
Pluviométrica	Usina São João Del Rei	2144020	1961/2024	-21,0556	-44,2089
Fluviométrica	Campolide	61085000	1936/2023	-21,2794	-43,8144
Fluviométrica	Barroso	61090000	1940/2023	-21,1858	-43,9797
Fluviométrica	Ibertioga	61100000	1940/2023	-21,4444	-43,9633
Fluviométrica	Porto do Elvas	61105000	1940/2023	-21,1647	-44,1358
Fluviométrica	Usina São João Del Rei	61115000	1935/2023	-21,0525	-44,2111
Fluviométrica	Vila Rio das Mortes	61122000	1940/2023	-21,1956	-44,3286
Fluviométrica	Ibituruna	61135000	1925/2023	-21,1425	-44,7397
Fluviométrica	Bom Sucesso	61140000	1940/2024	-21,0342	-44,7714
Fluviométrica	Usina Couro do Cervo	61173000	1935/2024	-21,3422	-45,1714
Fluviométrica	Santana do Jacaré	61202000	1935/2016	-20,9031	-45,1319

Fonte: Autora (2025)

Na manipulação dos dados das estações pluviométricas, foi realizado inicialmente o preenchimento de falhas nas séries temporais por meio da Equação 1, utilizando como referência os registros das estações pluviométricas mais próximas. Nos casos em que tal procedimento não se mostrou viável devido à ausência de dados

coincidentes nas estações vizinhas, procedeu-se à exclusão dos anos hidrológicos correspondentes às lacunas.

$$Px = \frac{1}{n} * \left(\frac{Nx}{Na} * Pa + \cdots + \frac{Nx}{Nn} * Pn\right) \quad (1)$$

Onde,

Px = Dado que falta na estação de análise;

n = Número de estações de base;

Nx = Média dos valores da estação analisada;

Na/Nn = Média da estação que contém o dado;

Pa/Pn = Valor referente à data nas estações de base.

Para garantir a consistência das informações, aplicou-se o método da Dupla Massa, desenvolvido pela Geological Survey (USA) e descrito em Bertoni e Tucci (2001), que permite avaliar a homogeneidade dos registros históricos perante o alinhamento dos valores acumulados de precipitação. Os autores recomendam um coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,99, considerando o ponto de interesse e as estações pluviométricas mais próximas.

No caso das estações fluviométricas, as análises abrangeram as vazões máximas, médias e mínimas de sete dias, calculadas por meio do software SISCAH 1.0. Adotou-se como referência, para as vazões máximas, o ano hidrológico compreendido entre outubro e setembro, adequado às condições da região Sudeste do Brasil, onde se localiza a área de estudo. Para as vazões mínimas foi considerado o ano hidrológico de abril a março.

Por fim, aplicou-se o teste estatístico não paramétrico de Mann-Kendall com nível de significância de 5%, com o objetivo de avaliar as tendências nas séries históricas de vazão e de precipitação. A análise dessas séries é fundamental, especialmente no contexto deste trabalho, uma vez que permite identificar eventuais variações nos padrões hidrológicos ao longo do tempo.

A verificação de tendências é crucial para entender como as mudanças climáticas, as práticas de manejo do solo e outros fatores podem influenciar a disponibilidade de recursos hídricos e a saúde das nascentes. No teste de Mann-Kendall, formulam-se duas hipóteses: a hipótese nula (H_0), que assume que não existe tendência nas séries temporais, e a hipótese alternativa (H_1), que indica a presença de uma tendência significativa. Para a realização dessas análises foi utilizado o *software* Minitab 18, plataforma estatística que possibilita o cálculo das tendências, oferecendo maior robustez e confiança nos resultados obtidos.

O período de análise das séries de vazão compreendeu os anos de 1936 a 2021, com base nos dados consistidos disponíveis. Para as séries de precipitação, adotou-se o intervalo comum de registros entre as estações, correspondente ao período de 1975 a 2023.

Por fim, para cada estação fluviométrica, foram delimitadas as respectivas áreas de contribuição, visando identificar e analisar a relação entre as estações pluviométricas localizadas nessas áreas, seus registros de pluviosidade e as alterações no uso e ocupação do solo.

3.3 Análise de uso e ocupação do solo

As séries temporais de uso e ocupação do solo das áreas à montante das estações fluviométricas foram obtidas na Coleção 9 do projeto MapBiomas, que abrange o período de 1985 a 2023. Para a análise espacial, as classes originais do mapeamento foram reorganizadas em quatro categorias temáticas: (i) Área vegetada, incluindo formação florestal, formação savânica, mangue, floresta alagável, restinga arbórea, campo alagado, área pantanosa, formação campestre, apicum, afloramento rochoso e restinga herbácea; (ii) Agropecuária, abrangendo pastagem, lavouras temporárias, lavouras perenes e silvicultura; (iii) Área não vegetada, composta por áreas urbanizadas, mineração e areais; e (iv) Corpos d'água, referentes a rios, lagos e reservatórios.

O objetivo dessa etapa foi estabelecer uma correlação direta entre as tendências hidrológicas identificadas anteriormente, sendo a redução ou aumento de precipitação e vazão, e as transformações no uso e ocupação do solo registradas ao longo da série

histórica. Essa compatibilização permitiu associar mudanças hidrológicas observadas com pressões antrópicas específicas, fornecendo subsídios mais robustos para a interpretação das dinâmicas ambientais da bacia.

A análise integrada dos dados teve, portanto, dupla função: caracterizar a evolução hidrológica e territorial da área de estudo e identificar zonas críticas onde as tendências de redução de disponibilidade hídrica coincidem com alterações significativas no uso do solo. Essa triagem prévia foi essencial para embasar a aplicação do método multicritério AHP, garantindo que o processo de priorização das nascentes fosse direcionado às áreas com maior vulnerabilidade hídrica e ambiental, onde intervenções de proteção e recuperação tendem a gerar maior impacto positivo.

3.4 Desenvolvimento do mapa de vulnerabilidade de nascentes

A elaboração do mapa de vulnerabilidade de nascentes teve início com a aplicação de um processo de avaliação multicritério, utilizando o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para os parâmetros físicos adotados.

3.4.1 Definição dos parâmetros e critérios analisados

Os parâmetros — hidrogeologia, declividade, precipitação e uso e ocupação do solo — foram definidos com base em dados disponibilizados via SIG e inspirados na metodologia aplicada por López *et al*. (2019), que designou nascentes prioritárias no Estado do México.

O uso e ocupação do solo tem recebido destaque nos últimos anos no debate sobre a conservação de nascentes. Processos como o desmatamento, a urbanização e o manejo agrícola inadequado comprometem esses ambientes, uma vez que intensificam a erosão, aumentam a impermeabilização do solo, reduzem a vegetação protetora e favorecem a contaminação hídrica, além de dificultar a atuação dos órgãos ambientais (Vessoni, 2019). No presente estudo, as classes associadas à urbanização e às atividades industriais – representadas pelo grupo de áreas não vegetadas – suscitaram maior preocupação, em virtude da expansão significativa observada em todo o território nacional nos últimos anos (IBGE, 2022).

No que se refere à hidrogeologia, as características litológicas são determinantes para o surgimento e o funcionamento das nascentes, pois estão diretamente relacionadas ao grau de fraturamento e à porosidade dos materiais rochosos. Rochas ígneas vulcânicas e sedimentares consolidadas, por exemplo, tendem a apresentar elevada permeabilidade, enquanto rochas ígneas intrusivas e metamórficas, em geral, são impermeáveis e com baixa capacidade de armazenamento de água (López *et al*., 2019).

A declividade também se mostrou um parâmetro relevante para diferenciar o comportamento hidrogeológico das nascentes. Enquanto as nascentes de contato descendente são frequentemente encontradas em áreas mais íngremes, as nascentes ascendentes predominam em terrenos planos. Nesse sentido, áreas com maiores declividades revelam maior vulnerabilidade, uma vez que as nascentes ascendentes garantem o fluxo hídrico por períodos mais longos, mantendo a rede de drenagem mesmo em estações secas (López *et al*., 2019).

Outro fator determinante é a precipitação, responsável por influenciar tanto a sazonalidade quanto a variabilidade das recargas hídricas. Estudos em Minas Gerais indicam que chuvas bem distribuídas ao longo do ano favorecem o aumento do deflúvio de base e a estabilidade das nascentes, enquanto precipitações concentradas reduzem a infiltração e, consequentemente, a recarga subterrânea (Ribeiro *et al*., 2013). Para estimar a precipitação média anual de interesse, foram utilizadas estações pluviométricas do entorno, aplicando-se o método de interpolação IDW (Shepard, 1968) por meio de ferramentas SIG.

Por fim, os subcritérios desses parâmetros foram definidos a partir das classificações disponibilizadas pelo IDESisema, com exceção da precipitação, cuja distribuição foi determinada pelas médias anuais obtidas. A esses grupos foram atribuídos pesos em ordem crescente de relevância, considerando a influência relativa de cada critério sobre a área de estudo (Tabela 3).

Tabela 3 – Critérios, subcritérios e pesos atribuídos ao Método AHP

Critérios	Subcritérios	Pesos
Uso do solo	Área não vegetada	4
	Agropecuária	3
	Área vegetada	2
	Corpos d'água	1
Hidrogeologia	Domínio Cristalino (Rochas Ígneas e Metamórficas)	2
	Domínio Metassedimentar (Rochas sedimentares e vulcânicas)	1
Declividade	Acima de 75%	6
	45 a 75%	5
	20 a 45%	4
	8 a 20%	3
	3 a 8%	2
	Até 3%	1
Precipitação	Até 1512 mm	5
	1512 - 1532 mm	4
	1532-1549 mm	3
	1549 - 1566 mm	2
	Maior que 1566mm	1

Fonte: Autora (2025)

3.4.2 Determinação das matrizes e da Razão de Consistência

O passo seguinte, consistiu na produção das matrizes pareadas e normalizadas, onde a primeira permite a comparação da importância relativa de cada elemento em relação aos demais mediante a composição de uma matriz quadrada com número de colunas e linhas equivalentes a quantidade de critérios avaliados, sendo a diagonal principal resultante de valores iguais a 1 em consequência da comparação de um critério com ele próprio. Para manter os dados em uma escala comum, utilizou-se o processo de normalização, no qual os valores de cada coluna são somados e o valor individual de cada parâmetro é dividido pela referida soma, o resultado do procedimento é a matriz normalizada.

Posteriormente, calculou-se o autovetor correspondente aos pesos atribuídos a cada grupo por meio da média dos valores contidos nas linhas da matriz normalizada.

Essa etapa é fundamental, pois o resultado é responsável pela priorização gerada no mapa de vulnerabilidade.

Com isso, foi possível determinar o Índice de Consistência (IC), obtendo o λ máximo a partir da média dos valores resultantes do produto da matriz pareada com o autovetor. Por conseguinte, a Razão de Consistência (RC) deu-se pela divisão do IC por 0,9 valor atribuído por Saaty ao Índice Aleatório (IR) para 4 elementos avaliados.

3.4.3 Obtenção das áreas e nascentes prioritárias

Ao finalizar todas etapas mencionadas, as informações de cada critério foram integradas ao software TerrSet liberaGIS 20.02 em formato GeoTIFF no modo Multi Criteria Evaluation (MCE), que processou os dados ponderados pelo AHP e gerou um raster representando o grau de vulnerabilidade física das nascentes dentro da faixa de estudo.

O arquivo obtido foi convertido em mapa e associado, de forma qualitativa, a outros elementos fundamentais para a priorização final, como a presença de outorgas de uso subterrâneo e o enquadramento legal dos cursos d'água. As informações sobre outorgas e qualidade da água foram obtidas diretamente no portal IDESisema, garantindo a utilização de dados oficiais e atualizados. Essa integração buscou contemplar a questão da segurança hídrica, considerando que a explotação acima da capacidade do manancial pode levar ao seu esgotamento e que a qualidade da água influencia diretamente os ecossistemas associados. Adicionalmente, foi considerada a designação prévia de áreas prioritárias estabelecida pelo projeto nacional coordenado pelo Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional (Brasil, 2023). Dessa forma, foi possível delimitar as nascentes mais vulneráveis e orientar as etapas subsequentes de priorização e definição de estratégias de recuperação.

3.5 Propostas para intervenção e recuperação das nascentes

Como discutido no item 2.3, a recuperação e conservação de nascentes desempenha papel essencial no processo de infiltração e, consequentemente, na recarga hídrica da bacia hidrográfica. Entre as práticas recomendadas, destaca-se o

plantio de espécies nativas no entorno das nascentes, medida que favorece a recomposição das matas ciliares, fundamentais para a proteção dos corpos hídricos e para a manutenção do equilíbrio ecológico local (Calheiros *et al*., 2009). Em situações em que a qualidade da água esteja comprometida, recomenda-se a delimitação imediata da Área de Preservação Permanente (APP), por meio de cercamento ou métodos equivalentes, a fim de evitar pressões antrópicas adicionais (Moraes, 2013). Independentemente do estágio de recuperação, torna-se indispensável o monitoramento periódico tanto do desenvolvimento da vegetação implantada quanto dos parâmetros de qualidade da água, assegurando que o processo de restauração atinja os resultados esperados.

Todavia, é indispensável tratar cada uma das nascentes individualmente para entender o seu contexto e necessidades mais urgentes, pois raramente existirá um cenário ideal. Com as demais fases do presente estudo finalizadas, foi possível avaliar a aplicabilidade das técnicas para as diferentes situações e características das nascentes que pertencem à sub-bacia do Rio das Mortes, associando-as à tratativa dada ao tema pelos municípios no que concerne aos instrumentos do planejamento urbano.

Ademais, a definição do tipo de intervenção considerou fatores cruciais como a viabilidade econômica e a facilidade de manutenção, de modo a assegurar a eficácia e a sustentabilidade do projeto a longo prazo. A gestão dos custos é determinante para a continuidade das ações, uma vez que projetos financeiramente viáveis apresentam maior potencial de adesão por parte da comunidade local, dos proprietários de terras e das instituições públicas envolvidas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise estatística das séries de vazão e precipitação

A análise hidrológica das estações fluviométricas da sub-bacia do Rio das Mortes revelou variações significativas nas vazões médias e mínimas ao longo da série histórica. Os resultados do Teste de Mann-Kendall, apresentados na Tabela 4, destacam as tendências estatisticamente identificadas. Constatou-se que, em 60% das estações analisadas, houve tendência significativa de redução das vazões mínimas, evidenciando alterações no ciclo hidrológico regional e potenciais sinais de pressão antrópica e ambiental.

Tabela 4 – Teste de Mann-Kendall para as estações fluviométricas

Estação	Nome	Vazão	p-valor	Análise
61085000	Campolide	Mínima	0,000	Tendência de diminuição
		Média	0,072	Sem tendência
		Máxima	0,964	Sem tendência
61090000	Barroso	Mínima	0,063	Sem tendência
		Média	0,261	Sem tendência
		Máxima	0,520	Sem tendência
61100000	Ibertioga	Mínima	0,744	Sem tendência
		Média	0,416	Sem tendência
		Máxima	0,838	Sem tendência
61105000	Porto do Elvas	Mínima	0,200	Sem tendência
		Média	0,366	Sem tendência
		Máxima	0,194	Sem tendência
61115000	Usina São João Del Rei	Mínima	0,010	Tendência de diminuição
		Média	0,317	Sem tendência
		Máxima	0,363	Sem tendência
61122000	Vila Rio das Mortes	Mínima	0,813	Sem tendência
		Média	0,043	Sem tendência
		Máxima	0,959	Sem tendência
61135000	Ibituruna	Mínima	0,009	Tendência de diminuição
		Média	0,019	Tendência de diminuição
		Máxima	0,061	Sem tendência
61140000	Bom Sucesso	Mínima	0,000	Tendência de diminuição
		Média	0,098	Sem tendência
		Máxima	0,576	Sem tendência

Estação	Nome	Vazão	p-valor	Análise
61173000	Usina Couro do Cervo	Mínima	0,002	Tendência de diminuição
		Média	0,017	Tendência de diminuição
		Máxima	0,092	Sem tendência
61202000	Santana do Jacaré	Mínima	0,002	Tendência de diminuição
		Média	0,017	Tendência de diminuição
		Máxima	0,092	Sem tendência

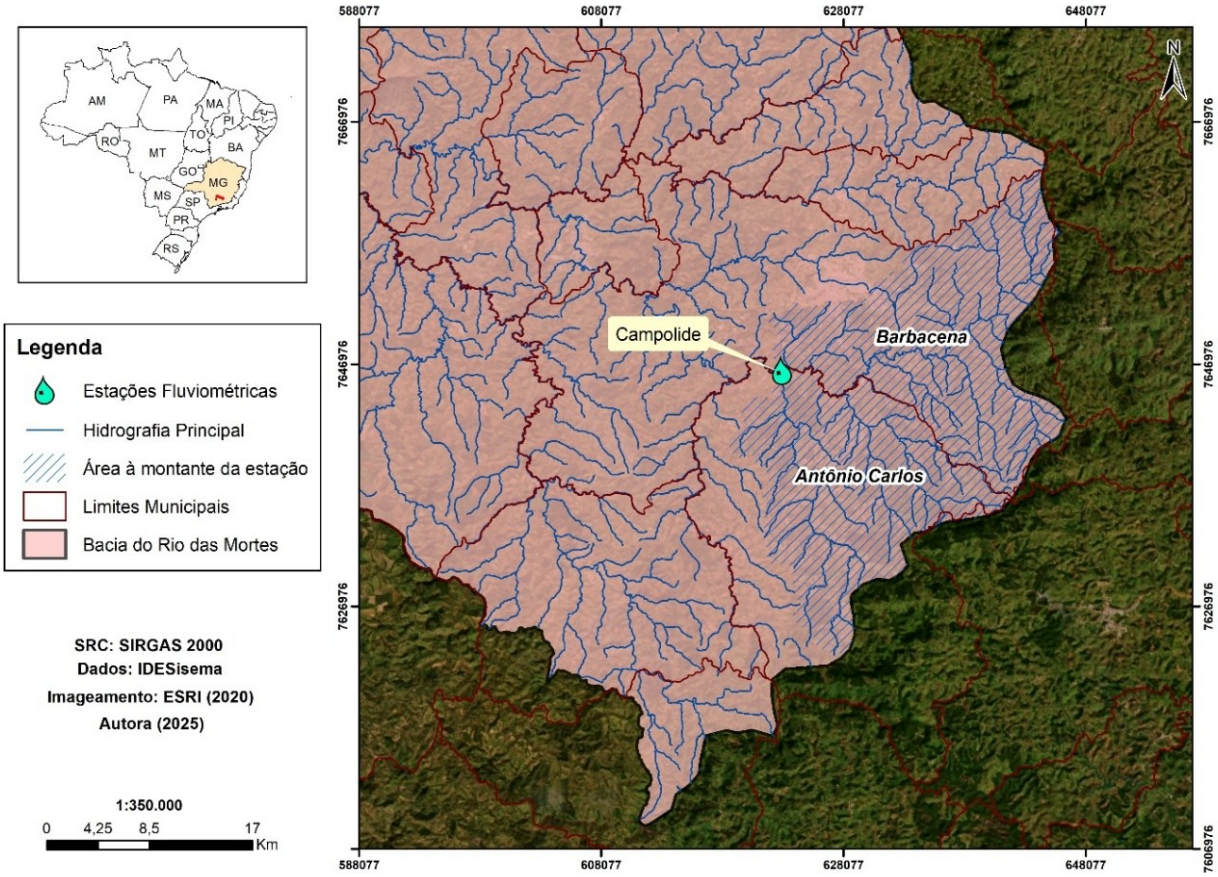
Fonte: Autora (2025)

Com o objetivo de selecionar um ponto de monitoramento representativo e sua respectiva área de contribuição para aprofundar a investigação das causas desses resultados negativos, foi realizada a sobreposição das áreas de drenagem com o mapeamento de áreas prioritárias elaborado pelo Ministério da Integração e Desenvolvimento Regional, considerando apenas aquelas classificadas como de “muito alta” ou “alta” prioridade.

A partir desse cruzamento, determinou-se que a área de drenagem correspondente à estação fluviométrica de Campolide (código 6108500), apresentada na Figura 9, constitui recorte espacial adequado e representativo da região, sendo, portanto, adotada como foco para as etapas metodológicas seguintes. Ressalta-se que esse mesmo critério de seleção já foi validado em estudo aprovado para apresentação no XXVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Anexo A), no qual a área a montante da estação Usina São João Del Rei foi utilizada como referência para análises semelhantes.

A área citada, está compreendida entre os municípios de Barbacena e Antônio Carlos, que possuem população estimada em 129.695 e 11.350 habitantes, respectivamente. Barbacena é uma das principais cidades da sub-bacia do Rio das Mortes, com 759 km² de território e atividade econômica diversificada, a qual é convertida em um PIB per capita de R$25.335,18 – valor que garante a 43ª posição entre os 853 municípios mineiros no ranking estadual. Já Antônio Carlos, possui área de 530 km² e é impulsionado pela indústria alimentícia, principalmente, de laticínios (IBGE, 2022).

Figura 9 – Área de contribuição da estação Campolide



Assim, a fim de detectar uma possível relação com o decréscimo das vazões mínimas, selecionou-se estações pluviométricas num raio de 25km do exutório da área selecionada para análise pluviométrica da região – Porto do Elvas, Campolide e Barroso. A distância estabelecida, visa minimizar a influência do relevo e da morfologia local sobre a distribuição espacial das chuvas.

Para isso, inicialmente, verificou-se que os dados brutos de ambas as estações estudadas apresentaram consistência e homogeneidade, conforme indicado pelos resultados do teste de Dupla Massa (Apêndice A), com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,99 em ambos os casos. Em seguida, por meio das precipitações médias anuais (Figura 10, Figura 11 e Figura 12), também foi realizado o teste de Mann-Kendall para avaliar tendência das séries pluviométricas (Tabela 4).

Figura 10 – Dados das precipitações anuais da estação Porto do Elvas

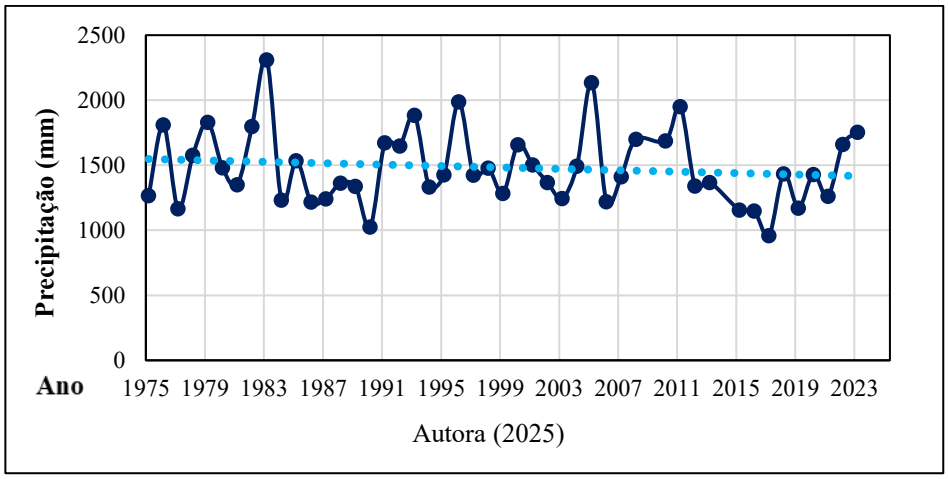


Figura 11 – Dados das precipitações anuais da estação Campolide

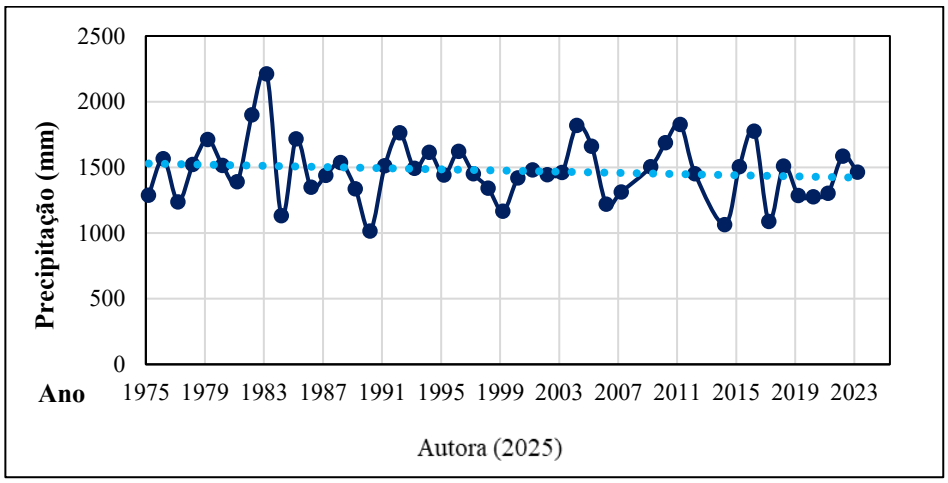


Figura 12 – Dados das precipitações anuais da estação Barroso

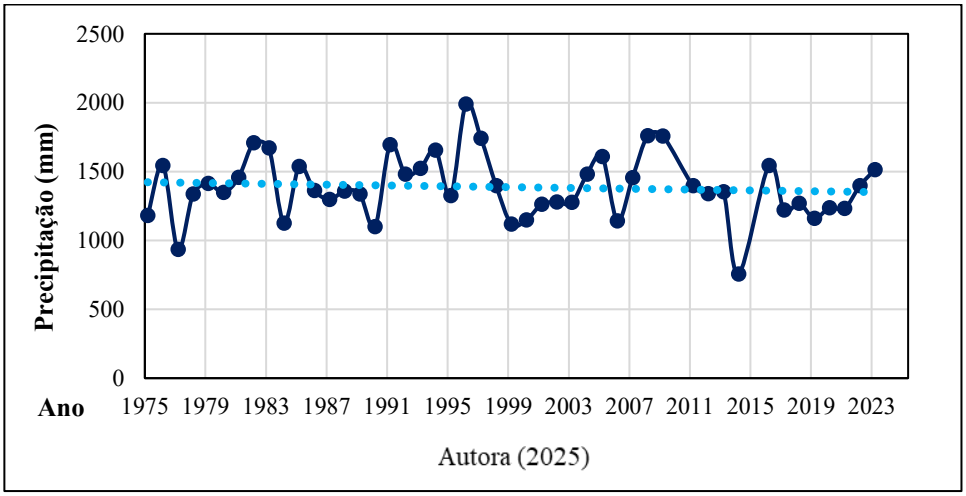


Tabela 5 – Teste de Mann-Kendall para as estações pluviométricas

Estação	Nome	p-valor	Análise
2144009	Porto do Elvas	0,206	Sem tendência
2143005	Campolide	0,336	Sem tendência
2143006	Barroso	0,234	Sem tendência

Fonte: Autora (2025)

Os resultados obtidos segundo os critérios do teste, indicam estacionariedade das precipitações no período analisado. Dessa forma, a diminuição das vazões mínimas da estação fluviométrica Campolide, não demonstra estar associada a uma redução do índice pluviométrico ao longo dos anos.

4.2 Análise de uso e ocupação do solo – refinamento da área de estudo

A inexistência de correlação entre a diminuição da vazão mínima e a precipitação sugere que os efeitos observados na etapa anterior possivelmente decorrem de ações antrópicas. Desse modo, a análise de uso e ocupação do solo tornou-se fundamental para a compreensão da vulnerabilidade hídrica da área de estudo, que identificou mudanças significativas entre os anos de 1985 e 2023, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Quantitativo de áreas do uso e ocupação solo

Tipo de uso	Área 1985 (km²)	Área 2023 (km²)	Variação (km²)	Percentual
Área vegetada	152,69	178,64	25,95	17%
Agropecuária	403,04	377,37	-25,67	-6%
Corpos d'água	0,47	0,35	-0,12	-25%
Área não vegetada	4,06	10,48	6,42	158%

Fonte: Autora (2025)

Ao longo dos 38 anos analisados, observou-se uma redução de 25,67 km² (6,37%) nas áreas destinadas às atividades agropecuárias, concomitantemente a um aumento de 25,95 km² (17,00%) nas áreas vegetadas. Essa dinâmica pode ser explicada pela mudança no perfil econômico predominante da região: os municípios inseridos na área de estudo – Barbacena e Antônio Carlos – migraram sua principal atividade econômica da agropecuária para o setor de serviços e da indústria (PDRH, 2014). Esse processo favoreceu o abandono de áreas anteriormente utilizadas para

pastagens ou cultivo, possibilitando a regeneração da vegetação nativa em determinadas zonas.

Por outro lado, a classe de áreas não vegetadas apresentou aumento expressivo de 6,42 km² (158,29%), impulsionado pela expansão urbana, motivada principalmente pela criação de postos de trabalho nos setores industrial, mineral e comercial, o que tornou a zona urbana mais atrativa para a população.

Nesse contexto, evidenciou-se a necessidade de adotar uma abordagem integrada, que contemplasse de forma simultânea os parâmetros ambientais e sociais relacionados à vulnerabilidade das nascentes. Dessa forma, o item seguinte descreve a aplicação da análise multicritério via método AHP, que fora empregada para identificar as nascentes prioritárias na área de estudo.

4.3 Desenvolvimento do mapa de vulnerabilidade de nascentes

A aplicação do método Analytic Hierarchy Process (AHP) permitiu integrar diferentes fatores físicos e ambientais, fornecendo uma visão abrangente do comportamento da área de estudo em relação à priorização das nascentes. Os parâmetros definidos foram avaliados de forma comparativa, de modo a atribuir pesos proporcionais à sua importância relativa e, assim, gerar o mapa final de áreas prioritárias.

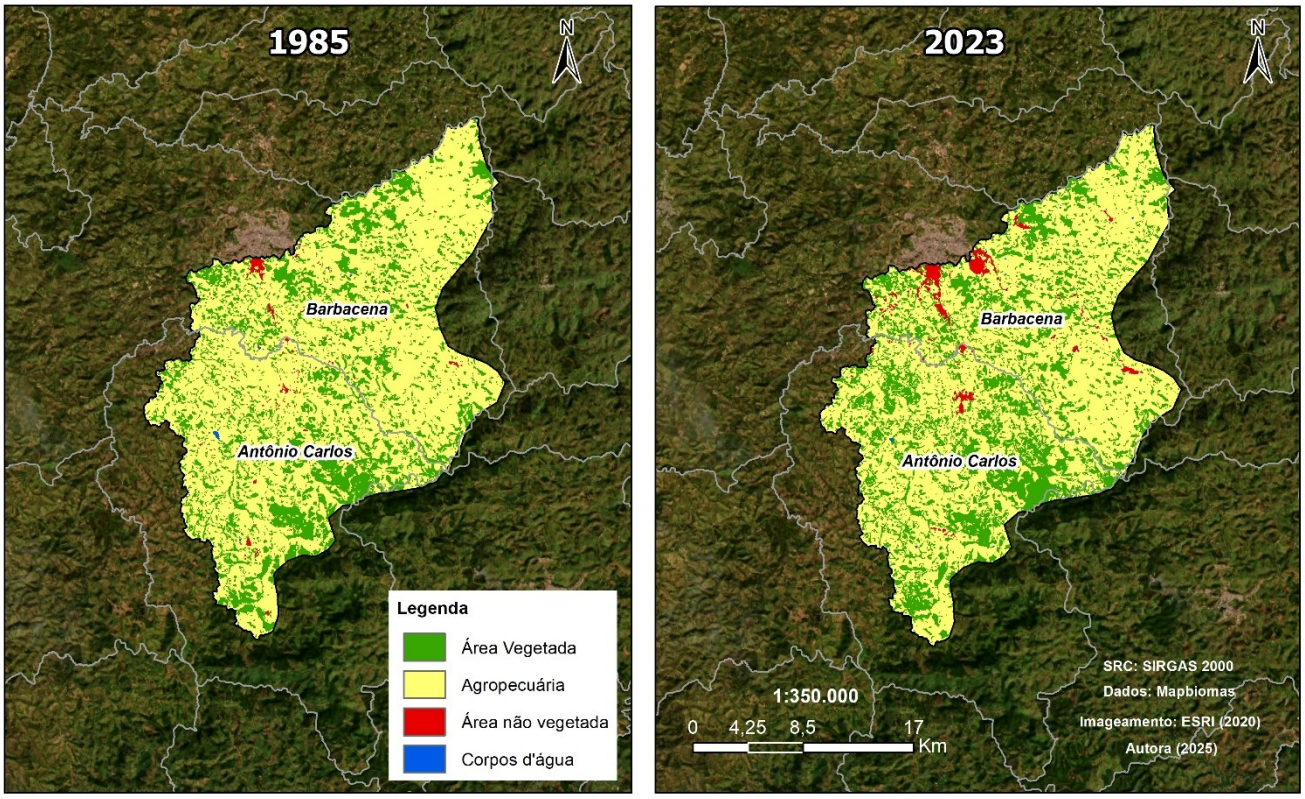
Mediante os critérios estabelecidos e metodologia adotada, foi possível diagnosticar o papel de cada parâmetro na determinação da vulnerabilidade das nascentes contidas na área de contribuição da estação Campolide.

4.3.1 Definição dos parâmetros e critérios analisados

O uso e ocupação do solo, como destacado anteriormente, tornou-se um dos fatores mais relevantes, afinal o aumento da demanda hídrica por parte do crescimento urbano e do setor de serviços aliado à permanência majoritária de atividades agropecuárias, cuja representatividade pode ser observada no aumento significativo de outorgas concedidas para abastecimento público e industrial/agropecuário, contribui para a intensificação dos impactos sobre o ciclo hidrológico.

O controle do Instituto Mineiro de Gestão de Águas – IGAM, registrava apenas 4 outorgas do tipo deferidas na área até 2016, ao passo que em 2024, foram verificadas 39 concessões. Quando há muitas outorgas emitidas sem controle adequado, pode ocorrer a redução significativa da disponibilidade hídrica (Tucci, 2017), tal fato pode explicar a diminuição considerável de 0,12 km² (25,50%) na classe dos corpos d'água que foi identificada na análise temporal da região entre 1985 e 2023 (Figura 13).

Figura 13 – Comparação do uso e ocupação do solo



A hidrogeologia corrobora para o processo de infiltração de água no solo e por conseguinte, para a recarga hídrica. Na avaliação desse parâmetro foram identificados dois domínios: Cristalino e Metassedimentar-Metavulcânico. O primeiro ocupa a maior parte da área (Figura 14 e Tabela 7) e é caracterizado pela presença de rochas metamórficas e ígnea, as quais são menos propensas a percolação dos fluxos, ao passo que o segundo está presente apenas em uma faixa do território ele engloba rochas sedimentares e vulcânicas – detentoras das melhores condições para a disponibilidade hídrica das nascentes.

Figura 14 – Mapa Hidrogeológico

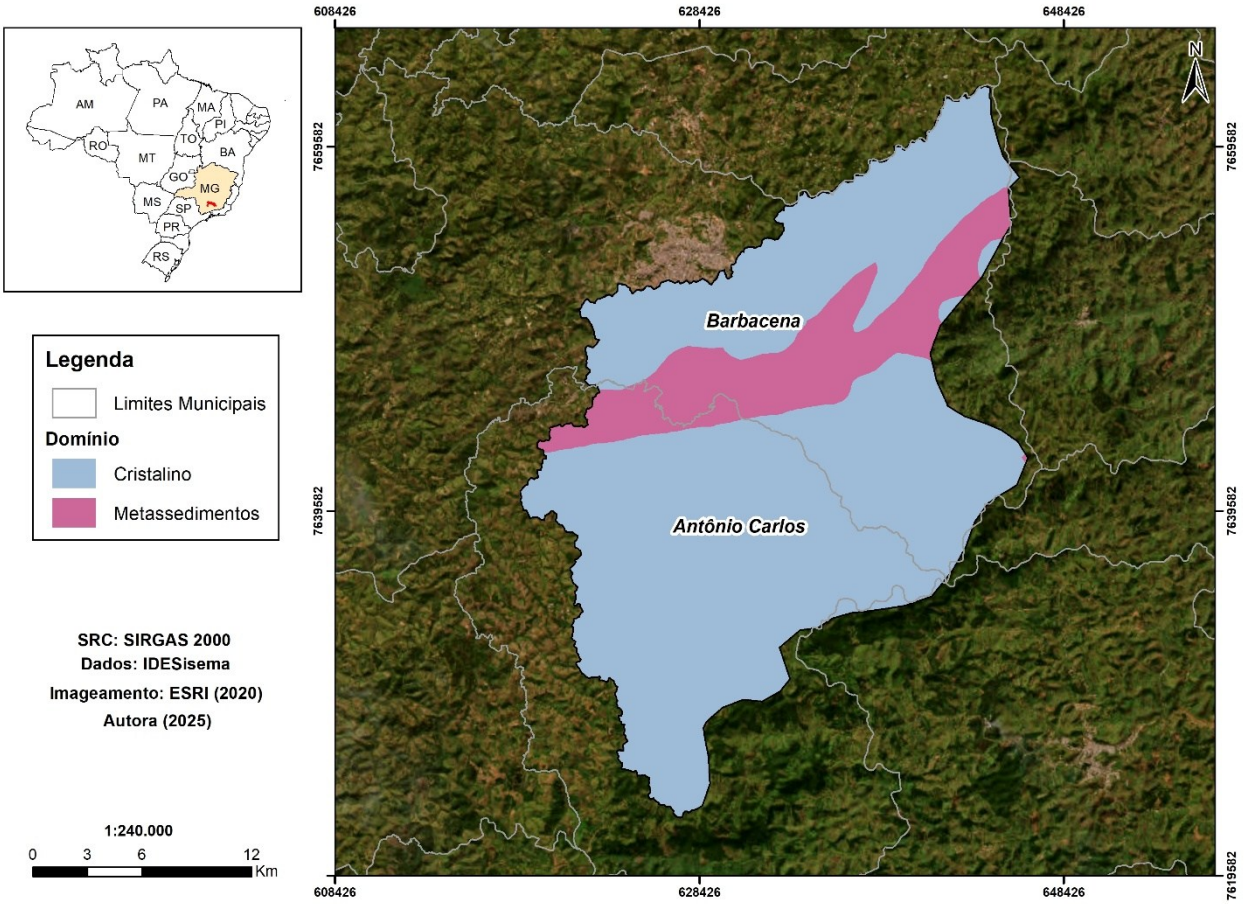


Tabela 7 – Quantitativo de áreas do domínio hidrogeológico

Domínio	Área (km²)	Percentual
Metassedimentar	92,41	16%
Cristalino	472,74	84%

Fonte: Autora (2025)

No tocante à declividade da região, foram consideradas 6 classes de declividade segundo dados do IDESisema, sendo o relevo classificado majoritariamente como ondulado ou forte-ondulado em 94,56% da área, seguido do suave-ondulado (3,26%) e montanhoso (1,97%). Os resultados alcançados podem ser visualizados na Figura 15 e Tabela 8.

Figura 15 – Mapa de Declividades

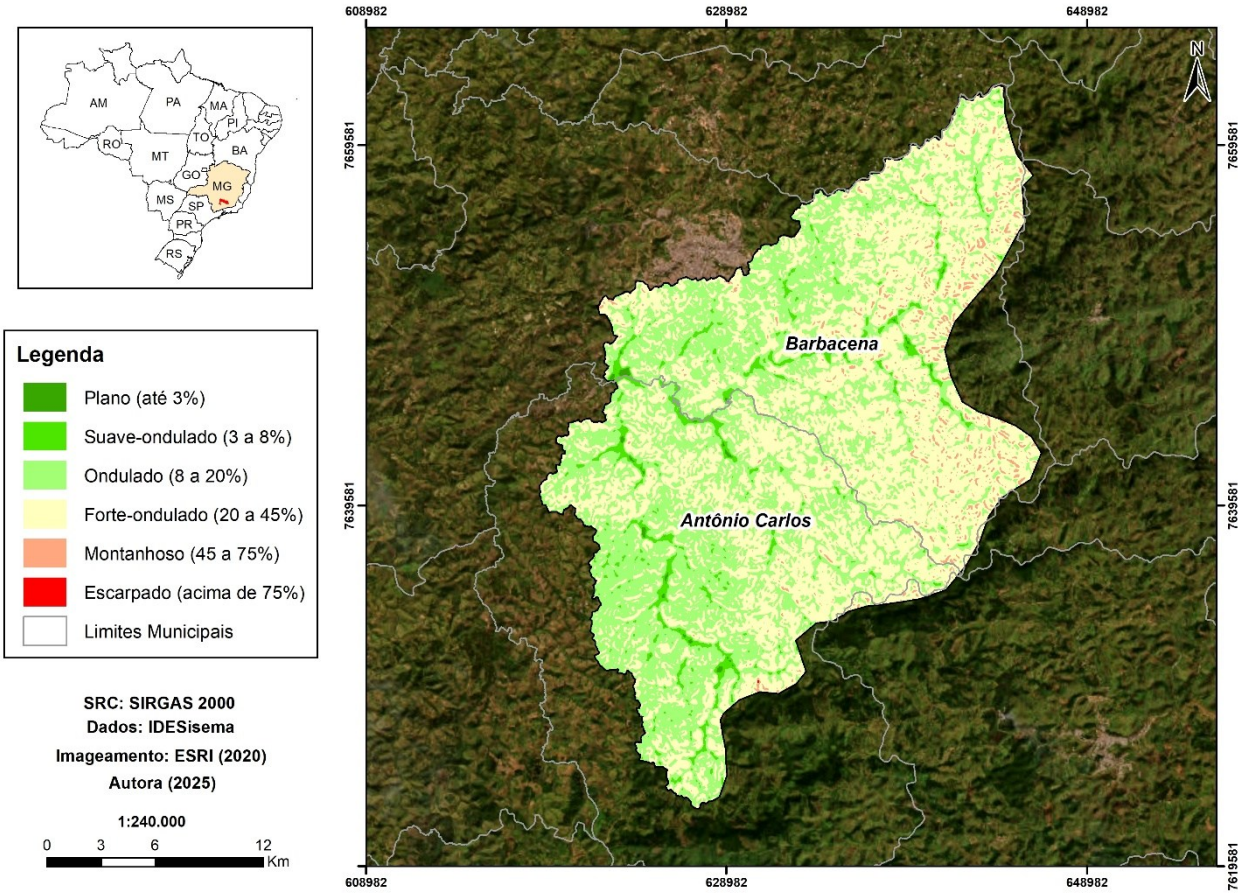


Tabela 8 – Quantitativo de áreas da declividade

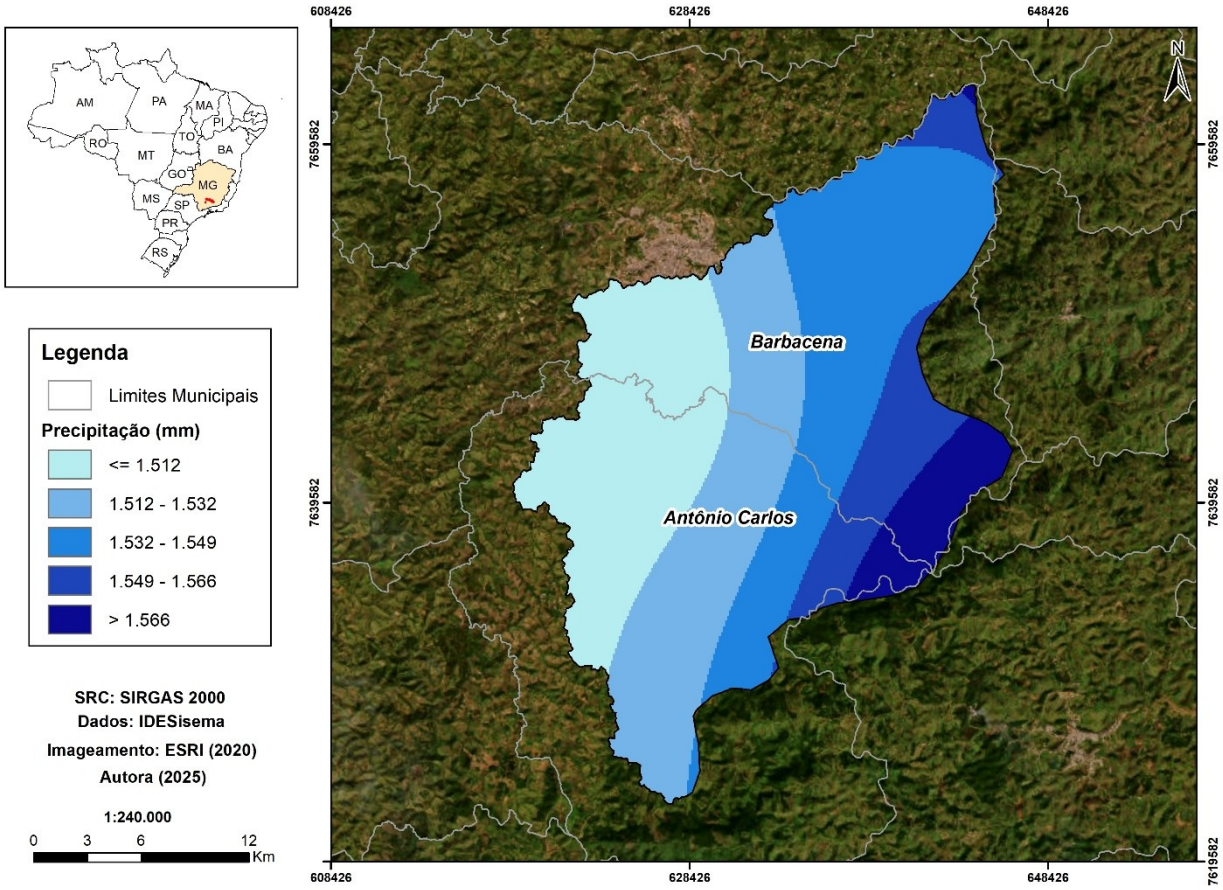
Inclinação	Classificação	Área (km²)	Percentual
Abaixo de 3%	Plano	1,14	0%
3 a 8%	Suave-ondulado	18,41	3%
8 a 20%	Ondulado	226,13	40%
20 a 40%	Forte-ondulado	307,42	55%
40 a 75%	Montanhoso	11,12	2%
Acima de 75%	Escarpado	0,01	0%

Fonte: Autora (2025)

A precipitação que incide sobre o território, demonstra um bom índice pluviométrico, o qual se enquadra nos níveis de moderado (1200 a 1600 mm) a alto (acima de 1600 mm) segundo o INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

O mapa gerado (Figura 16) apresenta as médias encontradas, onde pode-se observar uma tendência de aumento nos valores à leste. No entanto, a variação apresentada não é significativa.

Figura 16 – Mapa da precipitação média anual



4.3.2 Determinação das matrizes e da Razão de Consistência

A matriz pareada (Tabela 9) foi montada com base nas relações par a par entre os critérios, adaptada do estudo de Kassa *et al*. (2023). Em direção oposta aos autores, atribuiu-se maior importância ao uso e ocupação do solo em comparação à hidrogeologia, devido às transformações significativas verificadas na área e ao

predomínio de apenas um domínio hidrogeológico. Ademais, a tendência negativa das vazões mínimas, não explicada pelas taxas de precipitação, reforçou essa decisão.

Tabela 9 – Disposição da matriz pareada

Priorização	Uso do solo	Hidrogeologia	Declividade	Precipitação
Uso do solo	1,00	2,00	4,00	5,00
Hidrogeologia	0,50	1,00	4,00	5,00
Declividade	0,25	0,25	1,00	3,00
Precipitação	0,20	0,20	0,33	1,00

Fonte: Adaptado de Kassa *et al*. (2023)

O resultado final do processo de normalização dos dados é apresentado na Tabela 10, onde a soma das colunas é igual a 1, confirmando a consistência do procedimento.

Tabela 10 – Disposição da matriz normalizada

Priorização	Uso do solo	Hidrogeologia	Declividade	Precipitação
Uso do solo	0,51	0,58	0,43	0,36
Hidrogeologia	0,26	0,29	0,43	0,36
Declividade	0,13	0,07	0,11	0,21
Precipitação	0,10	0,06	0,04	0,07
SOMA	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Autora (2025)

O autovetor, obtido conforme a Tabela 11, define os pesos atribuídos a cada critério e representa a conclusão das significâncias associadas a eles.

Tabela 11 – Apresentação dos autovetores

Priorização	Uso do solo	Hidrogeologia	Declividade	Precipitação	Autovetor
Uso do solo	0,51	0,58	0,43	0,36	0,47
Hidrogeologia	0,26	0,29	0,43	0,36	0,33
Declividade	0,13	0,07	0,11	0,21	0,13
Precipitação	0,10	0,06	0,04	0,07	0,07

Fonte: Autora (2025)

Concretizando as etapas do método AHP para o presente trabalho, a verificação da consistência foi realizada por meio da Razão de Consistência (RC), conforme metodologia apresentada. O cálculo do Índice de Consistência (IC) resultou em 0,05 (Tabela 12), valor multiplicado pelo IR = 0,9 – correspondente a 4 elementos – que

determinou uma RC de 0,06, confirmando a validade dos pesos estabelecidos, pois é inferior ao limite de 0,1 recomendado por Saaty (2008).

Tabela 12 – Cálculo da Razão do índice de Consistência

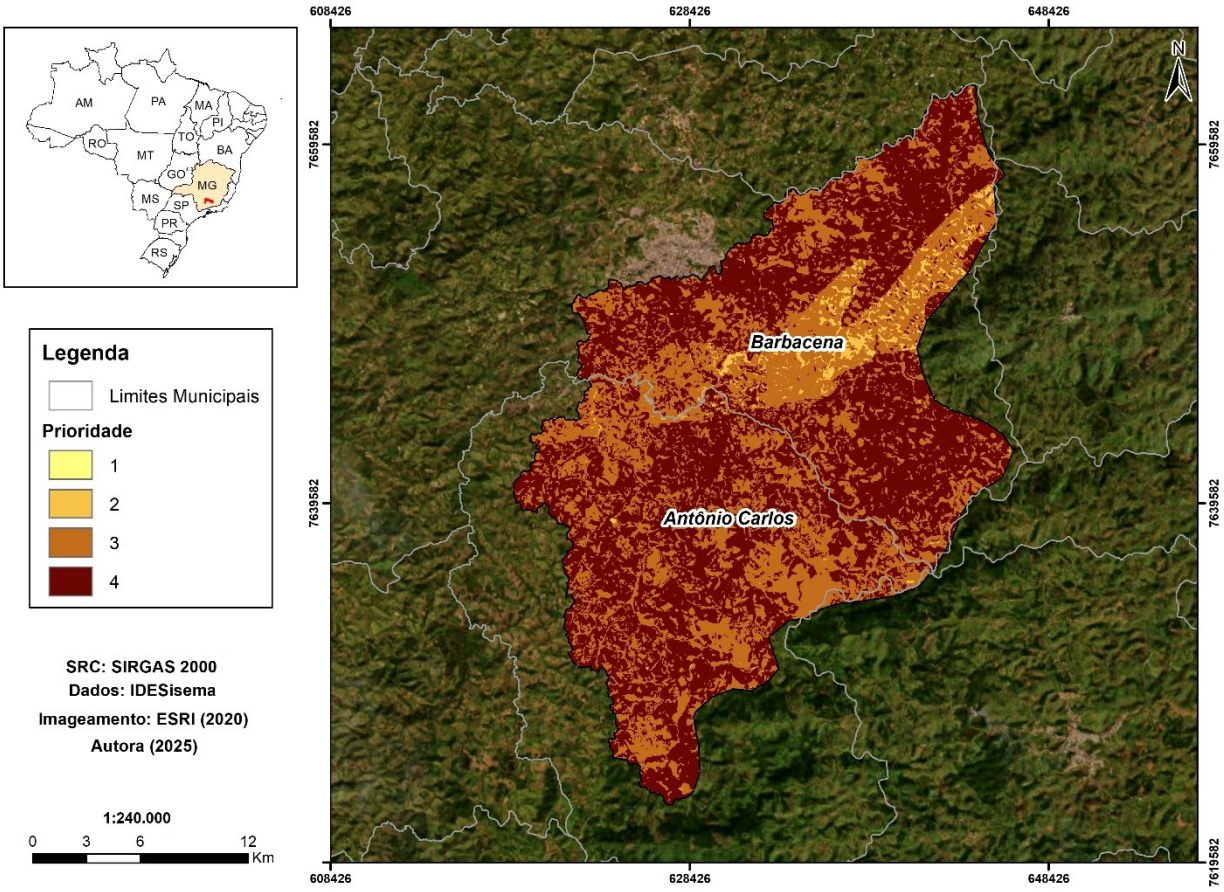
Priorização	Autovetor	Produto vetorial	λ	λ máx.	IC
Uso do solo	0,47	1,99	4,24	**4,16**	0,05
Hidrogeologia	0,33	1,42	4,28	0,36	
Declividade	0,13	0,53	4,08	0,21	
Precipitação	0,07	0,27	4,05	0,07	

Fonte: Autora (2025)

4.3.3 Obtenção das áreas e nascentes prioritárias

A partir da consolidação do método AHP, os critérios foram inseridos no *software* TerrSet, resultando no mapa de vulnerabilidade de nascentes (Figura 17), no qual a prioridade foi numerada de 1 a 4, onde 1 é a situação mais favorável à conservação de nascentes e 4 a que apresenta maiores desafios.

Figura 17 – Mapa de vulnerabilidade de nascentes



Foi constatado que 56,30% da área apresenta alta vulnerabilidade (4) à conservação das nascentes diante dos aspectos físicos e hidrológicos avaliados, seguido de 40,88% em situação média (3), sendo apenas 2,82% classificada como baixa (2) ou muito baixa (1) – Tabela 13.

Tabela 13 – Quantitativo das áreas de vulnerabilidade

Valor	Vulnerabilidade	Área (km²)	Percentual
1	Muito Baixa	2,36	0%
2	Baixa	13,63	2%
3	Média	232,02	41%
4	Alta	319,50	56%

Fonte: Autora (2025)

Ressalta-se que, embora existam áreas classificadas dentro do maior nível de prioridade, elas estão intercaladas com níveis inferiores, fato que amplia a necessidade de diagnósticos adicionais. Diante disso, foram analisadas as outorgas de uso subterrâneo nos municípios, a fim de detectar as maiores taxas de explotação próximo a nascentes; e a classificação dos cursos d'água segundo enquadramento do CERH-MG (2018), visando verificar a presença de contaminação nos fluxos.

Ao conciliar os dados do mapeamento resultante com a presença de pontos outorgados com maior volume de vazão anual explotado (Tabela 14) e os cursos d'água enquadrados como classe 2, foi possível selecionar nove nascentes prioritárias para intervenção das 1219 mapeadas pela FBDS, as quais se encontram na faixa central da área de estudo próximas às divisas entre as cidades de Antônio Carlos e Barbacena (Figura 18).

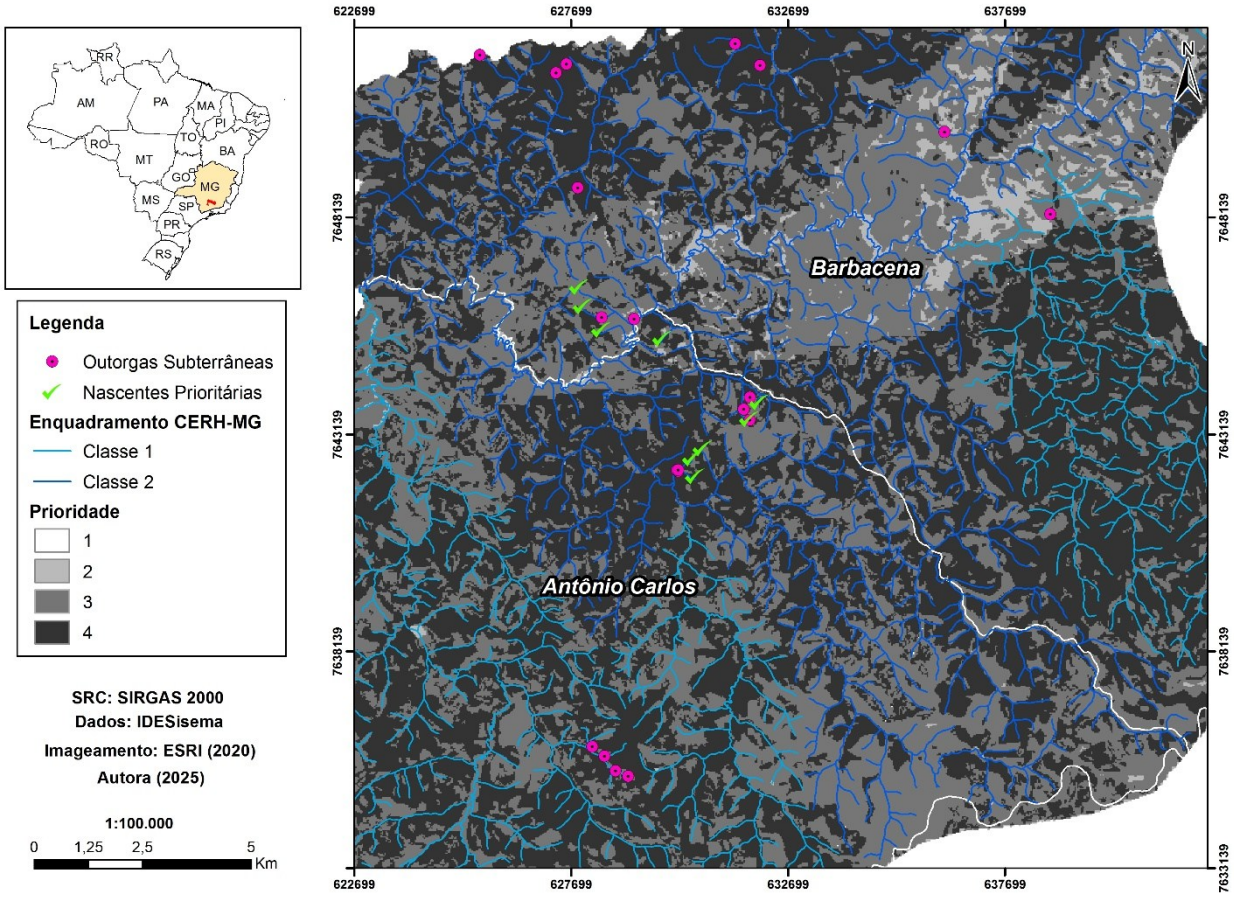
Tabela 14 – Outorgas subterrâneas

Outorga	Município	Finalidade de uso	Volume anual (m³)
09704/2018	Barbacena	Consumo humano e outros	44160
06478/2006	Barbacena	Abastecimento Público e outros	137779
06978/2017	Antônio Carlos	Indústria e outros	13248
08354/2018	Antônio Carlos	Indústria e outros	29440
06979/2017	Antônio Carlos	Indústria e outros	11040

Outorga	Município	Finalidade de uso	Volume anual (m³)
06977/2017	Antônio Carlos	Consumo humano e outros	13248
49588/2019	Antônio Carlos	Indústria e outros	7286
01247/2018	Antônio Carlos	Indústria e outros	7472
01246/2018	Antônio Carlos	Indústria e outros	7760

Fonte: Autora (2025)

Figura 18 – Localização das nascentes selecionadas para intervenção



4.4 Propostas para intervenção e recuperação das nascentes

Após a seleção das nascentes prioritárias, obteve-se imagens de satélite do Google Earth para melhor caracterização das áreas do entorno, considerando um raio de 50 metros e a proximidade entre elas para fins de avaliação. Assim, foi verificado que as nascentes apresentam diferentes condições de conservação ambiental e a necessidade de intervenções específicas em cada área.

As nomeadas B1, B2 e B3 estão localizadas no município de Barbacena-MG (Figura 19), sendo a nascente B1 situada em uma região de pastagem, afastada cerca de 140 metros de um complexo agrícola e com pouca cobertura vegetal em sua Área de Preservação Permanente (APP), condição que favorece o pisoteio do solo pelo gado e o consequente risco de assoreamento e contaminação.

Figura 19 – Nascentes B1, B2 e B3

Fonte: Google Earth (2025)

A nascente B2 está localizada em uma área de transição, com parte de sua APP já recoberta por vegetação arbórea, a 350 metros do sitiante mais próximo, o que proporciona melhores condições de proteção em comparação com a B1. No entanto, a cobertura ainda se apresenta fragmentada, o que pode comprometer a infiltração da água e a estabilidade do ecossistema.

Por fim, a B3 está situada em um trecho de vegetação mais preservada, distante 500 metros de propriedades rurais, apresentando, portanto, melhores condições de

conservação. Seu principal risco decorre da proximidade de estradas e de áreas de uso agropecuário.

As outras seis nascentes se encontram no município de Antônio Carlos-MG, sendo três delas (A1, A2 e A3) circundantes da mancha urbana da sede (Figura 20), duas (A4 e A5) situadas em terrenos rurais (Figura 21) e uma (A6) contida no distrito de Doutor Sá Fortes (Figura 22).

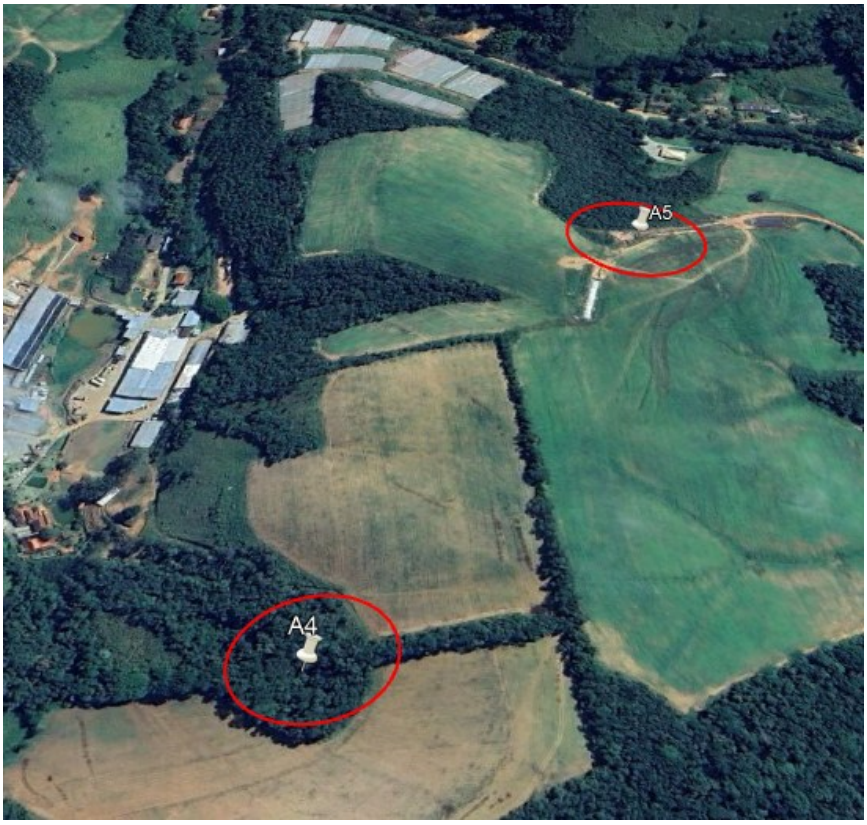
Figura 20 – Nascentes A1, A2 e A3

Fonte: Google Earth (2025)

A nascente A1 está localizada em área urbana periférica, sujeita a intensa pressão antrópica e marcada pela ausência de cobertura vegetal adequada, o que a torna vulnerável à contaminação por resíduos sólidos e efluentes domésticos. A nascente A2, por sua vez, encontra-se em área de campo aberto, com sua APP desprovida de cobertura florestal efetiva, estando exposta a processos erosivos e ao escoamento superficial, fatores que reduzem a capacidade de infiltração da água no solo e comprometem sua recarga hídrica.

Por estar próxima a uma floresta, a A3 apresenta melhores condições ambientais, o que garante maior proteção em comparação às demais. Contudo, ainda apresenta áreas de APP sem a devida recomposição, o que pode comprometer sua estabilidade ecológica a médio e longo prazo.

Figura 21 – Nascentes A4 e A5



Fonte: Google Earth (2025)

Embora parte da área de preservação da nascente A4 apresente cobertura arbórea, garantindo certo grau de proteção, ainda há exposição a processos de borda e vulnerabilidade a impactos advindos das atividades agropecuárias. Já a A5 apresenta condições mais críticas, uma vez que se encontra em área aberta, praticamente desprovida de vegetação em sua APP.

Figura 22 – Nascente A6

Fonte: Google Earth (2025)

O caso mais crítico é o da nascente A6, localizada em proximidade direta com áreas urbanizadas e caracterizada pela ausência de cobertura vegetal significativa em sua Área de Preservação Permanente. Essa condição, somada ao elevado risco de contaminação, torna-a altamente vulnerável à degradação.

Diante dos cenários descritos, recomenda-se o cercamento das Áreas de Preservação Permanente nos casos em que há proximidade com zonas urbanas e/ou cultivo agropecuário, a fim de consolidar o isolamento das nascentes e a redução de impactos diretos sobre sua integridade. Paralelamente, de modo geral, deve-se promover o reflorestamento com espécies nativas de diferentes estratos, aumentando a borda vegetada e ampliando a faixa de vegetação densa nas áreas abertas, de modo a conectar a vegetação existente a outras florestas próximas, formando corredores ecológicos.

Ademais, a manutenção da cobertura vegetal já presente é essencial. Assim, o uso de técnicas conservacionistas de manejo do solo, como as curvas de nível, e práticas que contenham sedimentos tornam-se aliadas no combate à erosão, auxiliando na preservação das nascentes.

Complementarmente, iniciativas de educação ambiental junto à comunidade local são fundamentais para sensibilizar e engajar os moradores no processo, pois são peças importantes na efetividade das medidas adotadas a longo prazo, assim como a elaboração de um Plano de Recuperação de Áreas Degradadas (PRAD), capaz de estruturar as ações necessárias e acompanhar seu desenvolvimento. Essas medidas são fundamentais para assegurar a proteção dos recursos hídricos e a manutenção dos serviços ecossistêmicos associados às nascentes (Ribeiro *et al*., 2018).

Por fim, indica-se o estudo da implementação de um programa de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) sancionado pela Lei nº14.119/2021, que remunere os proprietários envolvidos pela proteção e recuperação das nascentes, estimulando a adoção e prosseguimento das práticas conservacionistas a longo prazo. Dessa forma, alia-se a preservação ambiental à geração de benefícios socioeconômicos locais, fortalecendo o compromisso dos municípios com a sustentabilidade.

5 CONCLUSÃO

As nascentes constituem elementos fundamentais no ciclo hidrológico, pois representam o ponto inicial dos cursos d'água e garantem a manutenção das vazões que sustentam rios, aquíferos e ecossistemas associados. Além de sua relevância ecológica, asseguram o abastecimento humano, a produção agrícola e diversos outros usos que dependem diretamente da disponibilidade e qualidade da água. Entretanto, esses ambientes encontram-se cada vez mais vulneráveis devido à pressão antrópica, que compromete a recarga hídrica e favorece processos de degradação.

O presente estudo possibilitou uma análise integrada das condições ambientais e físicas da sub-bacia do Rio das Mortes, especialmente na área de contribuição da estação fluviométrica Campolide (código 61085000), com ênfase na identificação, priorização e proposição de medidas para a conservação e recuperação de nascentes.

A análise da série fluviométrica, com base no teste de Mann-Kendall, revelou tendência estatisticamente significativa de redução das vazões mínimas na estação Campolide, enquanto as séries pluviométricas não apresentaram variações relevantes ao longo do período analisado, tornando necessária uma avaliação holística.

Nesse sentido, a aplicação de ferramentas de geoprocessamento, aliada ao método de Análise Hierárquica de Processos (AHP), mostrou-se eficaz na elaboração do mapa de vulnerabilidade de nascentes e na definição das áreas prioritárias de intervenção, resultando em um diagnóstico fundamentado nos aspectos físicos e hidrológicos da região. O mapeamento indicou que mais da metade da área (56,30%) encontra-se em condição de alta vulnerabilidade, enquanto apenas 2,82% foi classificada como baixa ou muito baixa.

Ficou evidenciado que o uso e ocupação do solo exerce influência determinante sobre a conservação hídrica, sobretudo em função da expansão urbana e da permanência de atividades agropecuárias, que intensificam processos erosivos e reduzem a infiltração de água. Complementarmente, verificou-se que a predominância

do domínio cristalino amplia a fragilidade hídrica, reforçando a necessidade de manejo adequado.

A sobreposição do mapa vulnerabilidade com variáveis de interesse econômico e social – outorgas subterrâneas e qualidade da água – permitiu identificar nove nascentes prioritárias para intervenção, representando um avanço estratégico para a proteção hídrica. As medidas propostas – cercamento de Áreas de Preservação Permanente, reflorestamento com espécies nativas, criação de corredores ecológicos, práticas conservacionistas do solo, elaboração de PRADs e incentivo via Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) – configuram um conjunto integrado de ações que, se implementadas, podem auxiliar a sustentabilidade hídrica e ecológica da região.

É importante ressaltar que, apesar de as análises terem oferecido fundamentação técnica consistente, a confirmação final dos resultados depende da realização de visitas em campo, visto que a investigação presencial possibilita a verificação da localização exata das nascentes, melhor detalhamento de suas condições e a compreensão da sua relação com a comunidade, assim as intervenções sugeridas podem ser ajustadas de acordo com as particularidades de cada área.

Conclui-se, portanto, que a recuperação e conservação das nascentes requerem uma abordagem sistêmica, articulando aspectos ambientais/socioeconômicos, análise multicritério, instrumentos legais, planejamento urbano e participação comunitária. Ademais, o presente estudo pode servir como referência metodológica para outras sub-bacias do Rio Grande e para casos semelhantes, onde a expansão agropecuária e urbana altera o ciclo hidrológico, comprometendo a segurança hídrica.

5.1 Sugestões para os próximos trabalhos

Considerando os resultados obtidos, as limitações deste estudo e que essas perspectivas abrem caminho para a continuidade do debate científico e para o aprimoramento das práticas de gestão ambiental, de forma a fomentar a preservação dos recursos hídricos e a promoção da sustentabilidade, sugere-se para pesquisas futuras:

- A ampliação da análise de tendências hidrológicas e pluviométricas, com a incorporação de dados provenientes de outras estações localizadas ao longo da sub-bacia do Rio das Mortes, de modo a validar e comparar os resultados obtidos;
- O uso de técnicas de modelagem hidrológica que integrem cenários de mudanças climáticas e expansão urbana, permitindo avaliar impactos futuros sobre a disponibilidade hídrica;
- O aprofundamento da análise qualitativa da água das nascentes e outorgas, visando relacionar parâmetros físico-químicos e microbiológicos com os usos do solo e pressões antrópicas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2021: Ciclo da Água.** Disponível em: https://relatorio-conjuntura-ana-2021.webflow.io/capitulos/ciclo-da-agua. Acesso em: 15 jan. 2025.

ALVIM, Angélica Tanus Benatti; KATO, Vanessa; BRUNA, Gilda Collet. A urgência das águas: intervenções urbanas em áreas de mananciais. **Cadernos Metrópole**. São Paulo, v. 14, n. 27, p. 93-112, 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cm/a/wfQWX84LzHjvhtLftw37Vjh/. Acesso em: 11 jun. 2025.

BAGGIO, Amilton João; CARPANEZZI, Antonio Aparecido; FELIZARI, Sélia Regina; RUFFATO, Altair. **Recuperação e proteção de nascentes em propriedades rurais de Machadinho, RS.** Brasília, DF: Embrapa, 2013. 25 p. Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/971488/1/RecuperacaoProtecao0001.pdf. Acesso em: 9 mar. 2025.

BORGES, L. A. C.; REZENDE, J. L. P.; PEREIRA, J. A. A.; COELHO JÚNIOR, L. M. D.; BARROS, A. de. Áreas de preservação permanente na legislação ambiental brasileira. **Ciência Rural**. Santa Maria, v. 41, n. 7, p. 1202-1210, jul. 2011. Disponível em: https://www.scielo.br/j/cr/a/4jVMhFMf3q69gvyMCnFBfpB/?format=html&lang=pt . Acesso em: 10 jan. 2025.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001**. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 11 jul. 2001. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/LEIS_2001/L10257.htm. Acesso em: 10 jun. 2025.

BRASIL. 2012. **Lei nº 12.651, de 25 de Maio de 2012**. Novo Código Florestal. Diário Oficial da República Federativa do Brasil. Brasília, 28 maio, 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm. Acesso em: 27 jan. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021**. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais; e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 14 jan. 2021.

BRASIL. **Lei N° 14.653, de 23 de agosto de 2023.** Altera as Leis nos 12.651, de 25 de maio de 2012, e 14.119, de 13 de janeiro de 2021, para disciplinar a intervenção e a implantação de instalações necessárias à recuperação e à proteção 52 de nascentes. Brasília: Presidência da República, 2023. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2023-2026/2023/Lei/L14653.htm. Acesso em 08 mar. 2025.

BRASIL. **Resolução CONAMA nº 303, de 20 de março de 2002**. Ministério do Meio Ambiente, 2002.

CAJADO, Emerson Moreira. **Avaliação da capacidade do uso do solo em potencial área de recarga de nascentes da microbacia do rio Charneca, Caém/Saúde-Bahia.** 2022. Dissertação (Mestrado Profissional em Ciências Ambientais) – Instituto Federal Baiano, Campus Serrinha, Serrinha, 2022. Disponível em: <http://repositorio.ifbaiano.edu.br/jspui/handle/123456789/39>. Acesso em: 10 fev. 2025.

CALHEIROS, R. O. *et al*. **Cadernos da Mata Ciliar n. 1: preservação e recuperação das nascentes, de água e vida.** São Paulo: SMA, 2009. 35 p. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/handle/123456789/2102>. Acesso em: 02 fev. 2025.

CASTRO, Leslie Ivana Serino; CAMPOS, Sergio; ZIMBACK, Celia Regina Lopes; KAISER, Ilza Machado. Sistema de informação geográfica na formulação de indicadores ambientais para sustentabilidade dos recursos hídricos. **Irriga, Botucatu**, v. 19, n. 4, p. 655–674, 2014. DOI: https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n4p655.

COELHO NETTO, A.L. (1995) Hidrologia de Encosta na Interface com a Geomorfologia. In: CUNHA, S.B. & GUERRA, A.J.T. (orgs). **Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos.** Editora Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, 2.ed.

DE VARGAS, Tiago; SGORLA, Vinícius; BELLADONA, Rossano; VEDANA, Luiz Alberto. Mapas de zonas potenciais de recarga da água subterrânea como uma nova ferramenta para a segurança hídrica do abastecimento público. **Revista Águas Subterrâneas**, 37(1), e-30152, 2023. DOI: https://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30152.

DIAZ, Caio Cesar Farias. **Impactos da dinâmica de uso e cobertura da terra sobre os recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Capibaribe.** Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/40802. Acesso em: 14 jan. 2025.

DU, K; ZHANG, B; LI, L. Soil Water dynamics under different land uses in Loess Hilly region in China by stable isotopic tracing. **Water,** Vol. 13(2), 1-11, 2021.

EPAL - Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.. **Ciclo da Água.** Disponível em: https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/comunica%C3%A7%C3%A3o-ambiental/ciclo-da-%C3%A1gua. Acesso em: 14 jan. 2025.

FELIPPE, M. F.; LAVARINI, C.; PEIFER, D.; DOLABELA, D.; MAGALHÃES JUNIOR, A. Espacialização e caracterização das nascentes em unidades de conservação em Belo Horizonte-MG. **XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Campo Grande, 2009.

FELIPPE, M. F.; MAGALHÃES Jr., A. P. Análise da variabilidade da vazão das nascentes no Parque das Mangabeiras (Belo Horizonte - MG) em relação aos seus condicionantes ambientais. **XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, 2009, Viçosa-MG, Brasil. Universidade Federal de Viçosa, 2009.

FELIPPE, Miguel Fernandes; MAGALHÃES JUNIOR, Antônio Pereira. Conflitos conceituais sobre nascentes de cursos d'água e propostas de especialistas. **Revista Geografias**, Belo Horizonte, v. 9, n. 1, p. 70-81, 2013. Disponível em: https://doi.org/10.35699/2237-549X.13354. Acesso em: 27 jan. 2025.

FERREIRA, C. S. *et al*. Riparian vegetation and the supply of ecosystem services: A meta-analysis. **Journal of Environmental Management**, [S.l.], v. 261, p. 110879, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110879. Acesso em: 05 fev. 2024.

FRANÇA, Samara Avelino de Souza. **Coleta seletiva em municípios do Pará: tomada de decisão com o Método AHP (Analytic Hierarchy Process)**. 2024. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/72879. Acesso em: 14 jul. 2025.

HENRIQUES, I. G. N.; SOUTO, J. S.; SOUTO, P. C.; SANTOS, W. S.; HENRIQUES, I. G. N.; LIMA, T. S. Acúmulo, deposição e decomposição de serrapilheira sob a dinâmica vegetacional da Caatinga em Unidade de Conservação. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 11, n. 01, p. 84-89, 2016.

IGAM – Instituto Mineiro de Gestão das Águas. Conheça a Bacia – Bacia Hidrográfica Vertentes do Rio Grande (GD2). **Comitês – SISEMA**, 31 jan. 2024. Disponível em: https://comites.igam.mg.gov.br/conheca-a-bacia-gd2. Acesso em: 28 jan. 2025.

INSTITUTO Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. **IBGE Cidades**. IBGE, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Acesso em: 09 mar. 2025.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1991–2020**. Brasília: INMET, 2020.

KASSA, A.; TESSEMA, N.; HABTAMU, A. Identifying groundwater recharge potential zone using analytical hierarchy process (AHP) in the semi-arid Shinile watershed, Eastern Ethiopia. **Water Practice and Technology**, v. 18, n. 11, p. 2834–2850, 2023. DOI: 10.2166/wpt.2023.168. Disponível em: https://iwaponline.com/wpt/article/18/11/2834/98156/Identifying-groundwater-recharge-potential-zone. Acesso em: 02 ago. 2025.

LOPEZ, Sonia; EXPÓSITO, José L.; ESTELLER, María V.; GÓMEZ, Miguel A.; FRANCO, Roberto; MORALES, Guillermo P. Prioritization to protect springs for public urban water supplies, based on multi-criteria evaluation and GIS (State of Mexico, Mexico). **Applied Geography**, v. 107, p. 20-29, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0143622818311743. Acesso em: 12 jul. 2025.

MACHADO, C. J. S. Recursos Hídricos e Cidadania no Brasil: Limites, Alternativas e Desafios. **Ambiente & Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 121-136, 2003.

MARTINS, Fábio Rodrigues. VGI Nascentes: Proposta de um sistema de informação geográfica voluntária. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 3, p. 645–649, mar. 2021. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv7n3-645.

MEISTER, Schelen Grossel. **A degradação de nascentes e a crise hídrica do cerrado.** 2017. 62 f. Monografia (Especialização em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável) – Instituto CEUB de Pesquisa e Desenvolvimento, Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2017.

MELO NETO, J. de O., CHAGAS, R. M., & MÉLLO JÚNIOR, A. V. (2013). Delimitação de áreas potenciais de recarga subterrânea na bacia hidrográfica do Rio Siriri, Sergipe. **Scientia Plena**, *9*(7(a). Recuperado de https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/1089.

MINAS GERAIS. Conselho Estadual de Recursos Hídricos – CERH. **Deliberação Normativa CERH-MG nº 59, de 13 de dezembro de 2018.** Estabelece procedimentos para enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes, no âmbito do Estado de Minas Gerais. Diário do Executivo de Minas Gerais, Belo Horizonte, 14 dez. 2018.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM. Bacia Hidrográfica Vertentes do Rio Grande (GD2). **Comitês de Bacias Hidrográficas de Minas Gerais.** Disponível em: https://comites.igam.mg.gov.br/w/bacia-hidrografica-vertentes-do-rio-grande-gd2-. Acesso em: 05 mar. 2024.

MORAES, L. F. D.; ASSUMPÇÃO, J. M.; PEREIRA, T. S.; LUCHIARI, C. **Manual técnico para a restauração de áreas degradadas no Estado do Rio de Janeiro.** 2. ed. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2013.

OLIVEIRA, Hérica Leonel de Paula Ramos. **Avaliação da paisagem e do potencial de recarga dos cursos d'água nas bacias hidrográficas dos córregos Boa Vista e Tenda em Uberlândia-MG: Uma contribuição ao planejamento ambiental e à conservação de recursos hídricos.** 2024. 348 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. DOI: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.5022.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivo de desenvolvimento sustentável 6 – água potável e saneamento.** 2015. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/6. Acesso em: 19 jan. 2025.

PALIVODA, Ana Paula; POVALUK, Maristela. Avaliação do estado de conservação de nascentes localizadas em áreas rurais do município de Itaiópolis, SC. **Saúde e meio ambiente: revista interdisciplinar**, *[S. l.]*, v. 4, n. 1, p. 17–31, 2015. DOI: 10.24302/sma.v4i1.609. Disponível em: http://ojs.unc.br/index.php/sma/article/view/609. Acesso em: 9 mar. 2025.

PENIDO, Andrea Sundfeld. **Programa de revitalização de nascentes em ambiente urbano: estudo de caso do processo de criação e consolidação de uma política pública em São José dos Campos**. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: https://urbandatabrasil.fflch.usp.br/trabalhos-de-conclusao-e-monografia/programa-de-revitalizacao-de-nascentes-em-ambiente-urbano. Acesso em: 11 jun. 2025.

PINTO, L.V.A.; BOTELHO, Soraya; DAVIDE, A.C.; FERREIRA, Elizabeth. (2004). Estudos das nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Scientia Forestalis**. 1-10.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS (PDRH) GD2. **Bacia Hidrográfica do Rio Grande**. PDRH, 2014. Disponível em: http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso em: 04 mar. 2025.

REIS, Bruno Serafim dos; SOUTO, Andréa Ferreira; MATOS, Patrícia Francisca de. Recuperação de nascentes em área de Cerrado: Projeto Água é Vida na Comunidade Macaúba, Catalão (GO). **Cadernos de Agroecologia**, 2020. Disponível em: https://cadernos.aba-agroecologia.org.br/cadernos/article/view/6472. Acesso em: 9 mar. 2025.

RIBEIRO, C. B. M. *et al*. Relação entre precipitação, deflúvio de base e cobertura florestal em nascentes do Alto Rio Grande, MG. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 303–312, 2013. DOI: 10.1590/S1413-41522013000400004. Disponível em: https://www.scielo.br/j/esa/a/ywkRF5fb4Cytf4bpPMh6wmm. Acesso em: 18 jul. 2025.

RIBEIRO, Hugo & FERREIRA, Nilson & Kopp, Katia & PEREIRA, Tatiane & Nunes, Wellington. (2019). Sensoriamento Remoto em Ecologia da Paisagem: Estado da Arte. Geociências. 38. 257-267. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350831460_SENSORIAMENTO_REMOTO_EM_ECOLOGIA_DA_PAISAGEM_ESTADO_DA_ARTE. Acesso em 05 mar. 2025.

ROSA, C. R. M.; STEINER, M. T. A.; COLMENERO, J. C. Utilização de processo de análise hierárquica para definição estrutural e operacional de centros de distribuição: uma aplicação a uma empresa do ramo alimentício. **Gestão & Produção**, v. 22, n. 4, p. 935–950, 2015. DOI: 10.1590/0104-530X986-13. Disponível em: https://www.academia.edu/59105061. Acesso em: 14 jul. 2025.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n. 1, p. 83–98, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/228628807_Decision_making_with_the_Analytic_Hierarchy_Process. Acesso em: 14 jul. 2025.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. New York: McGraw-Hill, 1980.

SARTORI, Aderson. **Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN.** 2010. 235 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010. Disponível em: https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2010.772650. Acesso em: 14 mar. 2025.

SERAPHIM, A. P. A.C. C.; BEZERRA, M. do C. de L.Cidade e água: relações entre tipologias de ocupação urbana e recargade aquíferos.CI(UR) - **Cuadernos de Investigación Urbanística**, Madrid, Ano XI, n. 126, set./out. 2019.Disponível em: http://polired.upm.es/index.php/ciur/article/view/4369.Acesso em: 17 jan 2025.

SHEPARD, D. **A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data**. Proceedings of the 1968 23rd ACM National Conference, pp. 517–524. 1968.

SILVA, Marcos Antônio da; OLIVEIRA, Matheus Henrique de; SOUSA, Thaís dos Santos**.** Transformações do espaço urbano: uma análise das mudanças de uso e ocupação do solo em cidades médias. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 5, p. 2337-2350, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.17271/23178604113020233735. Acesso em: 17 jan. 2025.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo Hidrológico e a Bacia Hidrográfica. In TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Edusp / ABRH, 1997, 35-51p.

SOS MATA ATLÂNTICA. **Projetos SOS - Sustentabilidade.** 2006. Disponível em: http://www.sosmatatlantica.org.br. Acesso em: 09 mar. 2025.

SOUZA, C. F.;CRUZ, M. A. S.; TUCCI; C. E. M. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.17,n. 2,p. 9-18, abr./jun.2012.

TUCCI, Carlos E. M.; MENDES, Carlos André. Gestão urbana e gestão das águas: caminhos da integração. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 20, n. 56, p. 117-133, 2006. Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/hkQLGRnjV85nqf7F8gKpNJd/. Acesso em: 11 jun. 2025.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** 2. ed. São Paulo: EDUSP, 1997.

TUCCI, Carlos E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 5. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2017.

TUCCI, C. E. M. **Gestão da água no Brasil.** Porto Alegre: ABRH, 2001.

TUCCI, C. M.; CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, Porto Alegre, v. 14, n. 12, p. 1–16, 2017. Disponível em: https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/198/802534ee73e9bcb48c662546a9f2f9e3_fbb8585ef27dacdc1075b1e435cb19e3.pdf. Acesso em: 19 jan. 2025.

TUCCI, C.E.M. (2003). Águas Urbanas. In: TUCCI, C.E.M. & BERTONI, J.C. **Inundações Urbanas na América do Sul.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 1.ed.

VESSONI, Ricardo Henrique. **Conservação de nascentes e a degradação ambiental por ocupação do solo no bairro Nascente Imperial em Contagem (MG)**. 49 f. Monografia (Especialização em Gerenciamento de Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019. Disponível em: http://hdl.handle.net/1843/BUOS-BDAN4C. Acesso em: 15 jul. 2025.

VILLELA, S. M.; MATTOS, **A. Hidrologia aplicada**. São Paulo: Mc Graw Hill, 1975, 247p.

ANEXO A – Artigo aprovado no Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos

ABRHidro
Associação Brasileira de Recursos Hídricos

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DO SOLO NAS VAZÕES MÍNIMAS: ESTUDO DE CASO PARA A SUB-BACIA DO RIO DAS MORTES (MG)

Lara Peixoto Moraes [1] ; Tiago Vieira da Silva [2] ; Aline de Araújo Nunes [3] ; Ana Letícia Pilz de Castro[4], Aníbal da Fonseca Santiago[5], Múcio André dos Santos Alves Mendes[6], Tamara Daiane de Souza[7] & Mila Correa Sampaio[8]

Abstract: The transformations occurring in hydrographic basins directly impact ecosystem functioning and, at the same time, reflect intense human interventions, such as changes in land use and land cover, climate change, and increased water demand. These alterations influence the hydrological cycle, making it essential to understand these dynamics for the sustainable planning and management of water resources. This study aimed to identify trends in historical streamflow and precipitation series in a specific area of the Rio das Mortes sub-basin (MG, Brazil), associating these results with changes in land use and land cover between 1985 and 2023. The Mann-Kendall test was applied to data from one streamflow station and two rainfall stations. A significant decreasing trend was detected in minimum streamflows (Q7), while average and maximum flows, as well as precipitation indices, remained stable – except at the Resende Costa station, which showed a decline in rainfall. Land use analysis indicated a 47 km² reduction in agricultural areas and a substantial 236% increase in non-vegetated land, mainly due to urban expansion, followed by mining activities. These findings suggest that anthropogenic pressures, such as urban growth and the intensification of economic activities, have the potential to reduce groundwater recharge and alter the regime of minimum flows. Therefore, the results highlight the need for management strategies that integrate environmental conservation with sustainable economic development.

Resumo: As transformações ocorridas nas bacias hidrográficas impactam diretamente o funcionamento dos ecossistemas e, ao mesmo tempo, refletem as intensas intervenções humanas, como a alteração do uso e ocupação do solo, mudanças climáticas e aumento da demanda hídrica. Essas alterações influenciam o ciclo hidrológico, tornando essencial a compreensão dessas dinâmicas para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos. Este estudo teve como objetivo identificar tendências em séries históricas de vazão e precipitação em determinada área da sub-bacia do Rio das Mortes (MG), associando esses resultados às mudanças no uso e ocupação do solo entre

[1] *Graduanda em Engenharia Urbana (UFOP). CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: lara.moraes@aluno.ufop.edu.br*
[2] *Mestrando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos (UFMG). CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: tiago.vs@aluno.ufop.edu.br*
[3] *Engª Agrícola e Ambiental, Profa. Dra. UFOP - Depto. Engenharia Urbana, CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: aline.nunes@ufop.edu.br*
[4] *Engª Sanitarista e Ambiental, Profa. Dra. UFOP - Depto. Engenharia Civil, CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: anacastro@ufop.edu.br.*
[5] *Engº Ambiental, Prof. Dr. UFOP - Depto. Engenharia Civil, CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: anibal@ufop.edu.br.*
[6] *Engº Agrícola e Ambiental, Prof. Dr. UFOP - Depto. Engenharia Civil, CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: mucio.mendes@ufop.edu.br.*
[7] *Engª Agrícola e Ambiental, Profa. Dra. UFOP - Depto. Engenharia Urbana, CEP 35400-000 Ouro Preto-MG. Correio eletrônico: tamara.souza@ufop.edu.br*
[8] *Engª Ambiental, Profa. Dra. Unifesspa – Faculdade de Engenharia Civil, CEP 68507-590 Marabá-PA. Correio eletrônico: mila@unifesspa.edu.br*

1985 e 2023. Aplicou-se o teste de Mann-Kendall aos dados de uma estação fluviométrica e duas pluviométricas. Foi detectada tendência significativa de queda nas vazões mínimas (Q7), enquanto as vazões médias, máximas e os índices pluviométricos mantiveram-se estáveis, com exceção da estação Resende Costa, que apresentou redução na precipitação. A análise do uso do solo indicou redução de 47 km² em áreas agropecuárias e aumento expressivo de 236% na ocupação não vegetada, representada pelas áreas urbanizadas, seguida da mineração. Esses dados indicam que as ações antrópicas, como o crescimento urbano e a intensificação das atividades econômicas, têm potencial para reduzir a recarga hídrica e alterar o regime das vazões mínimas. Assim, os resultados reforçam a necessidade de estratégias de gestão que aliem conservação ambiental ao desenvolvimento econômico sustentável.

Palavras-Chave – tendências hidrológicas; séries temporais; bacias hidrográficas

INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas constituem unidades territoriais fundamentais para a compreensão da dinâmica dos recursos hídricos, diretamente relacionada ao ciclo hidrológico. Nesse contexto, as ações antrópicas têm provocado, ao longo do tempo, alterações nos regimes hidrológicos e contribuído para as mudanças climáticas, resultando no aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, como estiagens e inundações. Esses fenômenos decorrem tanto da alteração nos padrões de precipitação quanto de fatores locais, como a mudança no uso e cobertura do solo e o próprio manejo e uso da água (ALMEIDA *et al.*, 2020; FISCH *et al.*, 2017; BEDOYA; RAMIREZ, 2023).

Diante desse cenário, torna-se essencial adotar instrumentos eficazes de planejamento e gestão de Recursos Hídricos. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei nº 9.433/97, parte do princípio de que a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico, sendo a bacia hidrográfica a unidade territorial para sua gestão (BRASIL, 1997). Em consonância com esse fundamento, a mesma lei determina que os Planos de Recursos Hídricos devem ser elaborados com base em cada bacia hidrográfica, de modo a orientar o uso sustentável e integrado da água.

A bacia hidrográfica do Rio das Mortes, ou GD2, localiza-se no centro-sul de Minas Gerais, na porção nordeste da Bacia do Rio Grande e desempenha um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos da região. Com uma extensão de cerca de 278 km, o rio de GD2 percorre 42 municípios mineiros, incluindo Barbacena, São João Del Rei, Tiradentes, Prados e Bom Sucesso. A sub-bacia do Rio das Mortes abrange uma área de cerca de 10.533 km², representando 12,7% da porção mineira da Bacia do Rio Grande (IGAM, 2010). A região é caracterizada por uma intensa atividade antrópica, destacando-se a agricultura, a pecuária e o reflorestamento, que ocupam a maior parte do uso do solo. Essas atividades têm contribuído para processos erosivos e assoreamento dos cursos d'água, impactando a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos (SILVA *et al.*, 2021; GUIMARÃES, 2000). Além disso, a presença de pequenas centrais hidrelétricas, como as PCHs Ilhéus e Lavras, evidencia o aproveitamento do potencial hidrelétrico da bacia (IGAM, 2010).

A aplicação estatística permite a verificação da frequência em que as precipitações e vazões ocorreram com dada magnitude, sendo possível estimar as chances teóricas de reincidências dos eventos (SILVA, 2014). Dessa forma, análises de tendência permitem a partir das séries históricas, compreender o comportamento das variáveis e, assim, prever valores futuros, com dado nível de confiança, para as variáveis dessas séries modeladas, como a precipitação e vazão (HANN; KEMBER, 2011). Nesse sentido, o teste de Mann-Kendall é comumente aplicado para estudos

hidrológicos, no qual por ser um não-paramétrico permite que os dados não estejam normalmente distribuídos, mas possui eficiência próxima aos testes paramétricos (SILVA *et al*., 2015).

Assim sendo, o presente estudo objetiva realizar a análise de tendência em séries históricas de vazão e precipitação da Sub-bacia hidrográfica do Rio das Mortes, Minas Gerais, e verificar possíveis associações com as mudanças de uso e cobertura do solo na região ao longo dos anos.

METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado na sub-bacia do Rio das Mortes, localizada na porção sudeste da bacia hidrográfica do Rio Grande, com área aproximada de 10 mil km². Devido à grande extensão do território, foi selecionada uma faixa da sub-bacia para o estudo com base na distribuição territorial das estações hidrometereológicas, bem como a disponibilidade de séries históricas representativas, além da análise preliminar do uso e ocupação do solo, visando as áreas de influência dos pontos fluviométricos com maior potencial investigativo (Figura 1).

Os dados hidrológicos utilizados são disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) no portal HidroWeb, no qual duas estações pluviométricas e uma fluviométrica que apresentam série histórica de pelo menos 40 anos, contidas num raio de 25 km na sub-bacia do Rio das Mortes, foram selecionadas para análise (Tabela 1).

Tabela 1 – Dados das estações utilizadas

Tipo	Nome	Código	Série Histórica	Latitude (°)	Longitude (°)
Pluviométrica	Usina São João Del Rei	2144020	1961/2024	-21,0556	-44,2089
Pluviométrica	Resende Costa	2044038	1975/2024	-20,9236	-44,2383
Fluviométrica	Usina São João Del Rei	61115000	1935/2023	-21,0525	-44,2111

Na manipulação dos dados das estações pluviométricas, foi realizado o preenchimento de falhas e a retirada de anos hidrológicos quando tal processo não era possível, além do método de Dupla Massa, capaz de analisar a consistência dos valores, desenvolvido pela Geological Survey (USA), conforme descrito em Bertoni e Tucci (2001). Já para as estações fluviométricas, as vazões máximas, médias e mínimas de sete dias foram obtidas através do *software* SISCAH 1.0, considerando o ano hidrológico de outubro a setembro, uma vez que a região de estudo está situada no sudeste brasileiro.

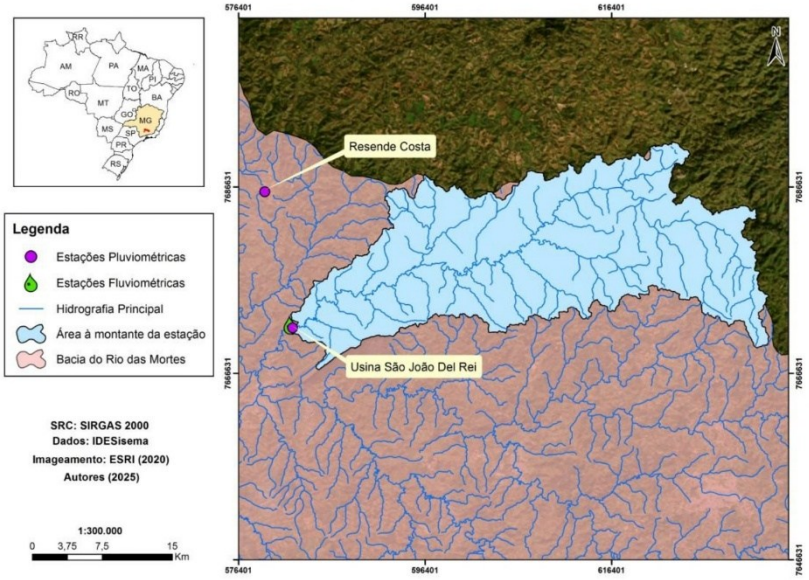
Para a verificação da tendência de ambas as estações, foi realizado o Teste de Mann-Kendall no *software* Minitab 18, com um nível de significância de 5%.

O período de análise das séries de vazão compreendeu os anos de 1940 a 2021, com base nos dados consistidos disponíveis. Para as séries de precipitação, adotou-se o intervalo comum de registros entre as estações, correspondente ao período de 1975 a 2023. A análise do uso e ocupação do solo teve como marco inicial o ano de 1985, a partir do qual foi disponibilizada a primeira coleção de dados do projeto MapBiomas.

O mapeamento do uso do solo foi organizado em quatro categorias principais: (i) **Área vegetada**, incluindo formação florestal, formação savânica, mangue, floresta alagável, restinga arbórea, campo alagado, área pantanosa, formação campestre, apicum, afloramento rochoso e restinga herbácea; (ii) **Agropecuária**, abrangendo pastagem, lavouras temporárias, lavouras perenes e

silvicultura; (iii) **Área não vegetada**, composta por áreas urbanizadas, mineração e areais; e (iv) **Corpos d'água**, referentes a rios, lagos e reservatórios.

Figura 1 – Localização da área de estudo



RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os dados brutos das duas estações pluviométricas analisadas apresentaram consistência e homogeneidade, conforme indicado pelos resultados do teste de Dupla Massa, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,99 em ambos os casos.

A avaliação de tendências nas séries temporais fluviométricas e pluviométricas foi realizada por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall. De acordo com a metodologia, considera-se a existência de tendência significativa quando a hipótese nula (ausência de tendência) é rejeitada, ou seja, quando o valor de p é inferior a 0,05.

Na estação fluviométrica Usina São João Del Rei (código 61115000), foi identificada tendência decrescente nas vazões mínimas ao longo do período analisado (Figura 2). Em contrapartida, as vazões médias e máximas não apresentaram variações estatisticamente significativas, indicando relativa estabilidade nessas séries.

Quanto às estações pluviométricas, a estação de Resende Costa (código 2044038) apresentou tendência significativa de redução dos volumes de precipitação ao longo dos anos (Figura 3). Já a estação Usina São João Del Rei (código 2144020) não demonstrou tendência estatística relevante, mantendo-se estável conforme os critérios do teste aplicado (Figura 4).

Os resultados consolidados do teste de Mann-Kendall para todas as séries analisadas encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados do teste de Mann-Kendall

Nome	Código	Parâmetro	p-valor
Usina São João Del Rei	2144020	Chuva	0,381
Resende Costa	2044038	Chuva	0,009
Usina São João Del Rei	61115000	Vazão mínima	0,010
		Vazão média	0,317
		Vazão máxima	0,363

Figura 2 – Dados das vazões mínimas da estação 61115000 com presença de tendência decrescente

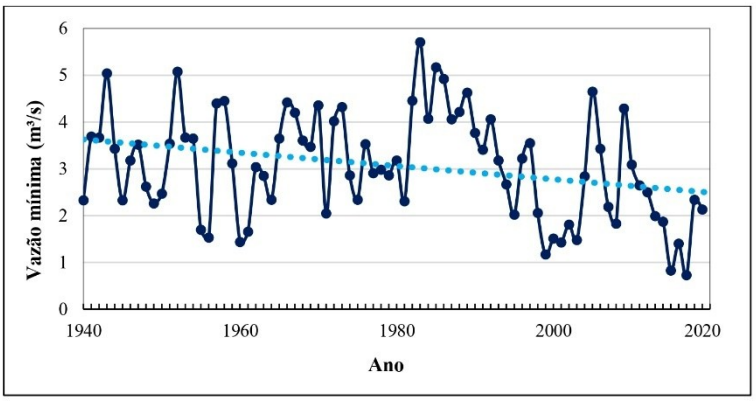


Figura 3 – Dados das precipitações anuais da estação 2044038 com presença de tendência decrescente

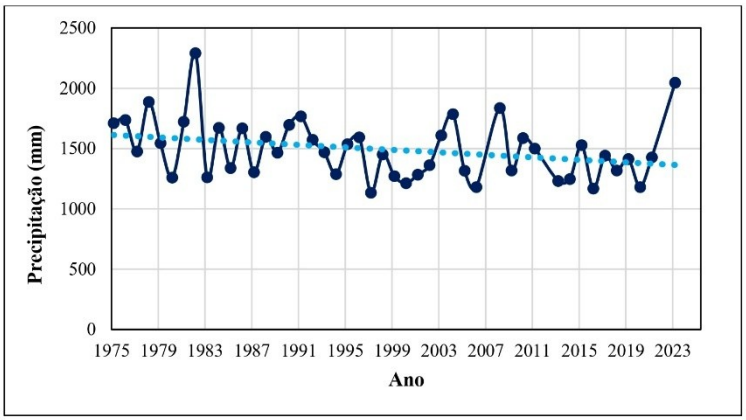
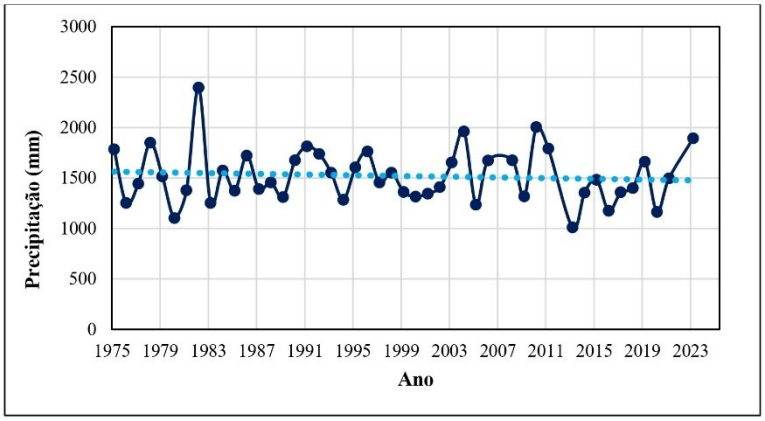


Figura 4 – Dados das precipitações anuais da estação 2144020 com ausência de tendência



No que se refere ao uso e ocupação do solo na área de estudo, foram identificadas mudanças significativas entre os anos de 1985 e 2023, conforme apresentado na Tabela 3 e na Figura 5. Ao longo dos 38 anos analisados, observou-se uma redução de 48,17 km² (8,64%) nas áreas destinadas às atividades agropecuárias, concomitantemente a um aumento de 39,75 km² (30,48%) nas áreas vegetadas e de 0,09 km² (9,03%) nos corpos d'água.

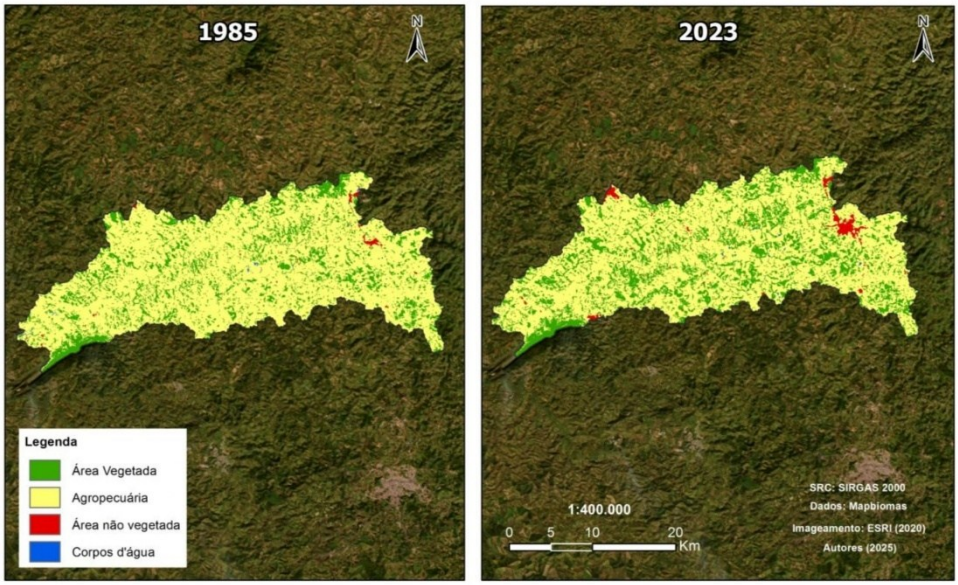
Essa dinâmica pode ser explicada pela mudança no perfil econômico predominante da região: aproximadamente dois terços dos municípios inseridos na área de estudo migraram sua principal atividade econômica da agropecuária para o setor de serviços (PDRH, 2014). Esse processo favoreceu o abandono de áreas anteriormente utilizadas para pastagens ou cultivo, possibilitando a regeneração da vegetação nativa em determinadas zonas e, consequentemente, contribuindo para a conservação de corpos hídricos.

Por outro lado, a classe de áreas não vegetadas apresentou aumento expressivo de 7,34 km² (236,72%), impulsionado pela expansão urbana, motivada principalmente pela criação de postos de trabalho nos setores industrial e mineral, o que tornou a zona urbana mais atrativa para a população.

Tabela 3 – Relação de área em porcentagem e forma de uso e ocupação do solo na área à montante da estação fluviométrica Usina São João Del Rei

Tipo de uso	Área em 1985	Área em 2023	Variação	
	km²	km²	km²	%
Área vegetada	130,42	170,17	39,75	30,48
Agropecuária	511,40	464,22	-47,18	-8,64
Corpos d'água	0,95	1,04	0,09	9,03
Área não vegetada	3,10	10,44	7,34	236,72

Figura 5 – Alterações no uso e ocupação do solo na área à montante da estação fluviométrica Usina São João Del Rei



Os dados referentes à área a montante da estação indicam que a ampliação da oferta de empregos por empresas terceirizadas ligadas aos setores industrial e mineral provocou um processo de êxodo rural em determinadas localidades, ao mesmo tempo em que atraiu novos moradores para os centros urbanos. Essa transição, contudo, não eliminou a relevância da atividade agropecuária, que permanece predominante, ocupando 71,87% da área total. O que se observa é uma reconfiguração econômica, em que a agropecuária passou a coexistir com novos setores produtivos, especialmente o de serviços.

Essas transformações estruturais contribuem para compreender os possíveis fatores associados à redução das vazões dos corpos hídricos no período analisado. Com a manutenção da atividade agropecuária e o crescimento expressivo do setor de serviços, houve uma intensificação da urbanização e, consequentemente, do consumo de água, impulsionado pelo aumento populacional e pelas demandas industriais.

Essas alterações impactam diretamente a dinâmica hidrológica regional, especialmente sobre as vazões mínimas, cuja redução pode estar relacionada ao aumento da demanda hídrica e à diminuição da recarga subterrânea. A impermeabilização do solo nas áreas urbanas e a remoção da vegetação nativa para a implantação de cultivos e pastagens reduzem a capacidade de infiltração da água no solo, comprometendo a reposição dos aquíferos e a sustentação das vazões de base dos cursos d'água.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise da série fluviométrica, utilizando o teste de Mann-Kendall, indicou tendência estatisticamente significativa de redução nas vazões mínimas na estação Usina São João Del Rei, enquanto as vazões médias e máximas permaneceram estatisticamente estáveis ao longo do período analisado. No que se refere às séries pluviométricas, foi identificada uma tendência de redução dos volumes precipitados na estação de Resende Costa, ao passo que a estação Usina São João Del Rei não apresentou variações significativas com o passar dos anos. Embora a estação Resende Costa esteja localizada fora da bacia de contribuição da estação fluviométrica em questão, os dados sugerem que a redução das vazões mínimas pode estar parcialmente associada à diminuição da precipitação observada regionalmente.

Entre os anos de 1985 e 2023, a área de influência direta da estação Usina São João Del Rei passou por alterações significativas no uso e ocupação do solo. Embora as classes agropecuária e vegetação natural permaneçam majoritárias, representando cerca de 98% da área total, houve um crescimento expressivo nas áreas não vegetadas — especialmente aquelas associadas à urbanização e à mineração — com um aumento aproximado de 267% no período. Essas transformações refletem a intensificação das atividades econômicas na região, impulsionadas principalmente pela expansão do setor de serviços e pelas demandas geradas pelo aumento populacional.

A tendência de redução das vazões mínimas identificada pode, portanto, estar associada majoritariamente às mudanças no uso e ocupação do solo, destacando-se a persistência da agropecuária e o avanço da urbanização e da atividade minerária. O aumento da demanda hídrica por parte dessas atividades contribui para a intensificação dos impactos sobre o ciclo hidrológico, afetando negativamente processos como a infiltração da água no solo, o escoamento superficial e a recarga dos aquíferos. Tais alterações tornam o sistema hídrico mais vulnerável a eventos extremos, como estiagens prolongadas, e ressaltam a importância da adoção de práticas de gestão integrada que equilibrem a conservação dos recursos naturais com o desenvolvimento socioeconômico da região.

Como desdobramento futuro deste estudo, recomenda-se a ampliação da análise de tendências hidrológicas e pluviométricas, com a incorporação de dados provenientes de outras estações localizadas ao longo da bacia do rio Carandaí. Essa abordagem permitirá uma avaliação mais abrangente das interações entre o uso e ocupação do solo e as variações nos regimes de precipitação e vazão, fornecendo subsídios técnicos mais robustos para a formulação de políticas públicas voltadas à sustentabilidade hídrica regional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Ministério da Integração e do Desenvolvimento Regional pelo apoio institucional ao Projeto “Proposição de carteira de projetos de intervenção vislumbrando o aumento da recarga das vazões afluentes, ampliação da flexibilização operativa dos reservatórios e melhoria da navegabilidade nas bacias dos rios São Francisco, Parnaíba, Paranaíba e Grande”, cuja colaboração foi fundamental para o desenvolvimento das análises apresentadas neste estudo. Agradecemos também à Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) pela valiosa contribuição técnica, acadêmica e institucional ao longo de todas as etapas da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, G. G. L.; PAIVA, A. L. R.; OLIVEIRA, L. M. M.; LEONARDO, H. R. A. L. Análise de índices climáticos para avaliação do efeito de mudanças climáticas. Revista Brasileira de Geografia Física,v. 13, n. 01, p. 01-17, 2020.

BEDOYA, M. A.; RAMÍREZ, B. H. The effects of climate and forest cover variability on the hydrological regulation of an eastern Andean Cusiana river sub-basin. Ecohydrology and Hydrobiology,v. 23, n. 4, p. 569–587,2023.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. "Precipitação". *In*: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2ª ed., Porto Alegre: Editora da Universidade, 2001. p.177-241.

BRASIL. Lei n°9433/1997, de 8de janeiro de 1997. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF. 08 jan.1997. Seção III. 1997.

FISCH, G.; SANTOS, T. A.; SILVA, R. C. Water security in the Vale do Paraiba´s basin: future scenarios. Ambiente & Água, v. 12, n. 6, p. 881-887, 2017.

GUIMARÃES, Márcia Maria. MONITORAMENTO HIDROSSEDIMENTOMÉTRICO DA BACIA DO RIO DAS MORTES–MG. Disponível em: https://scholar.google.com/scholar?hl=pt-BR&as_sdt=0%2C5&q=MONITORAMENTO+HIDROSSEDIMENTOM%C3%89TRICO+DA+BACIA+DO+RIO+DAS+MORTES+%E2%80%93+MG&btnG=. Acesso em: 1 jun. 2025.

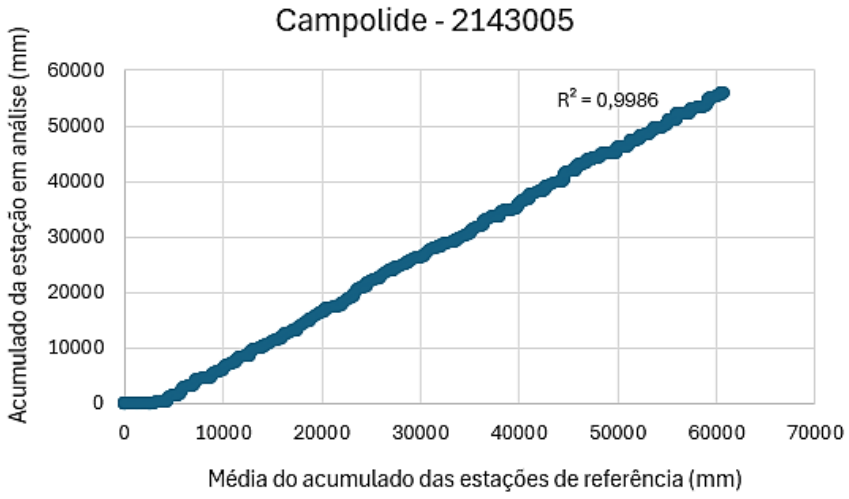
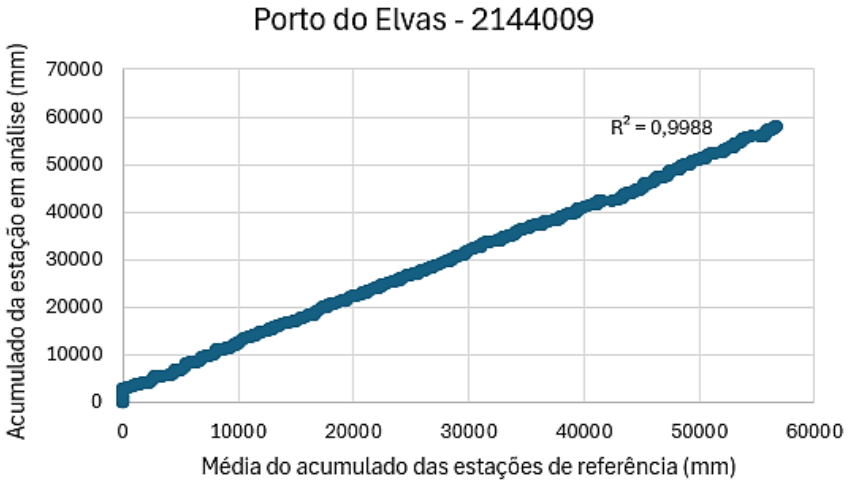
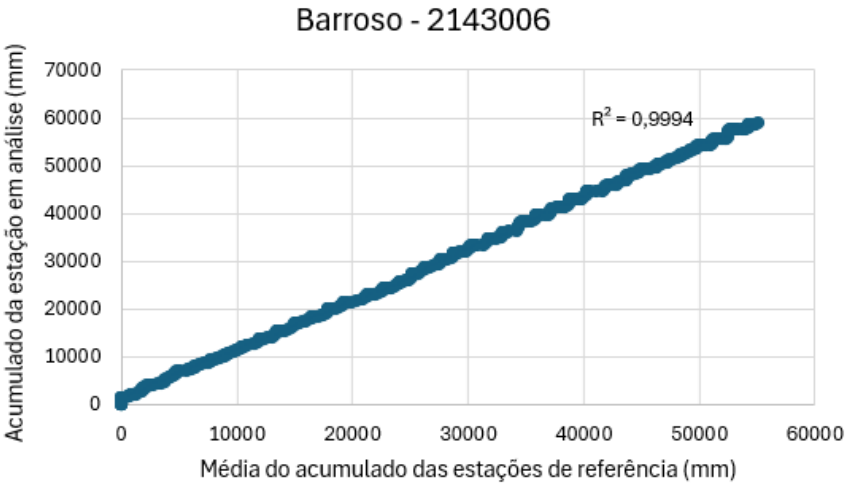
HAN, M. K.. J. P. J. Data Mining: Concepts and Techniques. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2011.

MINAS GERAIS. Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM. Plano Diretor de Recursos Hídricos: Bacia Hidrográfica do Rio das Mortes – Unidade de Planejamento e Gestão GD2: Proposta de Enquadramento. Belo Horizonte: IGAM, 2010. Disponível em: http://www.repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/jspui/handle/123456789/3183. Acesso em: 1 jun. 2025.

PLANO DIRETOR DE RECURSOS HÍDRICOS (PDRH) GD2. **Bacia Hidrográfica do Rio Grande**. PDRH, 2014. Disponível em: http://repositorioigam.meioambiente.mg.gov.br/. Acesso em: 04 jun. 2025.

SILVA, Jaíza Ribeiro Mota e; RODRIGUES, Jéssica Assaid Martins; OLIVEIRA, Luiz Fernando Coutinho de; VIOLA, Marcelo Ribeiro. Estimativa da vulnerabilidade dos solos à erosão hídrica na bacia hidrográfica do Rio das Mortes (MG). **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, *[S. l.]*, v. 14, n. 1, p. 119–132, 2021. DOI: 10.17765/2176-9168.2021v14n1e007659. Disponível em: https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/7659. Acesso em: 1 jun. 2025.

SILVA, R. M. da; SANTOS, C. A. G.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; SILVA, V. C. L.; MEDEIROS, I. C. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. Natural Hazards,v. 77, n. 2, p. 1205–1221,2015

SILVA, Thomas Fernandes da. Análise estatística e tendência das precipitações no município de Caruaru. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso.

APÊNDICE A – Resultados da aplicação do método de Dupla Massa