

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA HÍDRICA

**Identificação de fragilidades nas sub-bacias hidrográficas
de Lorena/SP: contribuições à conservação dos recursos
hídricos e ao planejamento ambiental**

Cibele dos Santos Peretta

Itajubá, junho de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA HÍDRICA

Cibele dos Santos Peretta

**Identificação de fragilidades nas sub-bacias hidrográficas
de Lorena/SP: contribuições à conservação dos recursos
hídricos e ao planejamento ambiental**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hídrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Hídrica.

Área de concentração: Gestão de sistemas hídricos.

Orientadora: Maria Rita Raimundo e Almeida

Coorientadora: Marina Batallini de Macedo

Junho de 2025
Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA HÍDRICA

Cibele dos Santos Peretta

**Identificação de fragilidades nas sub-bacias hidrográficas
de Lorena/SP: contribuições à conservação dos recursos
hídricos e ao planejamento ambiental**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 26 de junho
de 2025, conferindo ao autor o título de **Mestre em
Engenharia Hídrica**.

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Maria Rita Raimundo e Almeida (Orientadora)

Prof^ª. Dr^ª. Marina Batallini de Macedo

Prof^ª. Dr^ª. Ana Paula Moni Silva

Prof^ª. Dr^ª. Danúbia Caporusso Bargas

Junho de 2025
Itajubá

AGRADECIMENTOS

Expresso meu profundo agradecimento às minhas orientadoras, Prof^ª. Dr^a Maria Rita Raimundo e Almeida e Prof^ª. Dr^a Marina Batalini de Macedo, por sua dedicação, conhecimento e apoio inestimável. Suas orientações, sugestões e incentivo foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, guiando-me com paciência e sabedoria em cada etapa da pesquisa.

Agradeço às Prof.^a Dr.^a Ana Paula Moni Silva e à Prof.^a Dr.^a Danúbia Caporusso Bargas por gentilmente aceitarem, mais uma vez, o convite para compor a banca examinadora desta dissertação. Suas contribuições e olhar atento foram importantes para o enriquecimento deste trabalho.

Meu reconhecimento também a Caique Augusto dos Santos Assis, por sua colaboração essencial na área de programação, e a Renato Ballerini de Souza Pinto, pelo valioso apoio e pelas inúmeras sugestões de aprimoramento ao longo de todo o processo.

Registro minha gratidão aos especialistas que gentilmente participaram da avaliação da matriz AHP, com um agradecimento especial à Paula Cristina Martinelli.

Agradeço à Prefeitura Municipal de Lorena, na pessoa do Prefeito Sylvio Ballerini, pelo apoio e pela anuência que possibilitaram meu ingresso no Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Hídrica.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à minha família, por seu apoio e incentivo constante e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero muito obrigada.

RESUMO

A exploração intensiva dos recursos naturais e o planejamento ambiental inadequado são fatores que intensificam as fragilidades ambientais, incluindo a degradação dos recursos hídricos. Essa realidade evidencia a necessidade de um planejamento territorial que incorpore ferramentas capazes de orientar ações de conservação, gestão ambiental e hídrica de forma integrada. Nesse contexto, os Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), combinados a métodos de análise multicritério como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e à aplicação de funções de pertinência da lógica fuzzy, tornam-se fundamentais para subsidiar a tomada de decisão, permitindo julgamentos mais precisos e fundamentados. Diante desse cenário, o presente estudo teve como objetivo identificar as fragilidades ambientais e hídricas das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena, interior do Estado de São Paulo, visando apoiar a conservação dos recursos hídricos e o planejamento ambiental local. Além disso, foram comparadas duas metodologias neste processo de identificação: sobreposição por média aritmética (chamado de método tradicional) e o método AHP combinado às funções de pertinência fuzzy. A metodologia baseou-se inicialmente em uma revisão bibliográfica sistemática para a seleção dos temas ambientais relevantes, sendo definidos declividade, uso do solo, pedologia, pluviometria e áreas de preservação permanente (APP). Posteriormente, para a pluviometria, foram analisados dois cenários climáticos distintos: alta intensidade pluviométrica e escassez hídrica. A análise de sensibilidade confirmou a relevância dos temas selecionados e o cenário de escassez hídrica foi adotado como referência para o mapeamento. Os mapas temáticos das sub-bacias foram elaborados no software *Quantum GIS* (QGIS), com posterior reclassificação dos graus de fragilidade (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta). No método tradicional, foi aplicada a média aritmética simples; no método AHP foram atribuídos pesos diferenciados baseados na avaliação de especialistas. Os resultados evidenciaram diferenças significativas entre os métodos. A média aritmética tendeu à homogeneização dos dados, suavizando as variações ambientais. Já o método AHP combinado às funções de pertinência fuzzy permitiu uma representação mais detalhada e precisa das condições territoriais, evidenciando áreas sob maior pressão antrópica e regiões com vegetação conservada. Concluiu-se, portanto, que a integração da aplicação de funções de pertinência fuzzy e métodos multicritério representou uma abordagem metodológica eficaz e aprimorada para a análise da fragilidade ambiental e hídrica, especialmente em territórios complexos. O produto final obtido tem potencial para subsidiar ações estratégicas de gestão e planejamento ambiental, conservação dos recursos hídricos e formulação de políticas públicas no município de Lorena.

Palavras-chave: Gestão municipal; Análise multicritério; AHP (Analytic Hierarchy Process); Tomada de decisão.

ABSTRACT

The intensive exploitation of natural resources and inadequate environmental planning are factors that intensify environmental vulnerabilities, including the degradation of water resources. This reality highlights the need for territorial planning that incorporates tools capable of guiding conservation actions and integrated environmental and water management. In this context, Geographic Information Systems (GIS), combined with multicriteria analysis methods such as the Analytic Hierarchy Process (AHP) and the application of fuzzy logic membership functions, become essential to support decision-making, enabling more precise and well-founded judgments. Given this scenario, the present study aimed to identify the environmental and water-related vulnerabilities of the sub-watersheds in the municipality of Lorena, located in the interior of the State of São Paulo, with the goal of supporting water resource conservation and local environmental planning. Additionally, two methodologies were compared in this identification process: overlay using arithmetic mean (referred to as the traditional method) and the AHP method combined with fuzzy membership functions. The methodology was initially based on a systematic literature review to select relevant environmental themes, which were defined as slope, land use, pedology, rainfall, and permanent preservation areas (PPA). Subsequently, for rainfall, two distinct climatic scenarios were analyzed: high rainfall intensity and water scarcity. The sensitivity analysis confirmed the relevance of the selected themes, and the water scarcity scenario was adopted as a reference for mapping. Thematic maps of the sub-watersheds were created using Quantum GIS (QGIS) software, followed by reclassification of the degrees of vulnerability (very low, low, moderate, high, and very high). In the traditional method, a simple arithmetic mean was applied; in the AHP method, differentiated weights were assigned based on expert evaluation. The results showed significant differences between the methods. The arithmetic mean tended to homogenize the data, smoothing out environmental variations. In contrast, the AHP method combined with fuzzy membership functions allowed for a more detailed and accurate representation of territorial conditions, highlighting areas under greater anthropogenic pressure and regions with preserved vegetation. It was concluded, therefore, that the integration of fuzzy membership functions and multicriteria methods represented an effective and improved methodological approach for analyzing environmental and water vulnerability, especially in complex territories. The final product obtained has the potential to support strategic actions for environmental management and planning, water resource conservation, and the formulation of public policies in the municipality of Lorena.

Key-words: Municipal management; Multi-criteria analysis; AHP (Analytic Hierarchy Process); Decision-making.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1– Processo do Apoio à Decisão Multicritério.	36
Figura 3.2 – Tipos de Métodos de Decisão Multicritério.....	36
Figura 3.3 – Estrutura hierárquica de objetivo, critérios e alternativas.....	39
Figura 3.4 – Comparativo entre a lógica clássica e a logica fuzzy.....	43
Figura 4.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (trecho paulista) na UGRHI 02 do Estado de São Paulo	47
Figura 4.2 – Sub-bacias hidrográficas no município de Lorena.....	48
Figura 4.3 – Sub-bacias hidrográficas com áreas parciais no município de Lorena	48
Figura 4.4 – Rio Paraíba do Sul próximo ao largo da Matriz de Lorena no final do século XIX	49
Figura 4.5 – Etapas do processo de revisão sistemática para seleção de temas ambientais e critérios metodológicos para o mapa de fragilidades	52
Figura 4.6 – Distribuição da ocorrência dos temas utilizados nos artigos científicos analisados	52
Figura 4.7 – Distribuição dos tipos de métodos empregados nos artigos científicos analisados	53
Figura 4.8 – Assuntos mais abordados nos artigos científicos analisados	53
Figura 4.9 – Fluxograma do tratamento dos dados, elaboração e comparação dos mapas de fragilidade ambiental.....	54
Figura 4.10 – Localização dos postos pluviométricos utilizados	57
Figura 4.11 – Função $f(x)$ aplicada aos elementos do mapa de declividade.	64
Figura 4.12 - Gráfico da função $g(x)$ para valoração dos elementos do mapa de altitude.....	64
Figura 5.1 – Mapa de declividade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas segundo as classes definidas pela EMBRAPA.....	69
Figura 5.2 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema declividade.....	70
Figura 5.3 – Mapa pedológico do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas.....	72
Figura 5.4 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema pedologia.....	72
Figura 5.5 – Mapa de cobertura e uso do solo do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas	74

Figura 5.6 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema cobertura e uso do solo	74
Figura 5.7 – Cobertura e uso do solo nas áreas de preservação permanente hídrica do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas	78
Figura 5.8 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema APP	79
Figura 5.9 – Distribuição dos pluviômetros utilizados e resultado da interpolação da precipitação média do mês mais seco para o município de Lorena.....	80
Figura 5.10 – Isoietas geradas pela interpolação espacial da precipitação média do mês mais seco no município de Lorena.....	81
Figura 5.11 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema pluviometria.....	82
Figura 5.12 - Mapa de fragilidades ambientais e hídricas do município de Lorena e suas sub-bacias pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional).83	
Figura 5.13 – Mapa de declividade do município de Lorena e suas sub-bacias após a atribuição dos valores resultantes das funções de pertinência fuzzy.....	85
Figura 5.14– Mapa de pluviometria do município de Lorena e suas sub-bacias após a atribuição dos valores resultantes da função de pertinência fuzzy.....	86
Figura 5.15 – Mapa de fragilidades ambientais e hídricas do município de Lorena e suas sub-bacias considerando o emprego das funções de pertinência fuzzy e método AHP.....	89
Figura 5.16 – Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 2, 3, 4 e 5	92
Figura 5.17– Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 8 e 10	93
Figura 5.18– Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 13, 14 e 15	94

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Relação entre os conceitos de ambientes naturais e antropizados definidos por Tricart (1977) e Ross (1994)	30
Quadro 3.2 – Classificação das unidades de fragilidade	31
Quadro 3.3 – Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas.....	32
Quadro 3.4 – Tipos de métodos multicritério compensatórios e não compensatórios.....	37
Quadro 3.5 – Escala fundamental de Saaty (de comparações binárias)	40
Quadro 4.1 – Componentes da pergunta de pesquisa da revisão sistemática baseadas na abordagem SDMO.....	51
Quadro 4.2 – Relação dos temas ambientais e respectivas fontes de dados e escalas gráficas utilizadas.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Matriz de julgamento com comparação par a par dos critérios	40
Tabela 3.2 – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n	42
Tabela 4.1 – Área das sub-bacia hidrográficas no município de Lorena	47
Tabela 4.2 – Dados dos postos pluviométricos no município de Lorena e entorno	56
Tabela 4.3 – Graus de intensidade da fragilidade empregados	58
Tabela 4.4 – Temas ambientais e respectivos valores ou intervalos associados aos graus de fragilidade.....	60
Tabela 4.5 – Graus de fragilidade do tema APP	61
Tabela 4.6 – Escala de importância relativa entre dois critérios, orientativa para a definição de pesos no método AHP	66
Tabela 5.1 – Valores das áreas das classes de declividade e dos graus de fragilidade do município de Lorena.....	70
Tabela 5.2 – Valores das áreas das classes de solo e dos graus de fragilidade do município de Lorena.....	73
Tabela 5.3 – Valores das áreas das classes e dos graus de fragilidade de cobertura e uso do solo no município de Lorena.....	75
Tabela 5.4 – Quadro de áreas das diferentes larguras das áreas de preservação permanente hídricas na área de estudo.....	77
Tabela 5.5 – Áreas das classes de cobertura e uso do solo nas APPs hídricas presentes no município de Lorena.....	77
Tabela 5.6 – Valores das áreas dos graus de fragilidade em função da presença ou ausência de APP e do uso e cobertura do solo no município de Lorena.....	79
Tabela 5.7 - Valores das áreas das classes de pluviometria e dos graus de fragilidade no município de Lorena.....	81
Tabela 5.8 - Áreas dos graus de fragilidades do município de Lorena pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional).....	82
Tabela 5.9 – Fragilidade ambiental e hídrica das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional).83	
Tabela 5.10 – Valores das áreas das classes de declividade e dos graus de fragilidade do município de Lorena pelo emprego da função de pertinência fuzzy	86
Tabela 5.11 – Valores das áreas das classes de pluviometria e dos graus de fragilidade do município de Lorena pelo emprego da função de pertinência fuzzy	86

Tabela 5.12 – Matriz AHP calculada a partir da análise dos especialistas.....	87
Tabela 5.13 – Áreas dos graus de fragilidades do município de Lorena pelo emprego do método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy	88
Tabela 5.14 – Fragilidade ambiental e hídrica das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena pelo emprego do método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy	88

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
APP	Área de Preservação Permanente
CEE	<i>Collaboration for Environmental Evidence</i>
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
FBDS	Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IC	Índice de Consistência
IDW	<i>Inverse Distance Weighting</i>
IFA	Índice de Fragilidade Ambiental
IR	Índice de Randômico
MCDM	<i>Multi-Criteria Decision Making</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PD	Plano Diretor
PMMA	Plano Municipal da Mata Atlântica
PNMA	Política Nacional de Meio Ambiente
PMRH	Plano Municipal de Recursos Hídricos
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
QGIS	<i>Quantum GIS</i>
RC	Razão de Consistência
SEMIL	Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
UGRHI	Unidade de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	17
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
3.1 Planejamento e gestão ambiental.....	18
3.1.1 A evolução das políticas públicas e planejamento ambiental no cenário brasileiro	21
3.1.2 Instrumentos de planejamento e gestão ambiental.....	22
3.1.2.1 Zoneamento ambiental	24
3.1.2.2 Zoneamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos.....	26
3.2 Fragilidade ambiental e dinâmica da paisagem.....	28
3.2.1 Metodologias de determinação das fragilidades ambientais	30
3.3 Métodos de tomada de decisão	34
3.3.1 Métodos de tomada de decisão integrado aos Sistemas de Informação Geográfica	34
3.3.2 Método de Análise Multicritério	35
3.3.3 <i>Analytic Hierarchy Process</i> – AHP	38
3.3.4 Método AHP e lógica fuzzy	43
4. METODOLOGIA.....	46
4.1 Área de estudo.....	46
4.2 Seleção de temas	50
4.3 Elaboração dos mapas de fragilidade ambiental	54
4.3.1 Aquisição de dados dos temas ambientais	54
4.3.2 Determinação da escala de intensidade da fragilidade dos temas	58
4.3.3 Análise de sensibilidade dos temas e definição do cenário de pluviometria	61
4.3.4 Elaboração dos mapas de fragilidade ambiental	62
4.3.4.1 Método tradicional: sobreposição por média aritmética.....	63
4.3.4.2 Funções de pertinência fuzzy	63
4.3.4.3 Método AHP.....	65
4.3.5 Comparação dos métodos	66
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.1. Mapas temáticos	68
5.2. Mapa de fragilidades ambientais e hídricas – Método tradicional: sobreposição por média aritmética	82

5.3. Mapa de fragilidades ambientais e hídricas – Funções de pertinência fuzzy e método AHP.....	85
5.3.1. Funções de pertinência fuzzy	85
5.3.2. Método AHP	87
5.3.3. Comparação entre métodos	90
5.3.4. Orientações para o planejamento e gestão ambiental do município de Lorena	97
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	100
REFERÊNCIAS	103
APÊNDICE A – Códigos-fonte (Python e C#) para processamento de dados de precipitação	122
APÊNDICE B – Análise de sensibilidade dos temas selecionados	135
APÊNDICE C – Comparação entre os cenários da pluviometria.....	139
APÊNDICE D – Memória de cálculo da matriz AHP.....	141

1. INTRODUÇÃO

A exploração intensiva dos recursos naturais gera pressões significativas nos ecossistemas, intensificando as fragilidades ambientais, inclusive as relacionadas à disponibilidade e qualidade dos recursos hídricos. Simultaneamente, o planejamento inadequado do uso do solo, como a conversão de ecossistemas naturais em áreas urbanas e agrícolas, a poluição de corpos d'água decorrente de práticas insustentáveis e a busca por uma distribuição justa dos recursos acentuam os desafios preexistentes (IPCC, 2019).

A fragilidade ambiental de um ecossistema pode ser causada tanto por características naturais como agravada pelos processos antropogênicos, que geram estresse ambiental (Peres *et al.*, 2022; Turner *et al.*, 2003; Anjinho *et al.*, 2021). Entre as consequências relacionadas aos recursos hídricos estão a degradação de áreas de recarga, o assoreamento de rios e a contaminação por resíduos sólidos, por efluentes domésticos e industriais e por agroquímicos (Costa *et al.*, 2015; Smith; Silva; Biagioni, 2019; Leite; Cortines, 2024). Diante desses desafios, o planejamento territorial torna-se fundamental não apenas sob as perspectivas econômica e social, mas também ambiental (Ross, 2009).

A importância e a urgência do planejamento e gestão ambiental são enfatizadas em diferentes níveis, incluindo o de bacias hidrográficas, consideradas unidades territoriais essenciais para gestão integrada dos recursos hídricos. O zoneamento ambiental, nesse contexto, surge como ferramenta para orientar ações de conservação, planejamento e gestão, pois promove a ordenação do uso do território, estabelecendo zonas com restrições e diretrizes específicas e possibilitando visualizar a distribuição das áreas com maior ou menor aptidão (Ribeiro; Ribeiro, 2022).

Para o planejamento e gestão ambiental e, dos recursos hídricos, o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) auxiliam na identificação de áreas prioritárias para conservação, manejo sustentável e recuperação de ecossistemas, pois permite a integração de dados ambientais e espaciais, resultando em produtos como mapas de fragilidade ambiental (Strauch; Souza, 1998). Dessa forma, constituem uma das principais ferramentas utilizadas pelos órgãos públicos na elaboração do planejamento territorial ambiental (Kawakubo *et al.*, 2005).

Outro ponto relevante é que os SIGs podem subsidiar a tomada de decisão diante dos desafios ambientais, envolvendo a necessidade de alcançar diversos objetivos, ao considerar uma variedade de critérios e alternativas (Vettorazzi, 2006). Essa integração configura-se como um processo que transforma e combina dados geográficos com julgamentos de valor,

representando as preferências do tomador de decisão, com o objetivo de fornecer informações para o processo decisório (Gomes *et al.*, 2017; Souza; Jerônimo, 2021).

Um dos métodos amplamente utilizados em estudos envolvendo tomada de decisão com variados critérios e alternativas é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP) – em português, Processo Analítico Hierárquico. Esse método possibilita a comparação e a classificação de critérios em situações complexas envolvendo a tomada de decisões e contribui para a construção de uma estrutura hierárquica de objetivos que, não apenas orienta a tomada de decisões, mas também colabora para a consecução dos objetivos e metas (Saaty, 1994).

Nessa mesma linha, uma técnica mais avançada é a integração do método AHP com a lógica fuzzy, sendo que esta última tem se destacado devido à sua capacidade de capturar incertezas e imprecisões (Vanti *et al.*, 2007). Esta característica é essencial para evitar julgamentos imprecisos em muitos problemas de tomada de decisão (Bouyssou *et al.*, 2000).

Perante ao exposto, esta pesquisa tem como objetivo subsidiar o planejamento e a gestão ambiental com foco na conservação dos recursos hídricos a partir da identificação das fragilidades ambientais e hídricas das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena, localizado no interior do Estado de São Paulo. Para tanto, foram utilizados e comparados o método tradicional por média aritmética e o método de análise multicritério AHP combinado com a aplicação de funções de pertinência fuzzy, para auxiliar no processo de tomada de decisão.

Além dos problemas ambientais, o município de Lorena enfrenta dificuldades com a carência de dados e informações sobre os sistemas ambientais e hídricos de forma organizada e centralizada, bem como a ausência de zoneamento ambiental para apoiar a formulação de políticas de planejamento e gestão municipal. Dessa forma, o presente trabalho propõe-se a identificar as fragilidades ambientais e hídricas do território no que diz respeito aos fatores que comprometem a conservação dos recursos hídricos e dificultam o planejamento e a gestão integrada do uso do solo e da água. Assim, busca-se oferecer ao município, enquanto órgão gestor, um produto técnico que aponte áreas frágeis das sub-bacias hidrográficas, do ponto de vista da conservação dos recursos hídricos, orientando a elaboração e o aprimoramento de planos municipais, planos de bacia e outras políticas públicas voltadas ao planejamento, à gestão territorial e à proteção dos recursos naturais. Neste sentido, de abrangência do planejamento municipal, apesar de partir das sub-bacias hidrográficas, utilizou o recorte do município de Lorena.

Por fim, a hipótese da presente pesquisa é de que a produção do mapa demonstrando as áreas críticas para a conservação dos recursos hídricos por meio do uso combinado de funções

de pertinência fuzzy e do método de Análise Hierárquica por Processos (AHP), proporcionará uma descrição mais completa e precisa da área de estudo. O resultado esperado não apenas avaliará a eficácia da aplicação do método AHP e das funções de pertinência fuzzy, mas também possibilitará a elaboração de um produto mais detalhado para o município de Lorena, em que informações poderão ser extraídas e analisadas, tornando-se um importante instrumento para o planejamento e gestão municipal e para a conservação dos recursos hídricos.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa tem como objetivo geral identificar as fragilidades ambientais e hídricas das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena, localizado no interior do Estado de São Paulo, com ênfase nos fatores que comprometem a conservação dos recursos hídricos, servindo como ferramenta de apoio ao planejamento e à gestão ambiental e hídrica em âmbito municipal.

Para alcançar o objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) Elaborar o mapa de fragilidades ambientais e hídricas utilizando a metodologia tradicional da álgebra de mapas, com a sobreposição por média aritmética;
- b) Elaborar o mapa de fragilidades ambientais e hídricas empregando funções de pertinência fuzzy e o método AHP;
- c) Comparar as duas formas de elaboração de mapas, a fim de verificar qual se adequa melhor ao caso;
- d) Identificar os graus de fragilidade ambiental das sub-bacias hidrográficas para apoiar o planejamento e gestão ambiental, bem como subsidiar processos de tomadas de decisão relacionados à conservação dos recursos hídricos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma contextualização de temas que abordam questões relacionadas à fragilidade ambiental de sub-bacias hidrográficas. Destaca-se a relevância dessas questões como instrumentos essenciais para a tomada de decisões e para o planejamento e gestão ambiental. Dentre os conceitos abordados, destacam-se: planejamento e gestão ambiental, zoneamento ambiental e gestão dos recursos hídricos, dinâmica da paisagem, fragilidade ambiental e sistema de informação geográfica integrado a sistemas de suporte à decisão, como os métodos de análise multicritério.

3.1 Planejamento e gestão ambiental

O planejamento é uma prática que permeia diversos momentos da vida humana (Kenski, 2006). Em virtude de suas características e importância, desde a antiguidade, práticas de planejamento já eram observadas em diversas áreas como agricultura, pesca, formação de cidades, economia e, posteriormente, na área ambiental (Santos, 2004).

Historicamente, os períodos subsequentes à Revolução Industrial e Segunda Guerra Mundial revelaram o uso intenso e excessivo dos recursos naturais, causando a degradação ambiental em diversas formas, além da depleção dos recursos (Bursztyn; Bursztyn; 2012). Nessa época, o planejamento era majoritariamente voltado para questões econômicas, objetivando o crescimento acima de tudo, sem levar em consideração as implicações e impactos ambientais e sociais (Sicsú; Castelar, 2009).

No entanto, em meados da década de 1960, o planejamento ambiental evoluiu consideravelmente, incorporando novas técnicas, abordagens e conceitos, em decorrência da crescente preocupação com a degradação do meio ambiente e seus impactos na qualidade de vida das pessoas. Nesse período, as abordagens deixaram de focar somente nas premissas econômica e setorial, passando a incorporar também questões políticas, sociais e ecológicas, bem como a conscientizar o uso racional dos recursos naturais, tendo essas questões sido debatidas, em 1968, no Clube de Roma (Santos, 2004).

Segundo Silva e Santos (2004, p. 223):

“Planejamento ambiental é um processo contínuo que envolve coleta, organização e análise sistematizada das informações, por meio de procedimentos e métodos, para se chegar a decisões ou escolhas acerca das melhores alternativas para o aproveitamento dos recursos disponíveis em função de suas potencialidades, e com a finalidade de atingir metas específicas no futuro, tanto em relação a recursos naturais quanto à sociedade”.

No decorrer do século XX e início do século XXI, diversas reuniões de cúpulas ambientais e conferências internacionais ocorreram possibilitando a ampliação do conceito de planejamento ambiental e compartilhando objetivos comuns, como a Conferência de Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92 - 1992), a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20 - 2012) e, mais recentemente, o plano de ação global firmado pelos Estado-Membros da ONU, a Agenda 2030 (Castro; Lemos, 2016).

A Agenda 2030 representa um compromisso internacional que propõe um modelo de desenvolvimento sustentável baseado na integração das esferas ambiental, social e econômica. Essa agenda é composta pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que somam 17 objetivos e 169 metas a serem alcançados até o ano de 2030. Além de orientarem ações globais, os ODS incentivam que cada país estabeleça metas nacionais específicas, adaptando-as às suas realidades e incorporando-as em políticas públicas, programas e planos de governo (Cruz *et al.*, 2022).

A Agenda 2030 estabelece um compromisso coletivo que mobiliza diferentes níveis de governança, incluindo o municipal. Os governos locais, por sua proximidade com a realidade local, possuem maior autonomia e agilidade para implementar os ODS, promovendo o engajamento direto da população na identificação de prioridades e na construção de soluções contextualizadas. Essa capacidade de adaptação local é especialmente importante para o planejamento e a gestão ambiental, permitindo que metas globais sejam ajustadas às particularidades ambientais, sociais e institucionais de cada região (Ortiz-Moya *et al.*, 2020).

Em específico, os ODS 6 (Água potável e saneamento), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis), 13 (Ação contra a mudança do clima) e 15 (Vida terrestre) se destacam por sua interface com a identificação de fragilidades ambientais e a formulação de políticas de conservação. O ODS 6 trata da proteção dos ecossistemas aquáticos e da gestão eficiente da água, fundamentais para reduzir a fragilidade hídrica; o ODS 11 propõe cidades mais inclusivas e resilientes, com planejamento urbano integrado e menor impacto ambiental; o ODS 13 reforça a adaptação às mudanças climáticas em áreas vulneráveis, enquanto o ODS 15 aborda a proteção da vegetação nativa e a recuperação de áreas degradadas (ONU, 2015).

Assim, integrar os ODS ao planejamento ambiental local fortalece a capacidade dos territórios de enfrentar suas vulnerabilidades e avançar em direção ao desenvolvimento sustentável. Essa abordagem é essencial para assegurar a preservação do meio ambiente, a utilização racional dos recursos naturais e o alcance dos ODS em diferentes contextos (United Nations, 2015). Nesse cenário, o planejamento ambiental se destaca como uma ferramenta

essencial em todas as esferas de governança e na promoção do desenvolvimento sustentável, a fim de assegurar um futuro viável para as próximas gerações (Eyerkauffer *et al.*, 2020).

É possível ressaltar, dentro desta abordagem, que o planejamento ambiental se relaciona de forma intrínseca à gestão ambiental, pois do mesmo modo que o planejamento pode ser um eixo norteador para a tomada de decisões em nível de gestão, esta pode entender o planejamento como ferramenta ou instrumento para a efetividade de suas ações (Lemos; Magalhães Júnior; Wstane, 2019). Segundo Souza (2002), os conceitos de planejamento e gestão são distintos e complementares: o planejamento representa a preparação para a administração futura, visando prevenir ou reduzir possíveis problemas, enquanto a gestão é a implementação, ao menos parcial, das condições que o planejamento anterior contribuiu para construir (Souza, 2002).

De forma mais específica, a gestão ambiental consiste em um instrumento que regula a interação sociedade-natureza, oferecendo uma variedade de ações e resultados, influenciadas pela missão e pelos valores da pessoa ou entidade que a propõe (Uehara *et al.*, 2010). A eficácia do processo de planejamento requer uma gestão ambiental fundamentada em processos eficazes de formulação e implementação de uma política capaz de estabelecer diretrizes e normas que assegurem a realização de ações eficientes e eficazes (Nunes; Philippi Jr; Fernandes, 2012).

Como um método, processo ou conjunto de ações, o planejamento ambiental é essencial para a gestão ambiental em todas as instituições que realizam intervenções no meio ambiente, configurando-se como um conjunto lógico e complexo de ações voltado para a consecução de objetivos ambientais específicos, como proteção, preservação, recuperação ou melhoria da qualidade do meio ambiente (Milaré, 2015).

No âmbito desta pesquisa, destaca-se como ferramenta o planejamento ambiental aplicado ao ordenamento territorial e de bacias hidrográficas. No ordenamento territorial, o planejamento tem como objetivo analisar como as atividades humanas usam os recursos naturais e impactam o meio ambiente, verificando no processo se critérios ecológicos sustentáveis estão sendo seguidos, e propondo, caso necessário, instrumentos corretivos, curativos e preventivos (Jorge; Eufrade Junior; Marmontel, 2020). No contexto das bacias hidrográficas, o planejamento pode ser utilizado como ferramenta de apoio à gestão, visando a criação e desenvolvimento de metas e ações e buscando melhorias para o uso e ocupação do solo, qualidade de vida das populações, manutenção da diversidade biológica e a produtividade dos ecossistemas (Leandro 2013; Lima, 2020). Conforme a Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial adotada para fins de planejamento da gestão hídrica no Brasil (Brasil, 1997).

Com o propósito de garantir a proteção e preservação do território, bacias hidrográficas, e outras questões ambientais, é imperativo empreender esforços na formulação de políticas públicas. Essas políticas devem promover não apenas a conservação do meio ambiente, mas também o bem-estar social e atender às demandas específicas da sociedade (Floriano, 2007). Dessa forma, na seção seguinte, é apresentada uma breve descrição da evolução de algumas políticas públicas ambientais no Brasil e sua relação com o planejamento ambiental.

3.1.1 A evolução das políticas públicas e planejamento ambiental no cenário brasileiro

Além das políticas globais, as políticas públicas nacionais, regionais e locais também desempenham um papel importante no planejamento ambiental por meio de estratégias de ordenamento territorial, planos diretores, zoneamento ecológico-econômico, entre outras iniciativas (Born, 2006). É importante ressaltar que as políticas públicas e o planejamento ambiental estão relacionados, pois as políticas estabelecem as diretrizes e objetivos da gestão governamental, enquanto o planejamento permite a organização e a implementação de ações específicas para alcançá-los (Justen; Frota, 2017).

A construção da política ambiental no Brasil teve início na década de 1930, impulsionada por organizações internacionais e multilaterais (Moura, 2016). As políticas públicas criadas nesta década visavam o disciplinamento dos recursos naturais, como o Código de Águas, o Código de Mineração e o Código Florestal (Monosowski, 1989).

Entretanto, durante as décadas de 1930 a 1960, a questão ambiental não era contemplada de forma específica no país, e as políticas setoriais existentes abordavam a temática de maneira tangencial, priorizando a exploração dos recursos naturais (Moura, 2016). Assim, foi somente na década de 1960 que a demanda da sociedade por medidas mais efetivas em relação ao meio ambiente começou a ganhar força em resposta à poluição gerada pelas atividades produtivas, especialmente a industrial (Sanches, 2017).

A partir da década de 1970, as Nações Unidas tornaram a questão ambiental uma pauta prioritária para os governos e, neste contexto, o Brasil iniciou uma reestruturação na área ambiental, principalmente no âmbito institucional (Castelo *et al.*, 2021). A Conferência de Estocolmo, em 1972, foi um marco para o país, que passou a criar políticas públicas específicas para a preservação do meio ambiente, tendo como exemplo a criação da Secretaria Especial de Meio Ambiente (SEMA), em 1973 (Rissato; Spricigo, 2010).

A partir da década de 1980, observou-se um notável fortalecimento da relação entre as políticas públicas ambientais e o planejamento ambiental no Brasil, marcando um importante avanço nesses campos, com a criação da Política Nacional de Meio Ambiente (PNMA). Instituída pela Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, a PNMA foi a legislação pioneira na área ambiental, uma vez que estabeleceu princípios e diretrizes e criou instrumentos importantes para o planejamento e gestão ambiental no país (Brasil, 1981).

A PNMA foi recepcionada pela Constituição Federal de 1988, tendo o assunto “meio ambiente” sido validado no artigo 225, passando a ser a referência mais importante na proteção ambiental brasileira (Silva, 2019). A Carta Magna conferiu status constitucional à proteção do meio ambiente, abordando alguns eixos centrais, como: o meio ambiente como direito fundamental; a conservação da diversidade biológica e dos processos ecológicos; a criação de espaços territoriais especialmente protegidos; entre outros (Varella; Leusinger, 2008).

A PNMA colocou em evidência a importância da preservação ambiental e incentivou a adoção de medidas para a conservação dos recursos naturais e da biodiversidade brasileira, servindo de base para a criação de outras políticas, citando, por exemplo, a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) (Milaré, 2015). Promulgada pela Lei Federal nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, a PNRH tem como objetivo promover a gestão integrada e sustentável dos recursos hídricos, de modo a garantir a disponibilidade e a qualidade das águas para as presentes e futuras gerações (Brasil, 1997). Para alcançar esse objetivo, esta lei prevê a adoção de políticas públicas, planos e instrumentos de gestão participativa, além de incentivar a conservação e a recuperação dos recursos hídricos, bem como a prevenção de eventos hidrológicos críticos (Brasil, op. cit.).

Dessa maneira, conforme apresentado, a PNRH trabalha em sinergia com a PNMA, buscando a promoção de iniciativas voltadas para a preservação e conservação do meio ambiente no contexto brasileiro, fazendo uso de seus instrumentos de planejamento e gestão ambiental, tema que é apresentado na próxima seção.

3.1.2 Instrumentos de planejamento e gestão ambiental

A PNMA e a PNRH têm uma importante relação com o planejamento ambiental no Brasil. Essas políticas, complementares em seus objetivos de proteção, conservação e uso sustentável dos recursos naturais, conforme visto nas seções anteriores, promovem a participação e a gestão compartilhada entre setores e atores. Por meio das leis federais que as instituíram, foram criados instrumentos que auxiliam o planejamento e a gestão dos recursos.

A PNMA dispõe de importantes instrumentos, como o licenciamento ambiental, a avaliação de impactos ambientais, o Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente (SINIMA), o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF) e o zoneamento ambiental (posteriormente, regulamentado como Zoneamento Ecológico-Econômico - ZEE) (Brasil, 1981). Por sua vez, a PNRH define os Planos de Recursos Hídricos como um dos principais instrumentos de planejamento, que estabelecem objetivos, metas e programas para a gestão dos recursos hídricos (Brasil, 1997).

Conforme Souza (2000), para que as políticas ambientais sejam eficazes são necessários três elementos: a definição dos atores responsáveis pela formulação e implementação das ações; a definição de objetivos que orientem as ações e justifiquem a implementação das políticas; e a utilização de instrumentos que viabilizem e facilitem a implementação dos objetivos (Souza, 2000).

No que se refere aos instrumentos, existem diferentes categorias que se adaptam às exigências e circunstâncias locais, sendo classificados em instrumentos diretos e indiretos (Moura, 2016; Varela, 2001). De acordo com Oliveira (2016), os instrumentos diretos têm como objetivo solucionar conflitos e questões ambientais; por outro lado, os instrumentos indiretos são desenvolvidos para abordar outras problemáticas que contribuam, de alguma forma, para a resolução das questões ambientais. Essa mesma classificação é trazida por Barbieri (2007), chamando de instrumentos intrínsecos (os diretos) e extrínsecos (os indiretos).

Sob outra perspectiva de classificação, os instrumentos de política ambiental dividem-se em instrumentos de comando e controle e instrumentos econômicos. Os primeiros são mecanismos regulatórios diretos, pelos quais o poder público estabelece normas, padrões, procedimentos e restrições para as atividades econômicas, com o objetivo de assegurar o cumprimento das metas ambientais, sendo previstas sanções penais e administrativas em caso de descumprimento (Margulis, 1998; Moura, 2016), destacando-se, entre os mais utilizados internacionalmente, os padrões de qualidade, as licenças ambientais e o zoneamento territorial (Lustosa; Young, 2013). Já os instrumentos econômicos visam influenciar o comportamento dos agentes em relação ao meio ambiente por meio de incentivos financeiros ou desincentivos, como tributos, taxas, subsídios, incentivos fiscais e financiamentos com condições especiais (Barbieri, 2007).

A implementação dos instrumentos fortalece a governança ambiental ao estabelecer diretrizes claras e normas específicas para o planejamento territorial, o uso adequado do solo e a proteção dos recursos naturais locais, inclusive os recursos hídricos. Neste contexto, na seção

seguinte, é apresentado um dos instrumentos de comando e controle que possui relevância para este estudo.

3.1.2.1 Zoneamento ambiental

Zonear consiste em compartimentar uma região em porções territoriais, obtida pela avaliação dos atributos mais relevantes e de suas dinâmicas, apresentando cada compartimento como uma “área homogênea”, ou seja, uma zona (ou unidade de zoneamento) delimitada no espaço, com estrutura e funcionamento uniforme (Santos, 2004). O zoneamento é frequentemente adjetivado, sendo comum encontrar vários tipos de zoneamento especificados na legislação brasileira, como: urbano, industrial, unidades de conservação, ecológico-econômico, ambiental, entre outros (Silva; Santos, 2004).

Em relação aos tipos de zoneamento, para esta pesquisa, destaca-se o conceito de zoneamento ambiental, o qual aborda não apenas o meio urbano, mas também a proteção de áreas de relevante importância e interesse ambiental em todo o território (Silva, 2010). O zoneamento ambiental tem como principal função fornecer informações que permitam a avaliação da situação existente em um determinado território, devendo considerar a importância ecológica, as limitações, as fragilidades e as potencialidades dos ecossistemas, possibilitando a visualização da distribuição das áreas com maior ou menor aptidão e, assim, estabelecer vedações, restrições e alternativas de exploração dos recursos naturais no território (Montaño, 2002; MMA, 2018).

O zoneamento ambiental foi introduzido pela PNMA como um de seus instrumentos e regulamentado como Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), em 2002, por meio do Decreto Federal nº 4.297, tendo como principal objetivo estabelecer medidas e padrões de proteção ambiental, com intuito de garantir a qualidade do meio ambiente, dos recursos hídricos, do solo e a conservação da biodiversidade (Brasil, 2002). Além disso, é previsto que os ZEEs devem ser elaborados em diversas escalas, visando gerar informações de diferentes ordens e para diferentes objetivos (Brasil, *op. cit.*).

Em conformidade com o pacto federativo e com o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), o ZEE é executado de forma compartilhada entre a União, os Estados e os Municípios (Barrocas; Rodrigues; Meireles, 2017). Conforme estabelecido pela Lei Complementar nº 140, de 08 de dezembro de 2011, a responsabilidade pela elaboração do zoneamento ambiental cabe: em nível nacional e regional, à União; os Estados assumem a responsabilidade pela elaboração do zoneamento em âmbito estadual, devendo seguir as diretrizes estabelecidas nos zoneamentos nacionais e regionais; e, por sua vez, os Municípios

têm a incumbência de desenvolver seus Planos Diretores, observando os zoneamentos já existentes para o respectivo território (Brasil, 2011).

Em escala local, o zoneamento ambiental exerce um papel importante como instrumento de planejamento municipal no âmbito da política urbana, conforme estabelecido pelo Estatuto da Cidade (Lei Federal nº 10.257, de 10 de julho de 2001) (Brasil, 2001). Ele atua em conjunto com o Plano Diretor (PD) e o disciplinamento do parcelamento urbano e do uso e ocupação do solo, visando contribuir para a sustentabilidade dos municípios, principais centros populacionais e consumidores de recursos naturais (Louro; Menezes, 2012). Portanto, é fundamental que o zoneamento seja adequadamente regulado para garantir a utilização sustentável dos recursos e o desenvolvimento harmonioso do território municipal (MMA, 2018).

No contexto destacado, Silva (2010) enfatiza a necessidade de estabelecer critérios de zoneamento por meio de legislação municipal, sendo uma abordagem fundamental, uma vez que o zoneamento é uma questão de peculiar interesse dos municípios (Boschet; Rambonilaza, 2015). Rosa (2018) destaca, por exemplo, que o Plano Diretor Ambiental deve ser transformado em lei pela câmara de vereadores, para que possa assumir seu papel como instrumento de planejamento para orientar políticas ambientais; o Plano Diretor Ambiental e o mapa de zoneamento ambiental gerado proporcionam uma visão abrangente das condições do território. Assim, ele se torna essencial para planejar intervenções, orientar ações e facilitar a tomada de decisões, exercendo efetivamente a gestão territorial no contexto do desenvolvimento sustentável e preservação ambiental (Rosa, 2018).

O zoneamento ambiental vem sendo adotado em estudos de diferentes interfaces, tendo como cerne o planejamento ambiental e a gestão territorial. No estudo de Rosa e Ferreira (2021) foi apresentada uma proposta para o zoneamento ambiental do Município de Araguari/MG, demonstrando como este instrumento pode auxiliar na tomada de decisões pelo Poder Público, principalmente quando integrado a outros instrumentos de planejamento ambiental. Neste mesmo estudo, o território municipal foi dividido em duas zonas (zona de conservação ou recuperação e zona de atividades produtivas), e ambas foram definidas a partir de critérios ecológicos, econômicos e legais, visando definir áreas para preservação, recuperação e vulnerabilidades (Rosa; Ferreira, 2021).

No estudo de Lopes, Cestaro e Kelting (2011), o zoneamento ambiental serviu como uma ferramenta de suporte para o planejamento do uso e ocupação do solo do Município de Aquiraz/CE. A partir do mapeamento realizado, foram definidas cinco unidades ambientais fundamentadas nas relações de componentes dos meios físico, biótico e socioeconômico

encontrados na área da pesquisa. As determinações do potencial de suporte de cada unidade ambiental definiram os locais ideais para o desenvolvimento urbano, para o turismo e lazer do município, auxiliando os gestores públicos a gerenciar o uso e ocupação do solo e as atividades socioeconômicas (Lopes; Cestaro; Kelting, 2011).

Outra pesquisa elaborada que versa sobre o zoneamento ambiental, foi o estudo elaborado por Rêgo, Aguiar e Soares (2016), em que foi desenvolvido um estudo de caso sobre o zoneamento ambiental na Área de Proteção Ambiental do estuário do Rio Curú, localizada na costa semiárida do Oceano Atlântico Sul. O principal objetivo foi propor um zoneamento ambiental, técnico e legal visando a conservação da área protegida e auxiliar a elaboração de programas de monitoramento e conservação dos ecossistemas costeiros tropicais (Rêgo; Aguiar; Soares, 2016).

3.1.2.2 Zoneamento ambiental e a gestão dos recursos hídricos

O uso do solo está intrinsecamente relacionado com a qualidade e a disponibilidade dos recursos hídricos. As intensas mudanças e alterações na cobertura e no próprio uso do solo podem influenciar os componentes do ciclo hidrológico, acarretando impactos negativos em unidades territoriais de planejamento, citando, neste caso, as bacias hidrográficas (Moltz *et al.*, 2020; Oliveira *et al.*, 2018).

A redução da cobertura vegetal nas bacias hidrográficas, por exemplo, alteraria o balanço hídrico e a produção de sedimentos, ocasionando distúrbios no exercício e oferta de serviços ecossistêmicos, cujos impactos podem se estender a longo prazo, contribuindo para a degradação da qualidade do solo, eutrofização das águas, erosão e alterações no regime hidrológico (Tucci; Clarke, 1997). Assim, a presença de cobertura vegetal nas bacias hidrográficas exerce importante papel na dinâmica do ciclo hidrológico, tendo influência nos processos de interceptação e evapotranspiração, infiltração da água no solo e no escoamento superficial (Gaberšček; Murlis, 2011).

O zoneamento ambiental, neste contexto, pode contribuir para o planejamento e a gestão das bacias hidrográficas, principalmente se integrado com outros instrumentos de política ambiental, pois é capaz de indicar especificidades do território, condição básica para tomada de decisões, indicando as áreas com maiores fragilidades ambientais e, ao mesmo tempo, as regiões com maior potencial de aproveitamento (Rosa; Ferreira, 2022).

A PNRH estabelece a articulação entre a gestão dos recursos hídricos e o uso do solo como uma de suas diretrizes e as bacias hidrográficas como unidades territoriais de planejamento (Brasil, 1997), adotando um modelo reconhecido internacionalmente. Essa

abordagem é baseada na compreensão de que as bacias hidrográficas são unidades físicas bem definidas, caracterizadas pela integração e funcionalidade de seus elementos (Prochnow, 1990).

Neste aspecto, os municípios, por estabelecerem as políticas de disciplinamento do uso e ocupação do solo, possuem uma grande responsabilidade na proteção dos recursos hídricos (Vasconcelos; Silva, 2013), sendo uma de suas competências possibilitar a integração das políticas locais de uso, ocupação e conservação do solo com as políticas federal e estaduais de recursos hídricos (Santos, 2020).

Por meio da gestão integrada e da aplicação do zoneamento ambiental no território, o município adquire conhecimento das aptidões da paisagem e suas limitações, permitindo uma utilização e uma ocupação adequadas do solo em conformidade com as características do meio físico (paisagem natural), contribuindo para a recuperação, preservação e conservação do ambiente, desempenhando um papel fundamental no planejamento territorial, ambiental e hídrico (Dibieso, 2013). Conforme destacado por Mota (1999), o planejamento territorial de uma bacia hidrográfica fundamentado em princípios ambientais, é a abordagem mais efetiva para evitar a deterioração dos recursos hídricos.

Diversos estudos têm aplicado o conceito de zoneamento ambiental em bacias hidrográficas, visando à promoção de um ordenamento territorial mais eficaz e à conservação dos recursos hídricos. Um exemplo é o trabalho de Souza (2017), que conduziu o zoneamento ambiental na Bacia Hidrográfica do Alto São Francisco, em Minas Gerais, revelando as potencialidades desta região. A área de estudo abrange uma diversidade de usos do solo, incluindo práticas agrossilvopastoris, atividades de mineração, áreas de conservação e setores voltados para o turismo e pesquisa científica. O zoneamento, representado por mapas, consolidou informações essenciais para orientar o ordenamento da região, podendo promover uma ocupação racional e a preservação dos diferentes espaços (Souza, 2017).

Outros exemplos de pesquisa nesse contexto foram conduzidos por Martins *et al.* (2005) e Daltrozo (2008). Esses pesquisadores realizaram avaliações da deterioração ambiental em uma sub-bacia hidrográfica e em uma microbacia hidrográfica no Estado do Rio Grande do Sul, empregando o zoneamento ambiental. No estudo de Martins *et al.* (*op. cit.*), foi desenvolvido o zoneamento ambiental da sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena, utilizando uma análise de seis parâmetros ambientais para dividir a área em quatro classes de zoneamento. Esse instrumento otimizou a organização do espaço territorial e contribuiu significativamente para a preservação dos recursos naturais, fornecendo uma base valiosa para aplicação em outras sub-bacias hidrográficas. Já na pesquisa de Daltrozo (*op. cit.*), foi conduzido o ordenamento territorial, resultando na elaboração de uma carta de zoneamento ambiental para a microbacia

hidrográfica do rio Ibicuí-Mirim. O estudo destacou recomendações conforme as aptidões identificadas, inclusive sugerindo a criação de uma Área de Proteção Ambiental por meio da elaboração de Decreto-Lei.

Essas iniciativas evidenciam a importância do zoneamento ambiental como ferramenta estratégica para a gestão sustentável do território.

3.2 Fragilidade ambiental e dinâmica da paisagem

A degradação ambiental provocada pelas atividades humanas está em avanço, impulsionada pelos crescimentos econômico e populacional, pelo consumo desenfreado de recursos naturais, pela industrialização, urbanização, desmatamento, e outros fatores prejudiciais (Barger *et al.*, 2018). Esses fatores acabam impulsionando a fragilidade dos ambientes, despertando cada vez mais a necessidade de desenvolver abordagens teóricas e metodológicas que busquem o entendimento da relação entre natureza e sociedade (Crispim; Souza; Lourenço, 2014).

A fragilidade ambiental refere-se à suscetibilidade do ecossistema a mudanças em seu equilíbrio dinâmico de acordo com suas características intrínsecas e extrínsecas (Anjinho *et al.*, 2021). Os sistemas ambientais podem apresentar fragilidades, a depender das características naturais de sua formação, e também dos processos de desestabilização provocados pelas ações antrópicas, que são capazes de contribuir para desequilíbrios temporários ou permanentes (Ross, 1994). Qualquer alteração nos diferentes componentes da natureza (relevo, solo, vegetação, clima, recursos hídricos, entre outros) acarreta o comprometimento da funcionalidade do sistema, quebrando o seu estado de equilíbrio dinâmico, devido à funcionalidade intrínseca entre os seus componentes físicos e bióticos (Spörl; Ross, 2004).

A abordagem sistemática e integrada dos atributos naturais em interação com a sociedade tem sido pesquisada desde o século XIX, quando diversos estudiosos empreenderam esforços para desenvolver uma perspectiva teórica, conceitual e metodológica sobre a interação entre os fluxos materiais e energéticos dos elementos naturais e a influência da intervenção humana (Ferreira, 2010). No século XX, o geógrafo Richard Hartshorne retoma, em sua obra “*The Nature of Geography*”, os argumentos dos autores alemães Alexander Von Humboldt e Carl Ritter de que o conceito de unidade da natureza implica em uma interrelação causal de todos os seus elementos individuais (Arcassa, 2018). Para Von Humboldt e Ritter, era evidente que “a unidade da natureza incluísse tanto o inorgânico quanto o orgânico, o humano como o

não humano, o imaterial como o material e a exclusão de quaisquer partes seria não apenas arbitrária, mas poderia destruir a coerência e a unidade do todo” (Hartshorne, 1939, p. 67).

Na década de 1970, no contexto brasileiro, o geógrafo francês Jean Tricart, em sua obra "Ecodinâmica", propôs que uma análise mais aprofundada dos problemas ambientais ocorre quando se reconhece que os sistemas são compostos por fenômenos interrelacionados, destacando especialmente os fluxos de energia e materiais no ambiente. Tricart (1977) conceitua a ecodinâmica como a unidade da paisagem que reflete a dinâmica do meio ambiente por meio das interações entre os ecossistemas (ecótopo) e os seres vivos (biocenose). Em outras palavras, a ecodinâmica é um modelo de avaliação empírica, sistêmico, originalmente qualitativo e cartografável, que espacialmente compartimenta Unidades Territoriais com base no equilíbrio dinâmico entre a pedogênese e a morfogênese, classificando-os quanto aos graus de estabilidade/instabilidade ambiental, abrangendo desde os ambientes pretéritos até os atuais (Guirra, 2017).

Tricart (op. cit.) classificou as unidades ecodinâmicas em termos de degradação ou conservação, segundo três estágios: “meios estáveis”, “meios *intergrades*” e “meios fortemente instáveis”. Segundo o autor, nos “meios estáveis”, a configuração do terreno se desenvolve lentamente devido à ação dos processos mecânicos de erosão, apresentando pouca dissecação. Essas condições são reconhecidas como ideais para a formação do solo, promovendo um ambiente propício à pedogênese. Os “meios *intergrades*”, ou de transição, garantem uma transição suave entre ambientes estáveis e instáveis, sem cortes abruptos, mantendo-se como uma extensão contínua. Essa zona é marcada pela interferência simultânea e constante de processos morfogenéticos e pedogenéticos no mesmo espaço. Por fim, os “meios fortemente instáveis” possuem, como elemento predominante na dinâmica natural, a morfogênese, a qual os demais elementos estão subordinados. Esta situação pode se originar a partir de fenômenos naturais, como no caso de tectonismo, ou pela ação antrópica, especialmente por meio da substituição da cobertura vegetal.

Na década de 1990, o geógrafo brasileiro Jurandyr Ross sugeriu novos critérios e ampliou os conceitos das unidades ecodinâmicas apresentadas por Tricart para que pudessem ser empregados na área do planejamento ambiental. As “Unidades Ecodinâmicas Estáveis” foram definidas como as que estão em equilíbrio dinâmico, poupadas da ação humana, podendo apresentar “Instabilidade Potencial” (Miyazaki, 2014). Logo, as “Unidades Ecodinâmicas Instáveis” ou de “Instabilidade Emergente” foram definidas como sendo aquelas cujas intervenções antrópicas modificaram intensamente os ambientes naturais (Ross, 1994). A

abordagem das unidades ecodinâmicas apresentadas por esses dois autores pode ser verificada no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Relação entre os conceitos de ambientes naturais e antropizados definidos por Tricart (1977) e Ross (1994)

Autores	Proposta metodológica	Conceituação	
		Ambientes naturais	Ambientes antropizados
Tricart (1977)	Ecodinâmica	Unidades estáveis	Unidades instáveis
Ross (1994)	Fragilidade ambiental	Unidades ecodinâmicas de instabilidade potencial	Unidades ecodinâmicas de instabilidade emergente

Fonte: Amaral e Ross (2009).

3.2.1 Metodologias de determinação das fragilidades ambientais

As fragilidades ambientais podem ser determinadas a partir de modelos que integram diversas variáveis, a fim de representar propriedades e simular fenômenos e processos do meio do mundo real, ou seja, são representações simplificadas da realidade para facilitar a descrição, a compreensão de funcionamento atual e o desempenho futuro de um sistema (Spörl, 2007). A modelagem das fragilidades ambientais é ferramenta essencial para a gestão territorial e conservação dos recursos naturais (Souza *et al.*, 2022).

Nesse contexto, este subcapítulo aborda os modelos de determinação de fragilidade ambiental desenvolvidos por diversos autores, que, ao longo do tempo, foram aprimorados e complementados, incorporando novas metodologias. Um exemplo é a proposta de Ross (1994), que apresentou uma metodologia para a análise empírica da fragilidade em ambientes naturais e antropizados, aplicada ao planejamento territorial ambiental, tendo como fundamento os ambientes ecodinâmicos de Tricart (1977).

A abordagem de Ross utilizou variáveis ambientais, como relevo, tipos de solos, clima, uso da terra e cobertura vegetal. Foi estabelecida uma classificação de fragilidade potencial e emergente por meio de pesos associados a um conjunto numérico, combinando esses fatores em uma escala de 1 a 5, representando uma hierarquia entre os graus de fragilidade ou instabilidade, definidos por códigos como muito fraca (1), fraca (2), média (3), forte (4) e muito forte (5).

Nesse contexto, a classificação disposta no Quadro 3.2 determina os diferentes níveis hierárquicos de fragilidade das unidades ecodinâmicas e a sua capacidade de resiliência,

partindo do princípio que os seus componentes demandam uma avaliação sistêmica e holística (Santos, 2015). Elas servem como base para diversos estudos de fragilidade ambiental e para o planejamento físico-territorial, como pesquisas voltadas para a síntese das características da paisagem em unidades homogêneas, zoneamentos, diagnósticos ambientais e planejamento ambiental (Oliveira; Boin; Felício, 2017).

Quadro 3.2 – Classificação das unidades de fragilidade

Unidades de fragilidade	Classificação dos níveis de intensidade da fragilidade	
	Qualitativa	Numérica
Fragilidade Potencial	Muito baixa	1
	Baixa	2
	Média	3
	Forte	4
	Muito Forte	5
Fragilidade emergente	Muito baixa	1
	Baixa	2
	Média	3
	Forte	4
	Muito Forte	5

Fonte: Ross (1990; 1994); Santos (2015).

Para ilustrar, a intensidade de dissecação do relevo, a suscetibilidade à erosão dos tipos de solo e o grau de proteção aos solos pela vegetação, foram avaliados em uma escala de 1 a 5. Quando combinados, esses valores geraram códigos como 111 ou 555, traduzindo o grau de intensidade da fragilidade de um determinado território ou ambiente como muito fraco ou muito forte (Ross, 1994). O resultado desse processo teve como objetivo criar um produto cartográfico síntese, destacando diferentes áreas de fragilidade representadas por meio das Unidades Ecodinâmicas Estáveis (Instabilidade Potencial) e Unidades Ecodinâmicas Instáveis (Instabilidade Emergente) (Polidoro *et al.*, 2013).

Em uma outra abordagem, o estudo conduzido por Crepani *et al.* (2001) apresentou uma metodologia para a elaboração de mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo, com o propósito de subsidiar o ZEE da Amazônia, utilizando como base o conceito de ecodinâmica de Tricart (1977) e a reinterpretação de dados temáticos preexistentes (imagens de satélite). Para identificar a vulnerabilidade das unidades de paisagem, Crepani *et al.* (2001) analisaram variáveis individuais, relacionadas à fragilidade ambiental, incluindo geologia, geomorfologia,

pedologia, uso da terra, vegetação e clima. A análise e a interpretação das imagens, a partir desses elementos, possibilitaram o reconhecimento de diferentes estruturas e algumas propriedades físicas e químicas de materiais diversos, relacionadas, dentre outros aspectos, à resistência das rochas à erosão, permeabilidade do conjunto solo/rocha, elementos de textura do relevo, quebras de relevo, mudanças na litologia, declividade, tipo de solo e cobertura vegetal. A vulnerabilidade foi expressa pela atribuição de valores (de 1 a 3, totalizando 21 valores) para cada unidade de paisagem, de acordo com a relação morfogênese/pedogênese. Valores próximos a 1 indicavam maior estabilidade, valores ao redor de 2 representaram unidades de estabilidade intermediárias, e valores próximos de 3 indicavam unidades territoriais básicas mais vulneráveis (Quadro 3.3). Essa escala proporcionou uma compreensão abrangente da vulnerabilidade, contribuindo para a análise dos processos ambientais na área de estudo.

Mediante esse procedimento metodológico, Crepani *et al.* (2001) elaboraram mapas de vulnerabilidade natural à perda de solo a partir de um banco de dados contendo informações básicas sobre o meio físico e o uso da terra.

Quadro 3.3 – Avaliação da estabilidade das categorias morfodinâmicas

Categoria morfodinâmica	Características	Relação pedogênese	Valor
Estável	- cobertura vegetal densa; - dissecação moderada; e - ausência de manifestações vulcânicas	Prevalece a pedogênese	1
Intermediária	- balanço entre as interferências morfogenéticas e pedogenéticas	Equilíbrio pedogênese/morfogênese	2
Instável	- condições bioclimáticas agressivas, com ocorrências de variações fortes e irregulares de ventos e chuvas; - relevo com vigorosa dissecação; - presença de solos rasos; - inexistência de cobertura vegetal densa; - planícies e fundos de vales sujeitos a inundações; e - geodinâmica interna intensa.	Prevalece a morfogênese	3

Fonte: Adaptado de Crepani *et al.* (2001).

Em relação aos modelos aplicados em bacias hidrográficas, destaca-se o trabalho de Leandro (2013), que desenvolveu uma modelagem espacial para determinar o Índice de Fragilidade Ambiental (IFA). Essa abordagem, fundamentada em modelos propostos por Ross (1994) e Crepani *et al.* (2011), apresentou a capacidade aprimorada de identificar áreas mais detalhadas com maior índice de fragilidade ambiental. Conforme relatado pela autora, o modelo

de Crepani é generalista, pois determina a fragilidade ambiental de grandes áreas; o modelo de Ross trata de áreas específicas; e o modelo desenvolvido por ela é mais detalhista, pois abrange pequenas áreas.

A modelagem proposta por Leandro (2013) incorporou critérios como declividade do terreno, tipos de solos, características das rochas, condições climáticas, ocupação humana, cobertura vegetal, Áreas de Preservação Permanente (APP) e uso do solo. Esses temas são essenciais para descrever as variações ambientais em bacias hidrográficas, como evidenciado nos estudos de caso das Bacias do Rio Belém, do Rio Cotia e do Rio Iraí, localizadas no Município de Curitiba, Estado do Paraná (Leandro, 2013). Além da modelagem do IFA, o estudo explorou a possibilidade de desenvolver um sistema especialista baseado em informações georreferenciadas para a determinação de índices de fragilidade ambiental. Esse sistema especialista permitiu que usuários sem familiaridade prévia com cartografia gerassem informações relevantes para políticas de gestão e planejamento ambiental por meio da criação de mapas temáticos. Em conclusão, enfatizou que um maior nível de detalhamento das fragilidades ambientais é primordial para orientar órgãos públicos no zoneamento, a fim de trazer melhorias às áreas urbanizadas e realizar planejamento de áreas para crescimento urbano sem impactar negativamente o meio ambiente (Leandro, 2013).

Outra abordagem associada a bacias hidrográficas é o Plano Municipal de Recursos Hídricos (PMRH) de Campinas/SP, em que as fragilidades e potencialidades hídricas foram definidas, baseando-se nas metodologias de Ross (1994), Wischmeier e Smith (1978) e Silva e Machado (2014), que determinaram a importância de cada parâmetro na forma de fatores da Equação Universal de Perda de Solos e por pesos, respectivamente. Observa-se que nestes três trabalhos citados, pelo menos cinco variáveis foram utilizadas para determinar as fragilidades: declividade (fator topográfico); tipo de solo (fator morfométrico); clima (fator pluviométrico); uso e ocupação (fator uso e manejo); e cobertura vegetal (fator conservação do solo).

Para determinar a fragilidade hídrica das 30 microbacias hidrográficas do município de Campinas, foi realizada a soma ponderada de quatro variáveis: declividade, pedologia, APP e planícies de inundação. Após a aplicação do método, foi gerado um mapa de fragilidade hídrica, que traduz esta vulnerabilidade em índice qualitativo, variando em cinco graus de intensidade, fundamentado em Ross (1994): muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Além do produto cartográfico, também foram elaborados índices para auxiliar no entendimento de como as fragilidades hídricas se comportam de maneira regionalizada, tendo sido calculado, para isso, o Índice de Fragilidade Hídrica (Prefeitura Municipal de Campinas, 2016).

Em relação às potencialidades hídricas, o PMRH considerou para a análise a cobertura vegetal das microbacias, devido à sua importância para que se garanta a permeabilidade do solo, a infiltração da água e a recarga dos aquíferos, assim como a estabilidade de taludes e manutenção do território. Para compor esta etapa, foram gerados o Índice de Cobertura da Vegetação da Microbacia e o Índice de Cobertura da Vegetação das APPs (Prefeitura Municipal de Campinas, 2016). Desse modo, verifica-se que o PMRH de Campinas representa um exemplo prático elaborado e implementado pelo Poder Público para o planejamento e gestão ambiental, sobretudo, dos recursos hídricos.

3.3 Métodos de tomada de decisão

Este subcapítulo busca demonstrar a interação entre SIGs e métodos de tomada de decisão, em especial a análise multicritério denominada AHP. Estas abordagens oferecem suporte na identificação, avaliação e priorização de fragilidades ambientais, auxiliando os tomadores de decisão (ou decisores) na busca por soluções mais eficazes e sustentáveis.

3.3.1 Métodos de tomada de decisão integrado aos Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica têm sido utilizados em vários estudos para determinação da fragilidade ambiental, como evidenciado nas pesquisas mencionadas ao longo da seção 3.2.1. É notável que todos os estudos incorporaram, em algum momento, a geração de produtos cartográficos como parte de sua metodologia.

Lidar com informações espaciais de forma organizada é fundamental para o a gestão ambiental e os SIGs são ferramentas eficientes para cumprir este propósito (Ramirez, 2018). Com os SIGs, diversas fontes podem ser manipuladas e combinadas, mapas e planos de informações podem ser sobrepostos ou cruzados, o que permite análises integradas de dados e de informações, e proporciona uma compreensão sistemática dos componentes, inclusive da dinâmica ambiental (Rosa; Ross, 1999; Ferreira *et al.*, 2011).

Além disso, os SIGs são excelentes instrumentos que subsidiam a tomada de decisão no âmbito do planejamento ambiental, visando a orientação de ações por parte dos gestores e proporcionando uma gama de benefícios ao abordar problemas com dimensões espaciais (Castro *et al.*, 2015). A integração estratégica de SIGs com métodos de tomada de decisão são exemplificadas em diversos estudos, tais como Donha, Souza e Sugamoto (2006), Weiss e

Pippi (2019) e Rodríguez-Merino, García-Murillo e Fernández-Zamudio (2020), que destacam o papel dos SIGs na determinação de fragilidades ambientais.

Conforme citado por Moura (2014), a integração da análise de fragilidade ambiental com o uso de SIG alinha-se aos princípios do *geodesign*, abordagem que articula dados espaciais, conhecimento teórico e suporte à decisão sustentável do território e subsidiando ações de conservação hídrica e políticas públicas baseadas em evidências geográficas (Moura, 2014). Para Gomes e Gomes (2014), a tomada de decisão é a identificação e seleção de alternativas, visando encontrar a solução mais adequada, levando em conta diversos fatores e considerando as expectativas dos avaliadores. Cada decisão envolve seis elementos essenciais: decisor, objetivos, preferências, estratégia, situação e resultado. Assim, o tomador de decisão encontra-se imerso nesse contexto, buscando atingir metas, tendo preferências e adotando estratégias para alcançar resultados, e envolvendo-se em um processo de seleção entre as alternativas disponíveis (Freitas; Marins; Souza, 2006).

Neste cenário, a análise multicritério destaca-se como uma abordagem revolucionária no campo da tomada de decisões (Taherdoost; Madanchian, 2023). Esta abordagem oferece uma extensa gama de técnicas e procedimentos para estruturar problemas decisórios, bem como para conceber, avaliar e priorizar alternativas (Malczewski, 2006). Esse método e suas categorias têm sido empregados em questões espaciais, integrando-se a SIGs. Essa integração se configura como um processo que transforma e combina dados geográficos com julgamentos de valor, representando as preferências do tomador de decisão, a fim de fornecer informações fundamentais para o processo decisório (Malczewski, 2006; Greene *et al.*, 2020).

Para enfrentar situações e desafios nos quais é necessário alcançar simultaneamente diversos objetivos, considerando uma variedade de critérios, é importante adotar métodos eficazes de suporte à tomada de decisão (Gomes *et al.*, 2017; Souza; Jerônimo, 2021). Nesse contexto, a análise multicritério, discutida na seção seguinte, destaca-se como uma abordagem relevante para lidar com tais complexidades.

3.3.2 Método de Análise Multicritério

O Método de Decisão Multicritério ou Apoio à Decisão Multicritério (MCDM – acrônimo para o termo em inglês *Multi-Criteria Decision Making* ou *Multi-Criteria Decision Aid*), surgiu durante a década de 1970 como subdisciplina da pesquisa operacional, com o objetivo de prover apoio metodológico para a estruturação e resolução de problemas de decisão multicritério, por meio de técnicas analíticas (Belton; Stewart, 2002). Esse método é um processo composto por três fases distintas, que se dividem em oito subfases: a estruturação do

problema, que engloba (i) identificação de decisores, (ii) definição de alternativas e (iii) critérios relevantes; a fase de avaliação, que abrange (iv) avaliação das alternativas em relação aos critérios, (v) determinação da importância relativa dos critérios, (vi) avaliação de cada alternativa e (vii) análise global das alternativas; e a fase de recomendação, que culmina na (viii) elaboração de recomendações para os cursos de ação a serem seguidos (Gomes et al., 2004). Este processo pode ser visualizado na Figura 3.1.

Ao longo dos anos, diversos métodos multicritério foram desenvolvidos, apresentando características distintas que podem estar relacionadas a vários aspectos, desde a qualidade das respostas até o tipo de problema que visam solucionar (Taherdoost; Madanchian, 2023). As principais diferenças entre esses métodos envolvem o nível de complexidade dos algoritmos, os métodos de ponderação para critérios, a maneira de representar critérios de avaliação de preferências, a consideração de dados incertos e, por fim, o tipo de agregação de dados (Bączkiewicz *et al.*, 2021).

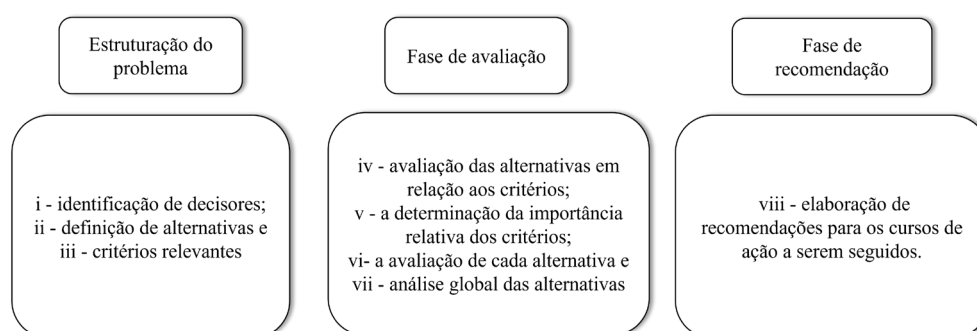


Figura 3.1– Processo do Apoio à Decisão Multicritério.

Fonte: Organizado pela autora.

Os métodos MCDM podem ser classificados em diferentes formas. Taherdoost e Madanchian (2023) citam os métodos compensatórios (*tradeoff-based*) e não compensatórios (*non-tradeoff-based*); tomada de decisão individual ou em grupo; informação qualitativa ou quantitativa e certa ou incerta (Figura 3.2).

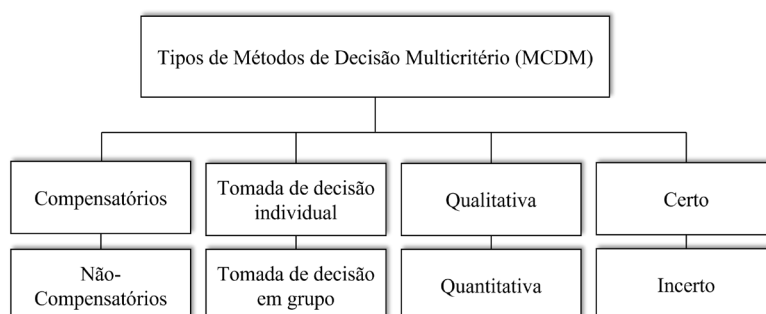


Figura 3.2 – Tipos de Métodos de Decisão Multicritério.

Fonte: Taherdoost e Madanchian (2023).

Neste trabalho, destaca-se a distinção entre métodos compensatórios e não compensatórios. Nos métodos compensatórios, um desempenho insatisfatório em determinado critério pode ser compensado por um bom desempenho em outro, refletindo os *trade-offs* naturais entre os critérios avaliados (Almeida, 2013). Já nos métodos não compensatórios, não há possibilidade de compensação: cada critério é analisado de forma independente, e deficiências em um deles não podem ser equilibradas por vantagens em outro. O Quadro 3.4 apresenta exemplos representativos de ambos os tipos de abordagem.

Quadro 3.4 – Tipos de métodos multicritério compensatórios e não compensatórios

Métodos compensatórios		
MAUT	Baseia-se na incorporação de fatores de incerteza e preferências de risco em métodos de suporte à decisão de critérios múltiplos.	(Keeney; Raiffa, 1993)
Família SMART	Pondera os critérios com base em sua importância e converte pesos de importância em números reais.	(Edwards; Barron, 1994)
AHP	Comparação par a par de critérios hierárquicos considerando informações de diferença.	(Saaty, 1980)
ANP	Um tipo não linear e mais geral de AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>) utilizando uma agregação baseada em cadeias de Markov.	(Saaty, 1996)
TOPSIS	Avaliação com base na distância da alternativa para a solução ideal.	(Hwang; Yoon, 1981)
VIKOR	Uma versão compensatória do TOPSIS que se baseia na minimização da distância até a solução ideal usando uma abordagem de normalização linear.	(Opricovic; Tzeng, 2004)
MACBETH	Baseia-se na ponderação dos critérios e na avaliação das opções em julgamentos qualitativos sobre diferenças de valor para auxiliar o tomador de decisões a quantificar a atratividade relativa das opções.	(Bana; Costa, 1994)
TODIM	O método multicritério TODIM é uma abordagem discreta de tomada de decisão, que utiliza a noção de uma medida global de valor baseada na Teoria dos Prospectos.	(Gomes; Lima, 1991, 1992)
Métodos não compensatórios		
Família ELECTRE	Estabelece uma relação de classificação entre as alternativas e utiliza comparação par a par.	(Roy, 1991)
Família PROMETHEE	Método de classificação (como o ELECTRE) incluindo várias iterações.	(Brans; Vincke, 1985; Brans <i>et al.</i> , 1986)

Fonte: Reis e Schramm (2022); Taherdoost e Madanchian, (2023).

Na elaboração de mapas de fragilidades ambientais com base em métodos multicritério compensatórios, considera-se que diferentes fatores ambientais podem interagir e influenciar

conjuntamente o resultado final. Nesse tipo de abordagem, um desempenho desfavorável em determinado critério pode ser compensado por um desempenho mais favorável em outro, permitindo uma análise mais equilibrada das condições territoriais. Por exemplo, áreas com elevada declividade, que indicariam maior fragilidade, podem ser classificadas com menor grau de fragilidade caso apresentem cobertura vegetal preservada ou solos com alta estabilidade. Da mesma forma, regiões com baixos índices de precipitação podem ter sua fragilidade hídrica atenuada se associadas a outros fatores positivos, como uso do solo sustentável ou presença de áreas legalmente protegidas.

3.3.3 *Analytic Hierarchy Process – AHP*

O método AHP tem encontrado extenso uso em pesquisas ambientais, abordando diversas temáticas, dentre elas, planejamento, zoneamento, conservação ambiental e mapeamento de fragilidades ambientais (França *et al.*, 2020; França, 2022; Santos; Silva Junior; Pereira, 2015). A implementação desse método não apenas proporciona uma compreensão abrangente das relações inerentes ao processo, mas também oferece uma estrutura organizada que facilita a análise e a tomada de decisões, por meio da construção de uma hierarquia de decisão (Pinese Júnior; Rodrigues, 2012).

O método AHP, desenvolvido por Thomas L. Saaty na década de 1970, representa uma teoria e abordagem metodológica para medição relativa em que o foco não repousa na precisão das medidas quantitativas, mas nas proporções entre elas, destacando-se particularmente em situações em que a escolha da melhor alternativa é fundamental, visando compreender as relações entre elas (Brunelli, 2015). Ele possibilita a classificação e a comparação de critérios em situações complexas que envolvam a tomada de decisões (Favretto; Nottar, 2016). A aplicação deste método abarca a construção de uma estrutura hierárquica de objetivos, orientando a tomada de decisões e contribuindo para a consecução dos objetivos e metas, estabelecendo a hierarquização dos critérios por meio de comparações sistemáticas pareadas, ou seja, par a par (Saaty, 1994).

As comparações em pares são fundamentais na aplicação do AHP, em que os avaliadores atribuem prioridades aos critérios, avaliando-os em pares e expressando julgamentos numericamente em uma escala de razão para determinar a importância relativa, resultando na elaboração de uma matriz de comparação em pares; nesse processo, considera-se a reciprocidade (a importância de A em relação a B é a inversa da importância de B em relação a A) e a igualdade dos elementos diagonais, que são fixados em 1 (um) (Saaty, 1987).

O emprego do AHP inicia-se com a decomposição do objetivo em uma estruturação hierárquica de critérios previamente estabelecidos, levando em consideração sua relevância em relação à meta estabelecida (Gomede; Barros, 2012). Para construção da estrutura hierárquica, é necessário identificar os critérios e as alternativas que tenham relevância em função da meta estabelecida. A estrutura deve ser representada conforme a Figura 3.3.

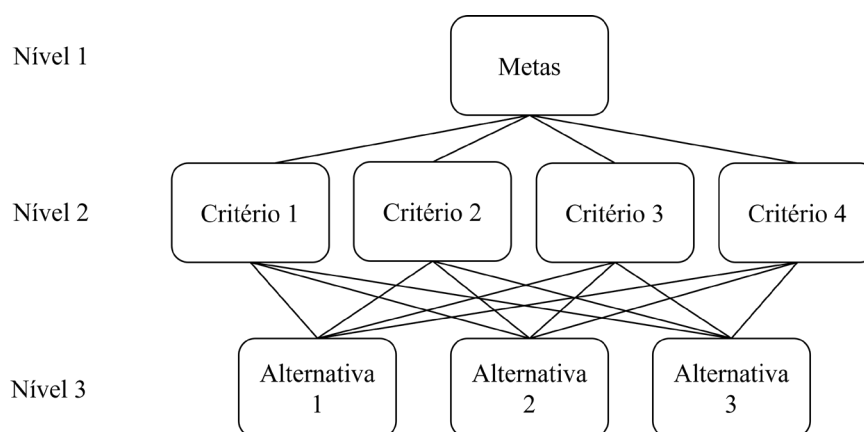


Figura 3.3 – Estrutura hierárquica de objetivo, critérios e alternativas
Fonte: Adaptado de Vargas (2010).

Em seguida, a determinação da importância dos critérios resulta da análise comparativa dois a dois, com foco no objetivo desejado para obter pesos relativos, refletindo a importância relativa de cada critério (Schmidt, 1995). Para realizar a comparação par a par, uma pergunta pode ser aplicada repetidamente para cada par de critérios a ser avaliado, como: entre estes dois critérios (critério 1 e critério 2), qual é o mais importante para o alcance dos objetivos ou metas estabelecidas? Essa avaliação utiliza uma escala verbal com valores numéricos correspondentes, conhecida como a escala fundamental de Saaty (Reis; Schramm, 2020). No Quadro 3.5, a escala fundamental orienta a comparação entre as alternativas de decisão, sendo aplicada também nas comparações diretas entre os critérios.

Na atribuição de pesos no método AHP, quando um critério é comparado consigo mesmo, o valor é 1, indicando igual importância; os pesos, que variam de 1 a 9, são atribuídos individualmente pelos pesquisadores seguindo a hierarquia estabelecida (Gomes; Bias, 2018). Nas avaliações pareadas, a reciprocidade é essencial: se um elemento é considerado x vezes mais dominante que outro, a comparação inversa recebe o valor recíproco, por exemplo, se recebe o peso 2, o valor recíproco é $1/2$ (Brunelli, 2015).

Quadro 3.5 – Escala fundamental de Saaty (de comparações binárias)

Intensidade de importância	Recíproco	Definição	Explicação
1	1	Igual importância	As duas alternativas contribuem igualmente para o objetivo
3	1/3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem levemente uma alternativa em relação a outra
5	1/5	Importância forte	A experiência e o julgamento favorecem fortemente uma alternativa em relação a outra
7	1/7	Importância muito forte	Uma alternativa é muito fortemente favorecida em relação a outra: sua dominação de importância
9	1/9	Importância extrema	A evidência que favorece uma alternativa em relação a outra com o mais alto grau de certeza
2, 4, 6, 8	1/2, 1/4, 1/6, 1/8	Valores intermediários entre dois julgamentos adjacentes	Às vezes, é necessário interpolar um julgamento de compromisso numericamente porque não há uma palavra adequada para descrevê-lo.

Fonte: Adaptado de Baptistelli, Januário e Campos (2019) e Saaty e Vargas (2013).

A quantidade de avaliações necessárias para construção de uma matriz de julgamentos genérica A, como apresentado na Tabela 3.1, é dada pela Equação 3.1, onde n é o número de elementos pertencentes a matriz.

$$\frac{n \cdot (n - 1)}{2} \quad (3.1)$$

Tabela 3.1 – Matriz de julgamento com comparação par a par dos critérios

	Critérios			
Critérios	c_1	c_2	...	c_j
c_1	1	a	...	b
c_2	$\frac{1}{a}$	1	...	c
...	...	...	...	...
c_j	$\frac{1}{b}$	$\frac{1}{c}$	...	1

Fonte: Adaptado de Reis e Schramm (2022).

Após a elaboração da matriz (Tabela 3.1), é prática comum realizar a normalização, garantindo que os vetores estejam em uma escala comparável. Esse procedimento é fundamental para unificar as prioridades de diferentes níveis na hierarquia. A normalização é realizada somando os elementos de cada coluna e, em seguida, dividindo cada elemento pelo somatório dos valores da respectiva coluna (Gomes; Bias, 2018).

Posteriormente, é importante verificar a consistência dos julgamentos. Nesse sentido, uma revisão cuidadosa dos julgamentos é necessária para assegurar um nível aceitável de consistência em termos de proporcionalidade e transitividade. Segundo Lira, Francisco e Feiden (2021), a subjetividade presente nos julgamentos, influenciada pelas experiências dos pesquisadores, pode introduzir inconsistências na matriz final. Assim, Saaty (1991) propôs um procedimento para calcular inconsistências derivadas do julgamento de valor entre os elementos comparados num problema complexo de decisão. A avaliação dessa inconsistência é conduzida através da Razão de Consistência (RC), a qual relaciona o Índice de Consistência (IC) da matriz em consideração com o Índice de Randômico (IR) obtido da matriz recíproca de ordem n , que possui elementos não-negativos e randômicos (que é apresentado mais à frente na Tabela 3.2).

Vargas (2010) delinea os passos para avaliar a consistência do julgamento. Inicialmente, o cálculo do maior autovalor da matriz de julgamento (λ_{max}) envolve a soma do produto de cada total da coluna j na matriz original de julgamentos pelos elementos correspondentes na posição j do vetor de prioridade. Aqui, j representa a coluna na matriz de julgamento, variando de 1 a n . A fórmula para o cálculo do autovalor considera a matriz de julgamento, o vetor de prioridades (com as prioridades calculadas dos elementos) e a ordem (n) da matriz (Equação 3.2).

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n T_j \cdot P_j \quad (3.2)$$

Onde:

λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamento;

T_j é o somatório da coluna j da matriz de julgamento;

P_j é a prioridade calculada para o critério localizado na linha j .

No passo seguinte, realiza-se o cálculo do IC (na língua inglesa, *Consistency Index*), conforme a Equação 3.3.

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3.3)$$

Onde:

IC é o Índice de Consistência;

λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamento;

n é o número de critérios avaliados.

Por fim, calcula-se a RC (conhecida como *Consistency Ratio*), conforme a Equação 3.4.

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (3.4)$$

Onde:

RC é a Razão de Consistência;

IC é o Índice de Consistência;

IR é o Índice Randômico

O IR, de acordo com Saaty (1991), corresponde ao índice de consistência de uma matriz recíproca gerada de maneira aleatória pelo Laboratório Oak Ridge. Na Tabela 3.2, são apresentados os valores do IR, calculados pelo referido laboratório, para matrizes recíprocas quadradas de ordem n .

Tabela 3.2 – Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty, 1991.

Segundo Saaty (1991), a matriz de julgamento é considerada consistente quando o RC calculado é menor ou igual a 0,10. Entretanto, se a razão de consistência se aproxima de 1%, isso também não é desejável, pois, espera-se algum grau de inconsistência nos julgamentos. Esse fenômeno é agravado quando o número de elementos a serem comparados é muito grande, já que suas prioridades relativas se tornam diminutas, aumentando a sensibilidade a erros que podem distorcer a ordem de magnitude das respostas (Saaty, 1991).

3.3.4 Método AHP e lógica fuzzy

O método AHP, conforme exposto na seção anterior, oferece uma metodologia de tomada de decisão de fácil aplicação que auxilia o tomador de decisões a fazer escolhas dos julgamentos (Oğuztimur, 2011). Além da facilidade de aplicação, é relevante destacar a sua flexibilidade, uma vez que o método pode ser integrado a outras ferramentas, como é o caso da lógica fuzzy (Caggy; Almeirda, 2020). A aplicação da lógica fuzzy, especialmente em processos de modelagem, configura-se como uma metodologia eficaz na avaliação de paisagens, assim como para ações de conservação e planejamento de recursos naturais, tendo demonstrado resultados positivos em distintos estudos ambientais e ecológicos recentes (Sheehan; Gough, 2016).

Nesse contexto, diferentemente da lógica booleana que admite apenas valores binários, ou seja, verdadeiro ou falso (1 ou 0), a lógica fuzzy trata de valores que variam entre 0 e 1, em que os valores podem ser expressos de maneira linguística, utilizando termos como certo, verdadeiro, não-verdadeiro, falso, negativo, moderado, muito, pouco, e em que cada termo linguístico é interpretado como um subconjunto difuso de um intervalo unitário (Souza, 2008). Um valor de pertinência de 0,5, por exemplo, pode representar meia verdade; logo, 0,9 e 0,1, podem representar quase verdade e quase falso, respectivamente (Rignel *et al.*, 2011).

Para compreender a lógica fuzzy de forma elucidativa, considera-se a marcação de um encontro às 17 horas em um local específico, reconhecendo que encontrar alguém exatamente nesse horário é praticamente impossível; assim, essa matemática possibilita expressar "um pouquinho mais tarde que às 17 horas, um pouquinho mais cedo que às 17 horas", proporcionando flexibilidade na representação de incertezas e imprecisões (Barros; Fernandes, 2019).

A distinção entre a lógica booleana e a lógica fuzzy é representada pela Figura 3.4. Enquanto a lógica binária se limita a distinguir apenas entre preto e branco, a lógica fuzzy vai além, sendo capaz de reconhecer uma variedade de tons de cinza (Kohagura, 2007).



Figura 3.4 – Comparativo entre a lógica clássica e a logica fuzzy
Fonte: Adaptado de Kohagura (2007).

Uma abordagem central deste trabalho é a integração entre a lógica fuzzy e o método AHP. Embora o AHP seja amplamente utilizado na tomada de decisão multicritério, sua aplicação convencional pode ser limitada pela subjetividade e incerteza envolvidas em muitos contextos decisórios (Bouyssou *et al.*, 2000). Para lidar com essas imprecisões, a combinação com a lógica fuzzy surge como uma alternativa eficaz, permitindo a conversão de escalas verbais em escalas numéricas por meio de funções de pertinência e possibilitando análises de consistência e sensibilidade mais robustas (Ishizaka, 2014).

A lógica fuzzy, proposta por Zadeh (1965), baseia-se na teoria dos conjuntos difusos, nos quais os elementos possuem diferentes graus de pertencimento, variando entre 0 (não pertencente) e 1 (pertencimento total) (Silva Júnior, 2015). A função de pertinência $f_A(x)$ associa a cada elemento $x \in U$ um valor contínuo nesse intervalo, refletindo seu grau de adesão a um conjunto fuzzy A . Assim, quanto mais próximo de 1 for o valor de $f_A(x)$, maior é o pertencimento de x ao conjunto em questão (Zadeh, 1965).

A título de exemplificação, considera-se um espaço U composto por diferentes valores de declividade do terreno, em que cada categoria, como terreno plano, ondulado e montanhoso, representa um elemento x desse espaço. Para avaliar a fragilidade ambiental associada a cada categoria, define-se um conjunto fuzzy A , no qual a função de pertinência $f_A(x)$ atribui um valor entre 0 e 1 a cada classe de declividade, indicando seu grau de adesão ao conceito de fragilidade ambiental. Por exemplo, regiões planas podem ter $f_A(x) = 0,2$, pois possuem baixa fragilidade; as regiões com declividade ondulada podem ter $f_A(x) = 0,6$, indicando fragilidade média e as regiões montanhosas podem apresentar $f_A(x) = 0,8$, pois representam alta fragilidade ambiental. Dessa forma, quanto maior o valor da função de pertinência, maior o grau de fragilidade associado àquela classe de declividade, conforme o princípio descrito por Zadeh (1965).

A forma da função de pertinência é definida pelo analista (Bressani *et al.*, 2015), sendo comuns as funções triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoideal (Krusche, 2023). No contexto de sistemas fuzzy aplicados a SIG e análise espacial, as classificações mais recorrentes incluem: linear, gaussiana, *large* (grande), *MS large* (muito grande), *small* (pequeno), *SM small* (muito pequeno) e *near* (próximo) (Chung; Fabbri, 2001). Neste estudo, foi utilizada a função de pertinência linear, em que os valores abaixo de um limite mínimo têm pertinência igual a zero e, acima de um limite máximo, igual a um, com variação contínua entre esses extremos (Rahman *et al.*, 2025).

Em relação aos estudos ambientais, a técnica integrando fuzzy e AHP pode ser igualmente aplicada nas práticas de conservação, planejamento e gestão ambiental, como pode

ser verificado nos estudos de Lira, Francisco e Feiden (2021), Ribeiro *et al.* (2023) e Silva Júnior (2015). No âmbito das fragilidades ambientais, pode ser citada a pesquisa de Lira, Francisco e Feiden (2021), cujo objetivo foi utilizar funções de pertinência fuzzy e o método AHP na análise de fragilidade ambiental de uma bacia hidrográfica no Sul do Brasil, realizando a comparação entre três formas de ponderação dos elementos do mapa de maior peso, para apresentar a importância da utilização dos conjuntos fuzzy na representação da variação de características ambientais e verificar sua influência no mapa de fragilidade final (Lira; Francisco; Feiden, 2021).

Em relação à conservação ambiental, Ribeiro *et al.* (2023) aplicaram a lógica fuzzy e o método AHP para realizar uma análise estratégica da paisagem para determinar o potencial de restauração ativa na Bacia do Rio Paraíba do Sul, na Mata Atlântica no sudeste do estado de São Paulo, por meio da comparação de dois métodos de análise multicritério (Ribeiro *et al.*, 2023).

No campo da gestão ambiental, Silva Júnior (2015) conduziu um estudo de revisão que oferece uma visão abrangente do uso da lógica fuzzy e do método AHP no zoneamento de áreas suscetíveis a deslizamentos. Em sua conclusão, o autor destaca que essa abordagem tem se mostrado eficaz na integração de diversos dados ambientais, lidando com as incertezas inerentes à participação e dinâmica de cada componente ambiental e o seu emprego é primordial para o planejamento e gestão eficaz de deslizamentos (Silva Júnior, 2015).

4. METODOLOGIA

Esta seção, inicialmente, apresenta as características gerais da área de estudo desta pesquisa (tópico 4.1). Em seguida, é exposta a metodologia deste trabalho, que está estruturada em duas fases. A primeira fase (tópico 4.2) consistiu na seleção dos temas e critérios metodológicos a partir de uma revisão bibliográfica sistemática, a serem aplicados na segunda fase (tópico 4.3), que diz respeito à elaboração de mapas de fragilidades ambientais e hídricas das sub-bacias hidrográficas no município de Lorena, pelo método tradicional da álgebra de mapas, com a sobreposição por média aritmética e pelo método de sobreposição ponderada com funções de pertinência fuzzy e método AHP.

4.1 Área de estudo

A área de estudo deste trabalho abrange as sub-bacias hidrográficas do município de Lorena, localizado no Estado de São Paulo. Esse município integra a Região Metropolitana do Vale do Paraíba e a Microrregião de Guaratinguetá, fazendo divisa com os municípios de Piquete a noroeste e norte, Cachoeira Paulista a nordeste, Canas entre Lorena e Cachoeira Paulista, Silveiras a leste, Cunha a sul e Guaratinguetá a oeste. Possui uma área territorial de 414,160 km² com uma população de 84.855 habitantes (IBGE, 2022), cuja sede localiza-se - 22,74 de latitude e -45,12 de longitude (IBGE, 2021).

Em nível de bacia hidrográfica, Lorena insere-se na Bacia do Rio Paraíba do Sul, que abrange os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais. Na porção paulista, Lorena é um dos 34 municípios com sede na Unidade de Gerenciamento Integrado de Recursos Hídricos 02 (UGRHI 02), com uma área de drenagem de 14.189,60 km². A UGRHI 02 é uma das 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (Regea, 2021), conforme observado na Figura 4.1.

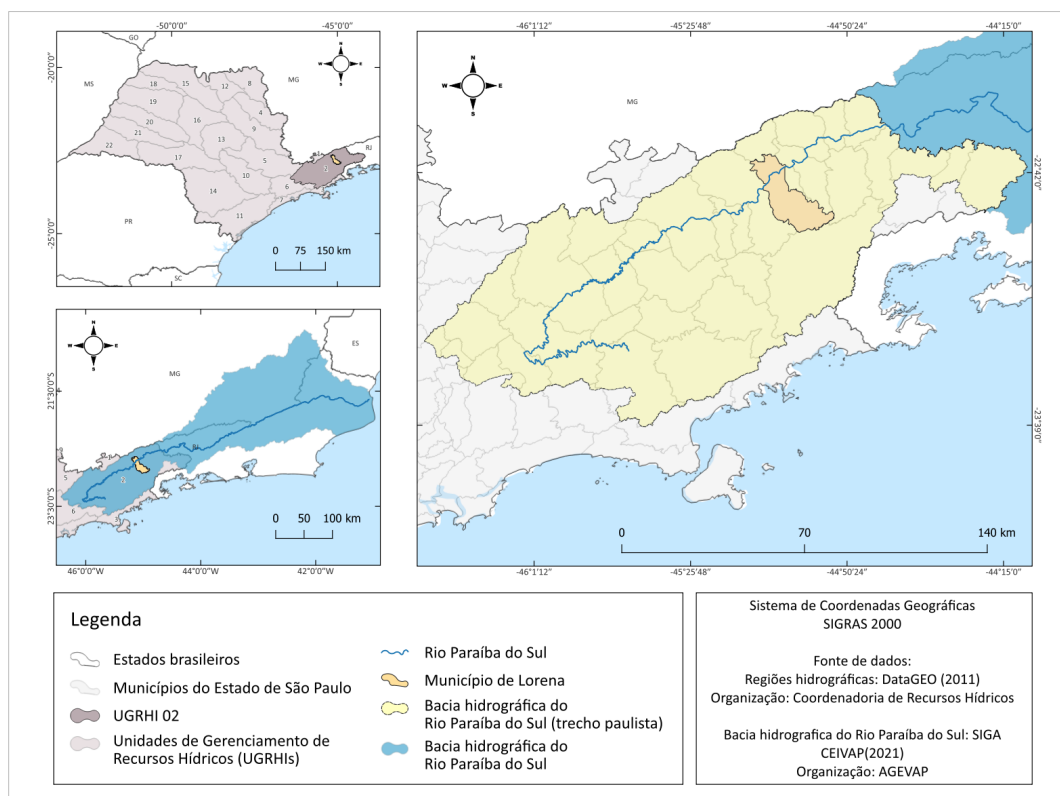


Figura 4.1 – Localização da bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul (trecho paulista) na UGRHI 02 do Estado de São Paulo

De modo mais localizado, com base na delimitação hidrográfica do município de Lorena, constata-se a existência de 15 sub-bacias (Figura 4.2), abrangendo integralmente ou parcialmente o território municipal (Figura 4.3), cujas áreas são apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Área das sub-bacia hidrográficas no município de Lorena

Nº da bacia	1*	2	3*	4*	5	6*	7*	8	9	10*	11*	12*	13	14*	15*
Área (km²)	2,51	11,45	22,67	23,77	7,29	4,72	13,71	6,12	81,86	42,21	5,08	55,17	101,9	9,97	14,23

* área parcial da sub-bacia localizada em Lorena

De acordo com o Plano de Bacias da UGRHI 02, elaborado para o período de 2016 a 2027, a sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Taboão (sub-bacia 9), localizado em Lorena, e um dos afluentes do Rio Paraíba do Sul, foi considerada prioritária para proteção, conservação e recuperação da biodiversidade e dos recursos hídricos, considerando aspectos como: caracterização das sub-bacias como áreas de mananciais, aceleração intensa do processo erosivo, assoreamento expressivo de cursos d'água, eventos frequentes de inundação e conflitos relacionados ao uso da água (Regea, 2016).

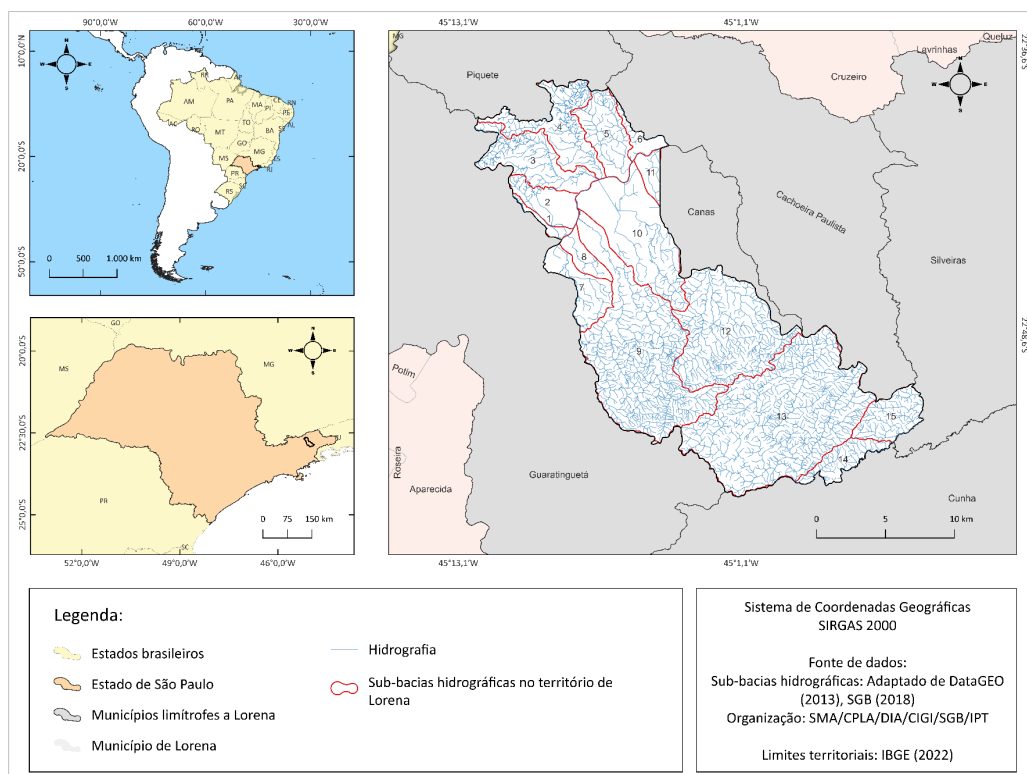


Figura 4.2 – Sub-bacias hidrográficas no município de Lorena

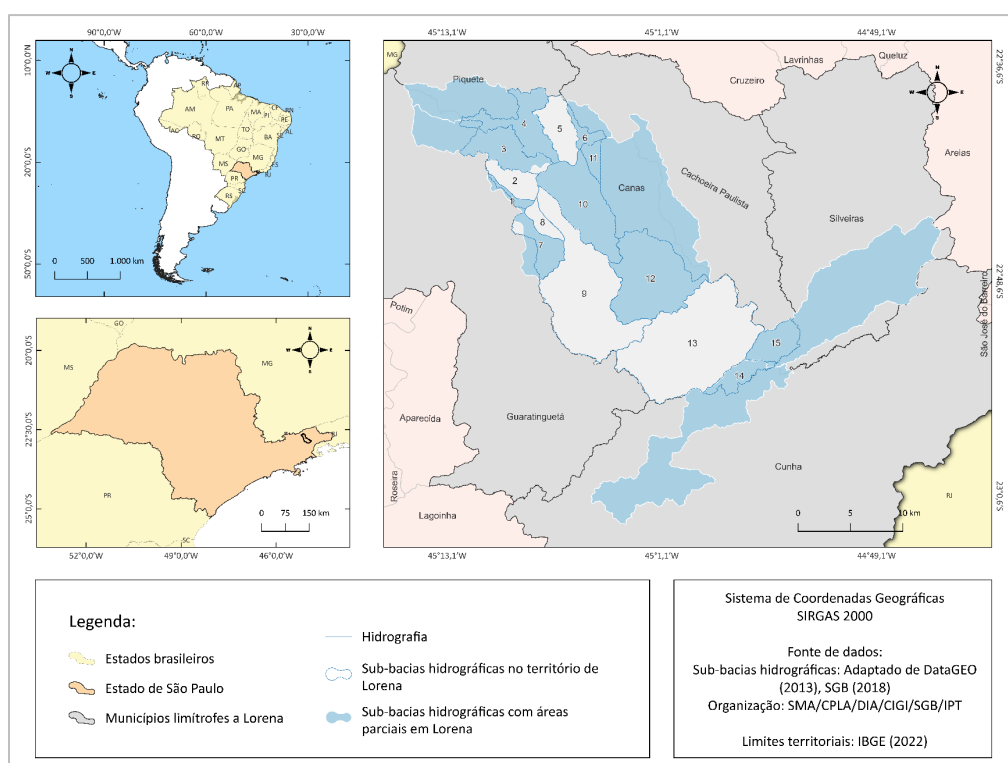


Figura 4.3 – Sub-bacias hidrográficas com áreas parciais no município de Lorena

Durante o período colonial, Lorena desempenhou um papel estratégico na rota do ouro e no desenvolvimento comercial da região. Sua povoação teve início no local conhecido como "Porto de Guaypacaré", nome de origem tupi que significa "braço" ou "seio da Lagoa Torta"

(Pedrosa, 2007). Na época, a paisagem urbana do município era fortemente marcada pelo rio Paraíba do Sul, que passava próximo à Igreja Matriz (Figura 4.4), dividindo-se em dois braços e formando uma ilha, sendo que esse trecho do rio apresentava condições naturais favoráveis à travessia, o que tornou a região um ponto estratégico para o transporte e o comércio, impulsionando seu crescimento ao longo dos anos (Evangelista, 1963).



Figura 4.4 – Rio Paraíba do Sul próximo ao largo da Matriz de Lorena no final do século XIX
Fonte: D'Elboux (2006)

As atividades desenvolvidas na bacia do rio Paraíba do Sul e, consequentemente, em Lorena sempre estiveram relacionadas com a economia do Brasil, passando por vários ciclos econômicos, como: cana-de-açúcar no século XVII, mineração e café entre os séculos XVIII e XIX e, posteriormente, uso agropecuário (Avellar, 2015). No setor agrícola, após a decadência do café, uma alternativa parcial foi a rizicultura que transformou em espaço econômico a sua área de várzea (Amaral, 2016).

Apesar das boas características dos terrenos de várzeas e da disponibilidade hídrica favorável, as cheias do rio Paraíba do Sul causavam inundações prolongadas, dificultando seu aproveitamento e, com intuito de enfrentar esse problema, o governo do Estado de São Paulo, por meio do seu Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) elaborou, na década de 1950, um projeto de retificação do rio, com cortes de meandros, construção de diques e canais, visando reduzir os impactos das enchentes (Paes Junior; Simões, 2006). Em Lorena, no âmbito do referido projeto, foram implantados diques e *polders* para auxiliar na minimização das enchentes e encharcamento excessivo das terras (ICMBio, 2016). Atualmente, os principais usos dessa bacia são voltados para abastecimento, irrigação, geração de energia hidrelétrica e diluição de efluentes (PROFILL, 2021).

Ao longo do tempo, o crescimento populacional e uso do solo de forma inadequada, aumentaram as pressões ambientais, causando problemas nas bacias hidrográficas do município. Vieira (2020), por exemplo, identificou que, das 1004 nascentes do município, 56,27% encontram-se degradadas com o uso do solo predominante sendo a pastagem, 23,41% encontram-se preservadas e 20,32% encontram-se em estado de perturbação. Situação semelhante foi constatada por Bargos, Lago e Ferraz (2017) na microbacia do Ribeirão dos Passos, onde a pastagem também se destaca como atividade predominante nas APPs, apontando ainda que grande parte dessas áreas apresenta uso e ocupação do solo em desacordo com o que determina a legislação ambiental.

Entre os principais problemas presentes nas sub-bacias em Lorena, destacam-se a ocupação irregular e desordenada das margens dos cursos d'água, como observado no estudo de Nunes (2017) sobre o Ribeirão Mandi; o descarte inadequado de resíduos sólidos em APPs (Líder Engenharia, 2024); o lançamento de efluentes (ICMBio, 2016; Consórcio Engecorps-Maubertec, 2022); além da ocorrência de inundações e alagamentos (IPT, 2015).

4.2 Seleção de temas

Esta etapa consistiu na aplicação da revisão bibliográfica sistemática para identificar, coletar, analisar e sintetizar estudos científicos relacionados à aplicação do método AHP e da lógica fuzzy como abordagens de ponderação para identificar e produzir mapas das fragilidades ambientais em bacias e sub-bacias hidrográficas.

A condução desse tipo de revisão segue um protocolo metodológico específico para trazer lógica e estrutura a documentos, julgando sua eficácia e relevância (Jones; Evans, 2000). Neste caso, utilizou-se o protocolo da *Collaboration for Environmental Evidence* (CEE) (Pullin *et al.*, 2022), seguindo os passos de: formulação da pergunta de pesquisa, localização e seleção de estudos, avaliação da qualidade dos estudos, coleta de dados, análise e síntese dos resultados.

A pergunta de pesquisa foi formulada seguindo a estratégia SDMO (*Type Studies, Types of Data, Types of Methods e Outcome*) (Quadro 4.1), que busca definir os tipos de estudos relevantes (S), descrever as informações a serem coletadas e analisadas (D), detalhar as abordagens ou métodos específicos utilizados (M) e identificar os resultados específicos a serem analisados na revisão (O) (Munn *et al.*, 2018). Assim, a pergunta de pesquisa formulada foi: “Quais temas ambientais estão sendo consideradas na produção de mapas de fragilidades ambientais de bacias e sub-bacias hidrográficas utilizando métodos de análise multicritério

AHP e lógica fuzzy, com o propósito de apoiar processos de tomada de decisão, planejamento, zoneamento ou conservação ambiental?”.

Quadro 4.1 – Componentes da pergunta de pesquisa da revisão sistemática baseadas na abordagem SDMO

Tipo de estudo (S)	Tipo de dados (D)	Métodos (M)	Resultados (O)
Artigos científicos	Assuntos e temas ambientais abordados em bacias ou sub-bacias hidrográficas utilizados nos artigos científicos.	Critérios metodológicos de aplicação do método AHP e/ou lógica fuzzy no processo de ponderação dos temas ambientais	Elaboração de mapa de fragilidades ambientais e hídricas para o planejamento, zoneamento e/ou conservação ambiental

Após a formulação da pergunta, as demais etapas do processo de revisão sistemática foram desenvolvidas conforme Figura 4.5. Finalizada a avaliação da qualidade dos artigos, foi realizada a coleta de dados, visando extrair os assuntos abordados, os temas ambientais utilizados, os métodos aplicados e a existência ou não de mapas. Desse modo, foram analisados 16 artigos científicos, dos quais foram identificadas 88 ocorrências de temas ambientais, considerando que alguns temas se repetiram entre os estudos. A partir dessa análise, foi possível consolidar 18 temas distintos, sendo os mais recorrentes: declividade, uso do solo, pedologia, pluviometria e geologia (Figura 4.6).

A partir dos temas identificados, buscou-se avaliar sua aplicabilidade ao contexto específico da área de estudo e aos objetivos do presente trabalho. Nesse processo, optou-se pela exclusão do tema geologia e pela inclusão da variável área de preservação permanente (APP), mesmo esta última não tendo sido recorrente na literatura analisada. A decisão de excluir a geologia se deve ao fato de que, embora essa variável seja relevante para estudos voltados à recarga de aquíferos, formação de nascentes e qualidade das águas subterrâneas, o presente estudo possui foco direcionado à fragilidade ambiental e hídrica, especialmente sob a perspectiva da conservação de recursos hídricos em superfície e da proteção de áreas vulneráveis a processos erosivos. Assim, como o enfoque não contempla aspectos geológicos profundos ou hidrogeológicos, essa variável foi considerada menos pertinente à abordagem adotada. Por outro lado, a inclusão das APPs se justifica pela sua importância direta na proteção dos cursos d'água, na manutenção da qualidade da água superficial, no controle da erosão e na prestação de serviços ecossistêmicos fundamentais, como regulação hídrica e estabilidade das margens fluviais. A vegetação presente nessas áreas, com destaque para as matas ciliares, atua como uma barreira natural contra a degradação do solo e a contaminação hídrica, sendo, portanto, essencial em um estudo que busca mapear fragilidades com foco na conservação

hídrica. Dessa forma, os temas seleccionados para compor a análise final foram: declividade, pedologia, uso e cobertura do solo, pluviometria e APP.

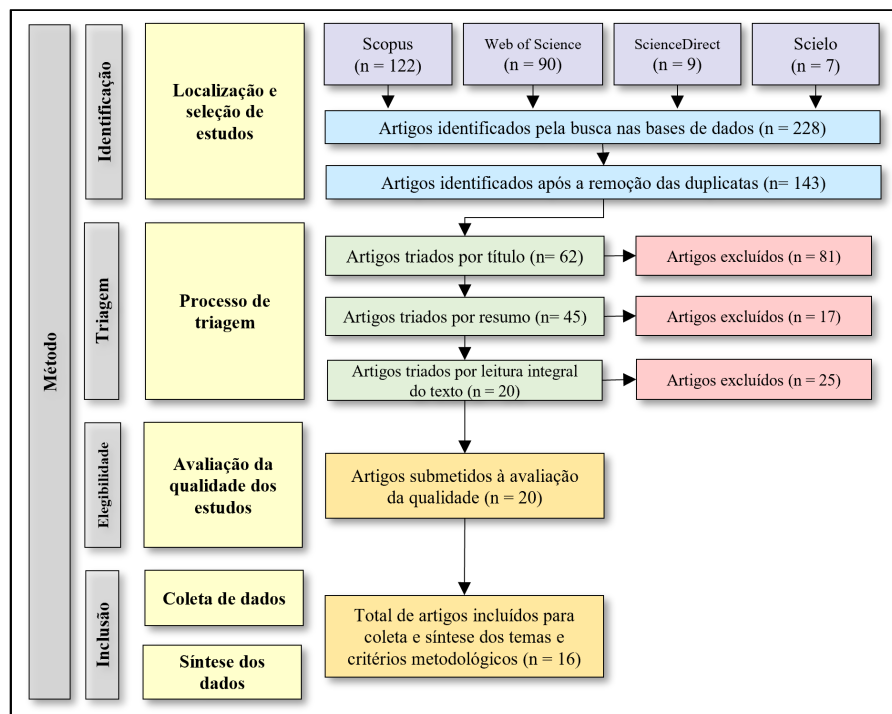


Figura 4.5 – Etapas do processo de revisão sistemática para seleção de temas ambientais e critérios metodológicos para o mapa de fragilidades

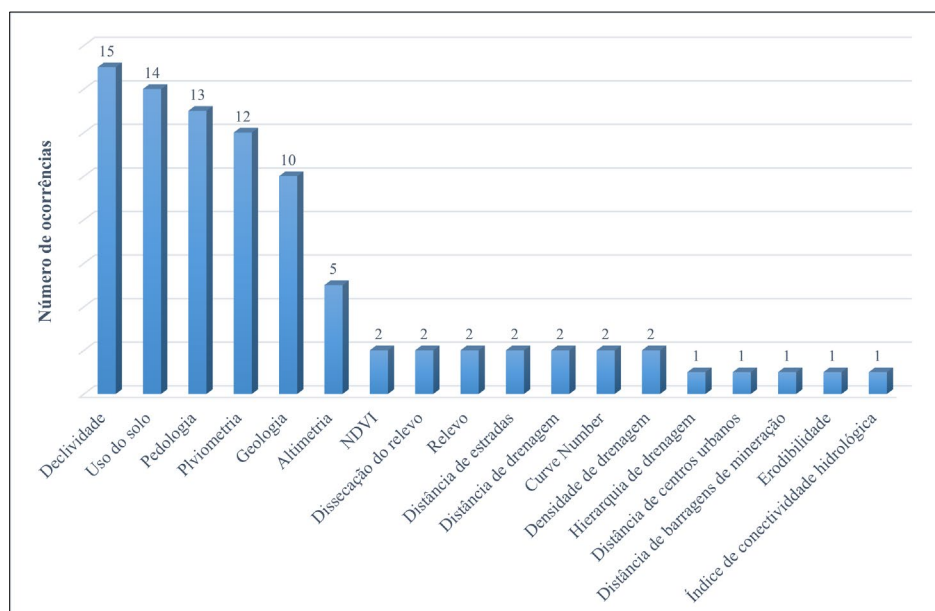


Figura 4.6 – Distribuição da ocorrência dos temas utilizados nos artigos científicos analisados

Em relação aos critérios metodológicos empregados nos artigos analisados (Figura 4.7), foi constatado que o método AHP foi empregado em todos os artigos analisados. O método AHP em conjunto com a lógica fuzzy foi utilizado em 9 artigos (56%). Também foi observada

a utilização de outros dois métodos: *Weighted linear combination* e redes neurais artificiais. Ainda, dentre os assuntos abordados nos artigos analisados, a fragilidade ambiental é a mais incidente, seguida por estudos sobre a suscetibilidade à erosão e conservação ambiental (Figura 4.8).

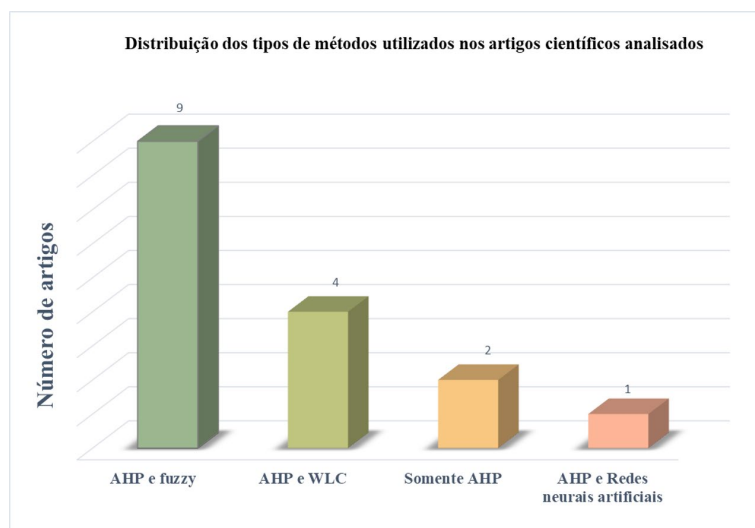


Figura 4.7 – Distribuição dos tipos de métodos empregados nos artigos científicos analisados

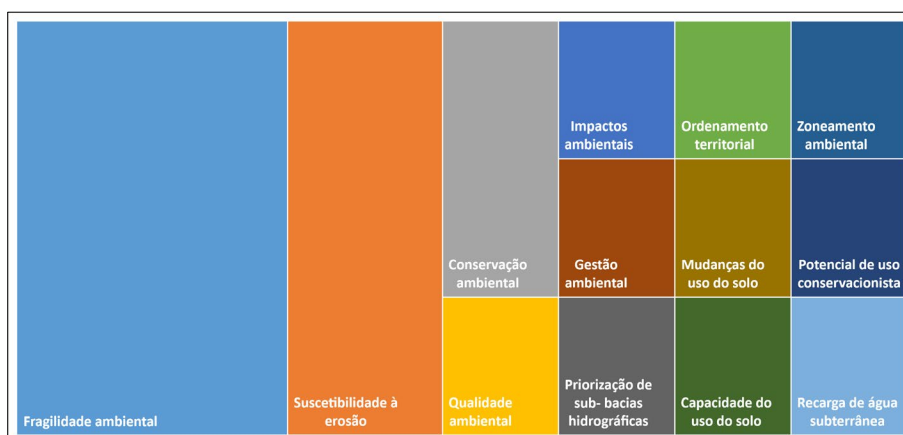


Figura 4.8 – Assuntos mais abordados nos artigos científicos analisados

Desse modo, por meio desta revisão bibliográfica sistemática, foi possível verificar que o método AHP e a lógica fuzzy têm sido empregados substancialmente em estudos que visam avaliar e determinar a fragilidade ambiental de bacias hidrográficas, de modo que mapas sejam elaborados e sirvam como instrumentos para finalidades como conservação e zoneamento ambiental, prevenção à erosão e ordenamento territorial. Assim, justificam a escolha dos seus usos neste trabalho.

4.3 Elaboração dos mapas de fragilidade ambiental

De modo a atender aos objetivos e comprovar a hipótese formulada para este trabalho, é descrita neste tópico a metodologia empregada para elaboração do mapa de fragilidade ambiental e hídrica das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena/SP, pelo método tradicional da álgebra de mapas, com a sobreposição por média aritmética e pelo método de sobreposição ponderada aplicando as funções de pertinência fuzzy e AHP. Para isso, foram adotadas as etapas resumidas na Figura 4.9.

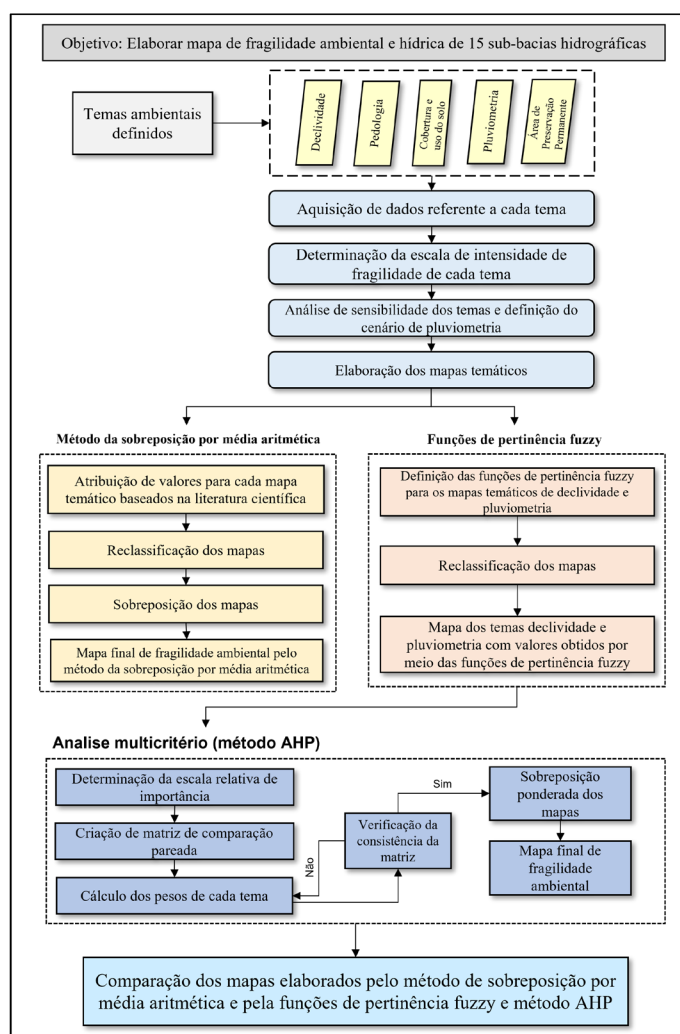


Figura 4.9 – Fluxograma do tratamento dos dados, elaboração e comparação dos mapas de fragilidade ambiental

4.3.1 Aquisição de dados dos temas ambientais

Esta etapa iniciou-se pela obtenção dos dados relacionados aos temas definidos na etapa de revisão bibliográfica sistemática, os quais são disponibilizados gratuitamente por instituições públicas, cujas fontes de dados, escalas e formas de acesso encontram-se no Quadro 4.2. Os dados foram organizados em planos de informações, representados por mapas utilizando o

software *Quantum GIS*, versão 3.34.11 Prizren, em que puderam ser observadas variadas características do município de Lorena, bem como de suas sub-bacias hidrográficas.

Quadro 4.2 – Relação dos temas ambientais e respectivas fontes de dados e escalas gráficas utilizadas

Tema	Fonte	Escala	Detalhamento da elaboração	Link de acesso à base de dados
Declividade	TOPODATA	1:250.000	Os mapas de declividade foram elaborados a partir do Modelo Digital de Elevação do projeto TOPODATA com dados provenientes da <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM), refinados para todo o território brasileiro com resolução espacial de 1 segundo de arco, equivalente a aproximadamente 30 metros (Valeriano; Rossetti, 2011).	https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Y1e0c2VU4waXo-Kzn0RBONZG9NgSYas&ll=-22.759212320198802%2C-44.877304002701905&z=10
Pedologia	Datageo - Secretaria de Infraestrutura, Logística e Meio Ambiente (SEMIL)	1:50.000	Os dados cartográficos dos tipos de solo utilizados são provenientes do trabalho de mapeamento pedológico do Estado de São Paulo, elaborado por Rossi (2017). Foram consideradas as classes do segundo nível categórico para realizar a reclassificação e a identificação dos tipos de solo.	https://www.infraestrutura.ameioambiente.sp.gov.br/institutoflorestal/2017/09/mapa-pedologico-do-estado-de-sao-paulo-revisado-e-ampliado/
Cobertura e uso do solo	Mapbiomas	1:250.000	Para elaboração do mapa de cobertura e uso do solo foram utilizados os produtos disponibilizados pelo MapBiomas, coleção 7, formato matricial e resolução espacial de cerca de 10 metros.	https://brasil.mapbiomas.org/produtos/
Pluviometria	DAEE	-	Foram obtidos dados do banco de dados hidrológicos disponibilizados pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE), medidos por pluviômetros convencionais e pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), registrados por meio de pluviômetros automáticos.	https://hidrologia.spagua.s.sp.gov.br/Default.aspx
	CEMADEN	-		http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/#
Área de preservação permanente	FBDS	1:25.000	Para elaboração do mapa das áreas de preservação permanente foram utilizados os produtos disponibilizados pela Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável (FBDS), formato vetorial.	https://geo.fbds.org.br/

A utilização dos produtos TOPODATA neste trabalho se justifica por sua qualidade e acesso gratuito, representando uma fonte confiável de dados geomorfométricos refinados a partir do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Com resolução espacial aprimorada de 90 m para 30 m, os dados são adaptados para todo o território brasileiro, tornando-os especialmente adequados para estudos ambientais e hidrológicos. Além disso, as variáveis disponibilizadas, como declividade, orientação de vertentes e curvaturas, bem como as

derivações para identificação de talvegues e divisores de água, oferecem subsídios para a análise de feições de drenagem e a produção de mapas temáticos (Valeriano, 2008), alinhando-se aos objetivos deste estudo.

Com relação à pluviometria, foram analisados dados de pluviômetros localizados dentro e fora do território lorenense (Figura 4.10), cujas informações sobre o código, coordenadas e escala temporal podem ser consultadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados dos postos pluviométricos no município de Lorena e entorno

Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE)						
Código	Nome	Altitude (m)	Latitude	Longitude	Período	Município
D2-032	Fazenda Serro Alto	800	22° 49' 00"	45° 00' 00"	1957-1972	Lorena
D2-034	Fazenda Três Barras	640	22° 51' 00"	45° 04' 00"	1957-1994	Lorena
D2-035	Lorena	540	22° 44' 00"	45° 05' 00"	1957-2023	Lorena
D2-062	Haras Mondesir	540	22° 46' 00"	45° 07' 00"	1957-1996	Lorena
D2-081	Polder 1	520	22° 43' 00"	45° 05' 00"	1966–1971	Lorena
D2-097	Fazenda Cerro Alto	780	22° 48' 00"	45° 00' 00"	1973-2000	Lorena
D2-008	Fazenda São José	560	22° 42' 00"	45° 08' 00"	1957-1973	Lorena
D2-022	Rocinha	1.000	22° 54' 00'	45° 05' 00"	1964-1994	Guaratinguetá
D2-017	Fazenda Vitória	540	22° 50' 00"	45° 10' 00"	1957-1971	Guaratinguetá
D2-015	Colônia do Piagui	540	22° 44' 00"	45° 12' 00"	1957-1984	Guaratinguetá
D2-037	Fazenda Santo Antônio	550	22° 45' 00"	45° 03' 00"	1957-2000	Canas
D1-025	Vargem do Tanque	880	22° 56' 00"	44° 55' 00"	1972-2000	Cunha
D1-023	Xadrez	1.090	22° 49' 00"	44° 52' 00"	1969-1995	Silveiras
Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)						
352720701A	Polícia Militar	-	-22,73998	-45,127201	2016-2024	Lorena
352720702A	Novo Horizonte	-	-22,751897	-45,092557	2016-2024	Lorena
352720721H	Rio Mandi	-	-22,735031	-45,106828	2016-2024	Lorena

Fonte: Base de dados hidrológicos (DAEE, 2024; CEMADEN, 2024).

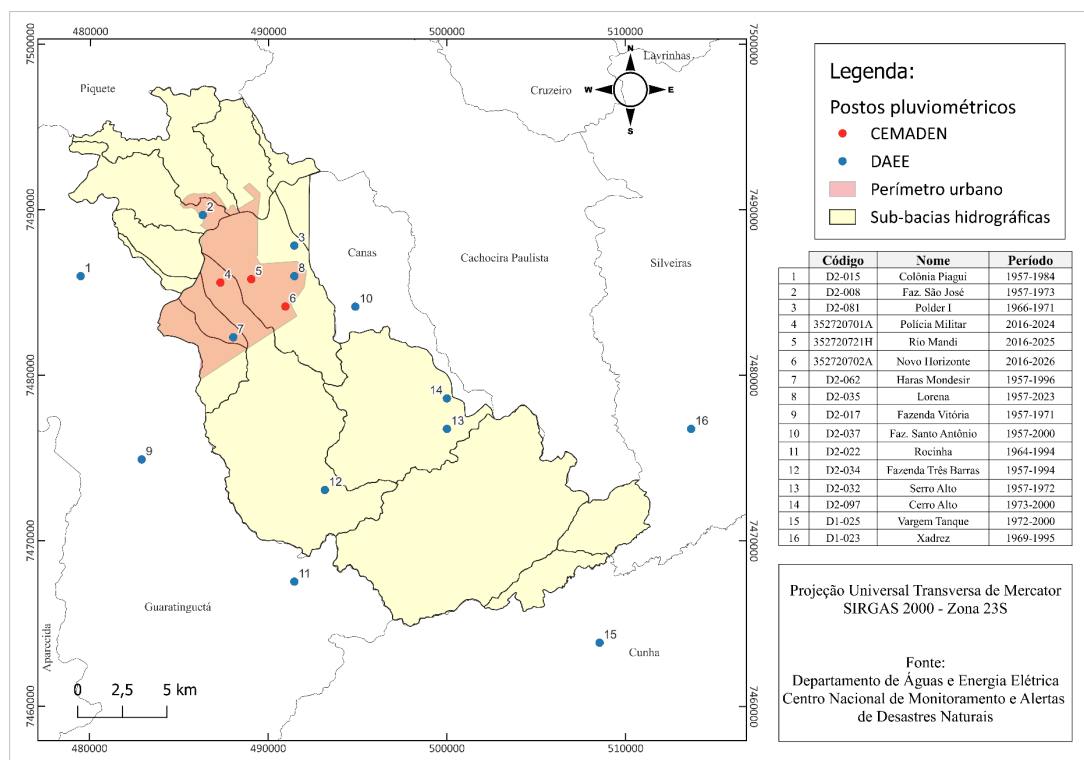


Figura 4.10 – Localização dos postos pluviométricos utilizados

Foram realizados tratamentos nos dados pluviométricos, considerando uma série histórica de 67 anos (1957-2024), para identificar e corrigir eventuais falhas, de modo a obter dados consistentes para a análise de dupla massa. A análise pelo método da dupla massa é uma técnica desenvolvida pela *Geological Survey* (Agência dos Estados Unidos da América) comumente adotada no Brasil para verificar a consistência e homogeneidade dos dados pluviométricos ao longo do tempo (Tucci, 2015). Primeiramente, utilizou-se um código em linguagem Python para verificar a completude dos dados dos postos pluviométricos (Apêndice A). Em seguida, foi elaborado um gráfico de dupla massa para examinar a relação entre os dados ao longo do tempo. A análise revelou inconsistências nos dados dos postos Fazenda Serro Alto, Fazenda Vitória, Fazenda Cerro Alto, Fazenda Santo Antônio, Vargem Tanque e Rio Mandi, os quais foram desconsiderados. Assim, foram utilizados apenas os dados dos postos Lorena, Haras Mondesir, Fazenda Três Barras, Fazenda São José, Polícia Militar, Novo Horizonte, Colônia Piagui, Xadrez e Rocinha.

Posteriormente, as falhas nos dados dos postos selecionados foram preenchidas por meio de regressão linear, e a consistência foi novamente verificada com a elaboração de um novo gráfico de dupla massa. Com os dados ajustados, foi realizada a interpolação utilizando a técnica de Inverso da Distância Ponderada (*Inverse Distance Weighting – IDW*) com a ferramenta homônima no *software* QGIS.

Para este estudo, foram avaliados dois cenários distintos de pluviometria com o objetivo de compreender a fragilidade ambiental e hídrica sob diferentes condições climáticas. O primeiro cenário representa uma situação de alta intensidade pluviométrica, sendo definido a partir da maior precipitação diária registrada ao longo da série histórica de 67 anos (1957–2023). Esse valor foi identificado por meio da análise dos dados diários de precipitação, selecionando-se o maior volume de chuva ocorrido em um único dia durante todo o período analisado, de modo a simular um evento extremo.

O segundo cenário refere-se à escassez hídrica e foi definido a partir da precipitação média mensal calculada para cada um dos 12 meses do ano, considerando a série histórica. Com base nesses valores médios mensais, identificou-se o mês com o menor volume médio de precipitação ao longo da série, o qual foi adotado como referência para representar uma condição crítica de baixa disponibilidade hídrica. Os dados foram organizados com auxílio do código em linguagem C# que pode ser consultado no Apêndice A. A comparação entre esses dois cenários possibilitou a avaliação da resposta ambiental em situações de excesso e escassez de água, contribuindo para a definição de áreas prioritárias à conservação dos recursos hídricos. A comparação destes cenários e a definição de qual foi utilizado são apresentadas no item 4.3.3.

Por fim, para padronizar os dados ambientais e garantir sua compatibilidade espacial, todas as variáveis foram reprojadas para o datum SIRGAS 2000, no sistema de referência de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 23, zona sul. Essa padronização permitiu a elaboração dos mapas dos temas ambientais de cada sub-bacia hidrográfica.

4.3.2 Determinação da escala de intensidade da fragilidade dos temas

A etapa seguinte da pesquisa consistiu na definição dos níveis de intensidade de fragilidade ambiental e a valoração dos diferentes graus dentro dos diferentes temas. Para definir a escala de intensidade de fragilidade, foram usados cinco graus de fragilidade (Tabela 4.3). Quanto mais próximos do valor 0 (zero) menor o grau de fragilidade e quanto mais próximos de 1 (um) maior o grau de fragilidade. Essa definição dos graus foi baseada principalmente nas abordagens de Ross (1994), Spörl (2007) e Lira, Francisco e Feiden (2021).

Tabela 4.3 – Graus de intensidade da fragilidade empregados

Grau de fragilidade	Valores
Muito baixa	0,2
Baixa	0,4
Média	0,6
Alta	0,8
Muito alta	1,0

Em seguida, foram atribuídos valores para cada grau de fragilidade em cada um dos temas das variáveis ambientais (Tabela 4.4). Os temas ambientais foram classificados considerando as características do município de Lorena conforme os dados obtidos (tópico 4.3.1) e os mapas iniciais de cada tema apresentados no tópico 5.1. A maioria dos valores ou intervalos atribuídos teve por base a literatura, com exceção dos temas pluviometria e APP, sendo este último apresentado em separado (Tabela 4.5) devido às suas especificidades.

A definição dos graus de fragilidade para o tema pluviometria foi realizada a partir dos valores mínimo e máximo obtidos pela interpolação dos dados. Nesse contexto, no cenário de alta intensidade pluviométrica, os maiores valores representaram os maiores graus de fragilidade (alta e muito alta) ao passo que os menores valores foram associados aos graus de fragilidade mais baixos (muito baixa e baixa). Já no cenário de escassez hídrica, os menores valores de precipitação foram associados aos graus mais elevados de fragilidade (alta e muito alta), enquanto os maiores valores de precipitação foram atribuídos aos menores graus de fragilidade (baixa e muito baixa). Os valores utilizados consideraram exclusivamente os dados pluviométricos locais, diferentemente de outros temas, cujos parâmetros de classificação foram baseados em referências da literatura, o que não foi identificado para o tema pluviometria.

Para a elaboração do mapa de fragilidade das Áreas de Preservação Permanente (APPs), utilizou-se como base o mapa de cobertura e uso do solo e o mapa com a delimitação das APPs segundo a legislação. As classes de uso e cobertura receberam valores distintos de fragilidade, que também foram diferenciados conforme sua localização dentro ou fora das APPs, ou seja, considerando-se a presença ou ausência da delimitação dessas áreas. Para as classes situadas no interior da delimitação das APPs, foram atribuídos valores mais elevados de fragilidade, uma vez que tais áreas são reconhecidas, neste estudo, como ecologicamente sensíveis e que, idealmente, deveriam estar protegidas por cobertura vegetal, conforme estabelecido pela Lei Federal 12.651/2012. Por outro lado, as classes localizadas fora de delimitação das APPs receberam valores inferiores de fragilidade, conforme demonstrado na

Para ilustrar essa classificação, apresentam-se dois exemplos:

- Uma região sem a delimitação legal de APP, cuja cobertura do solo seja floresta, apresenta um grau de fragilidade muito baixo (0,2), pois a vegetação contribui para a proteção ambiental em uma área que não recebeu proteção legal de APP (ou seja, menos frágil que uma área de APP).
- Por outro lado, uma região com a delimitação legal de APP, mas classificada como área urbana ou afloramento rochoso, possui um grau de fragilidade muito alto (1,0), devido

à ausência de vegetação em uma área que deveria estar protegida e ao maior potencial de degradação ambiental.

Tabela 4.4 – Temas ambientais e respectivos valores ou intervalos associados aos graus de fragilidade

Critério	Classes	Grau de fragilidade	Valores	Abordagem
Declividade (%)	0 – 3	Muito baixa	0,2	Baseado em Lira, Francisco e Feiden (2021) e Ross (1994)
	3 - 8	Baixa	0,4	
	8 - 20	Média	0,6	
	20 – 45	Alta	0,8	
	Acima de 45	Muito Alta	1,0	
Pedologia	Latossolo Vermelho-Amarelo	Muito baixa	0,2	Adaptado Lira, Francisco e Feiden (2021), Crepani <i>et al.</i> (2011) e Spörl (2007)
	Latossolo amarelo	Baixa	0,4	
	Argissolo vermelho-amarelo	Média	0,6	
	Cambissolo háplico	Alta	0,8	
	Gleissolo Melânico / Área urbanizada	Muito Alta	1,0	
Cobertura e uso do solo	Formação florestal / Campo alagado / Rios e lagos	Muito baixa	0,2	Adaptado de Lira, Francisco e Feiden (2021), Crepani <i>et al.</i> (2011) e Spörl (2007)
	Silvicultura	Baixa	0,4	
	Pastagem / Mosaico de usos	Média	0,6	
	Afloramento rochoso	Alta	0,8	
	Área urbanizada / Outras áreas não vegetadas	Muito Alta	1,0	
Pluviometria (mm) (Precipitação máxima diária)	98,1 - 110,9	Muito baixa	0,2	Desenvolvida pelo presente trabalho
	110,9 - 123,6	Baixa	0,4	
	123,6 - 136,4	Média	0,6	
	136,4 - 149,1	Alta	0,8	
	149,1 - 161,9	Muito Alta	1,0	
Pluviometria (mm) (Precipitação média do mês mais seco)	65,0 – 71,3	Muito baixa	0,2	Desenvolvida pelo presente trabalho
	59,0 – 65,0	Baixa	0,4	
	48,0 – 59,0	Média	0,6	
	37,0 – 48,0	Alta	0,8	
	25,6 – 37,0	Muito Alta	1,0	

Para aplicação dos valores nos mapas de cada tema ambiental foi realizada uma reclassificação utilizando o algoritmo *r.recode* no *software* QGIS dos dados *raster* (declividade, área de preservação permanente e pluviometria) e a inserção dos valores nas tabelas de atributos dos dados vetoriais (cobertura e uso do solo e pedologia), que posteriormente foram transformados para o formato matricial.

Tabela 4.5 – Graus de fragilidade do tema APP

APP	Classes de cobertura e uso do solo	Grau de fragilidade	Valores	Abordagem
Ausente	Florestas/Campos alagados/Rios/Silvicultura	Muito baixa	0,2	Desenvolvida pelo presente trabalho
Ausente	Pastagem/Mosaico	Baixa	0,4	
Ausente	Área urbana/Aloramento rochoso/outras áreas não vegetadas	Média	0,6	
Presente	Florestas/Campos alagados	Média	0,6	
Presente	Pastagem/Mosaico	Alta	0,8	
Presente	Área urbana/Aloramento rochoso/outras áreas não vegetadas	Muito alta	1,0	

4.3.3 Análise de sensibilidade dos temas e definição do cenário de pluviometria

Para avaliar o comportamento dos temas ambientais selecionados nos dois cenários propostos (alta intensidade pluviométrica ou escassez hídrica) foi realizada uma análise de sensibilidade. Nessa análise, foram testados diferentes parâmetros para verificar e comparar a distribuição das áreas em cada classe de grau de fragilidade e avaliar se os diferentes temas se demonstravam sensíveis e, portanto, relevantes para o trabalho. Os resultados foram comparados a partir de três abordagens: (1) sobreposição dos mapas temáticos pelo método tradicional (média aritmética), (2) sobreposição dos mapas temáticos atribuindo, alternadamente, um peso maior a cada variável, e (3) sobreposição dos mapas temáticos removendo, alternadamente, cada variável. Observou-se que todos os temas apresentaram sensibilidade, incluindo os cenários de precipitação máxima diária e precipitação média do mês mais seco. As discussões acerca da análise de sensibilidade podem ser consultadas no Apêndice B.

Em uma segunda avaliação, para definição do cenário mais representativo (entre alta intensidade pluviométrica e escassez hídrica) e considerando a conservação dos recursos hídricos, foram comparados os mapas de fragilidade ambiental gerados pelo método de álgebra de mapas por média aritmética (método tradicional). Constatou-se que o cenário de escassez hídrica — representado pela precipitação média do mês mais seco — apresentou uma maior

extensão de áreas classificadas nos graus mais elevados de fragilidade, indicando um aumento expressivo da vulnerabilidade ambiental, especialmente em regiões caracterizadas por alta declividade, solos suscetíveis à erosão e uso inadequado do solo. Esse cenário evidenciou um acréscimo significativo nas áreas de fragilidade média e alta, ressaltando que os períodos de seca intensificam a fragilidade ambiental e hídrica, o que possui implicações para a conservação dos recursos hídricos, sobretudo no que tange à sua disponibilidade e sustentabilidade. Dessa forma, a escassez hídrica configura-se como o fator preponderante para a gestão e proteção dos recursos hídricos na área estudada.

Conforme estudo de Masroor *et al.* (2022), cenários de seca prolongados não apenas afetam a disponibilidade hídrica, mas também comprometem a cobertura vegetal, reduzindo a proteção natural do solo e, conseqüentemente, aumentando sua suscetibilidade à erosão. A redução na umidade do solo e na densidade de vegetação durante os eventos de seca contribui para a degradação física do terreno, sobretudo em áreas com relevo acidentado, como observado na sub-bacia do rio Godavari, na Índia (Masroor *et al.*, 2022). Dessa forma, a fragilidade ambiental intensificada em cenários de escassez hídrica está diretamente relacionada à dinâmica entre vegetação, solo e precipitação.

Desse modo, optou-se por utilizar neste estudo o cenário de pluviometria a partir do mês mais seco, pois ele revelou condições mais críticas da área estudada em comparação ao cenário de chuvas intensas. A comparação entre os mapas destes cenários pode ser consultada no Apêndice C.

Vale reforçar que se o foco da análise fosse a fragilidade ambiental associada às áreas urbanas, o cenário de alta intensidade pluviométrica seria um dos mais importantes. Logo, seu descarte ocorreu em função da abordagem deste estudo, não sendo descartada a sua relevância em outras análises.

4.3.4 Elaboração dos mapas de fragilidade ambiental

Foram adotados dois métodos para a elaboração dos mapas de fragilidade ambiental. O primeiro seguiu o método tradicional, utilizando a média aritmética dos cinco temas ambientais. O segundo consistiu na aplicação de funções de pertinência fuzzy às variáveis contínuas, permitindo a atribuição de valores de fragilidade entre 0 e 1 e a adoção de valores de referência da literatura para as variáveis discretas. Posteriormente, a fragilidade ambiental foi calculada por meio de uma média ponderada, na qual os pesos das variáveis foram definidos com base no método AHP.

4.3.4.1 Método tradicional: sobreposição por média aritmética

Nesta etapa, os mapas de cada tema ambiental, já reclassificados conforme os graus de fragilidade foram submetidos à sobreposição por meio do cálculo da média aritmética (Equação 4.1), utilizando a ferramenta “calculadora *raster*” do QGIS. Para realizar esse cálculo, foi necessário converter os mapas de dados vetoriais para o formato matricial.

$$\text{Fragilidade ambiental} = \frac{(\text{declividade}) + (\text{cobertura e uso do solo}) + (\text{APP}) + (\text{pedologia}) + (\text{pluviometria})}{5} \quad (4.1)$$

4.3.4.2 Funções de pertinência fuzzy

Com base nas conceituações apresentadas no subitem 3.3.4, nesta etapa, foram definidas as funções de pertinência para atribuir valores entre 0 e 1 aos mapas dos temas ambientais de dados contínuos – declividade e pluviometria. Esse processo foi realizado por meio da calculadora *raster* do QGIS. Para os temas de variáveis categóricas (APP, pedologia e cobertura e uso do solo), que possuem dados discretos, foram adotados valores fixos baseados na literatura científica, conforme anteriormente descrito.

No mapa de declividade, adotou-se a premissa de que áreas com maiores inclinações apresentam maior potencial para escoamento superficial acelerado, aumentando a velocidade de transporte das águas pluviais e, conseqüentemente, a suscetibilidade à erosão hídrica. Além disso, em terrenos mais íngremes, a capacidade de infiltração da água no solo tende a ser reduzida, o que compromete os processos de recarga do lençol freático e pode afetar negativamente a disponibilidade hídrica subterrânea. Portanto, foram definidas funções de pertinência lineares crescentes para representar o grau de influência da declividade, capturando variações graduais. As funções de pertinência foram definidas por intervalos específicos de inclinação conforme apresentadas na Equação 4.2 e Figura 4.11.

$$f(x) = \begin{cases} 0,0633x + 0,01; & 0 \leq x \leq 3 \\ 0,04x + 0,08; & 3 \leq x \leq 8 \\ 0,0167x + 0,2667; & 8 < x \leq 20 \\ 0,008x + 0,44; & 20 < x \leq 45 \\ 0,0033x + 0,6521; & 45 < x \leq 105,8414 \end{cases} \quad (4.2)$$

tal que x são os elementos do mapa de declividade.

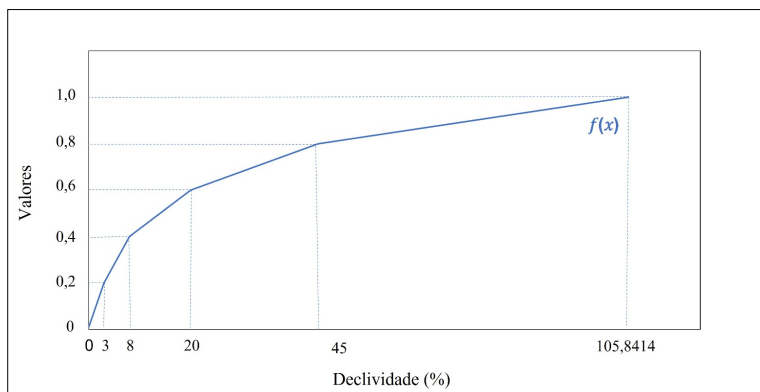


Figura 4.11 – Função $f(x)$ aplicada aos elementos do mapa de declividade.

Cada intervalo de declividade x possui uma função linear específica para calcular o valor da pertinência $f(x)$ com base nos intervalos de declividade estabelecidos pela Embrapa, empregando como declividade máxima o valor mais alto encontrado no grupo das sub-bacias (105,8%). Essas funções são crescentes, refletindo o aumento do impacto da declividade à medida que o terreno se torna mais inclinado. Valores próximos de 0 indicam baixa influência da inclinação sobre os processos analisados; por outro lado, valores próximos de 1 indicam alta influência da inclinação.

Para a pluviometria, foi determinada uma função de pertinência linear decrescente (Equação 4.3) considerando que, quanto menor a precipitação, maior a fragilidade; isto é, os valores baixos de pluviometria associam-se à pertinência alta (próxima de 1) e à medida que a pluviometria aumenta, a pertinência diminui (tendendo a 0 para valores elevados), como demonstrado na Figura 4.12.

$$g(x) = -0,0218x + 1,5655 \quad (4.3)$$

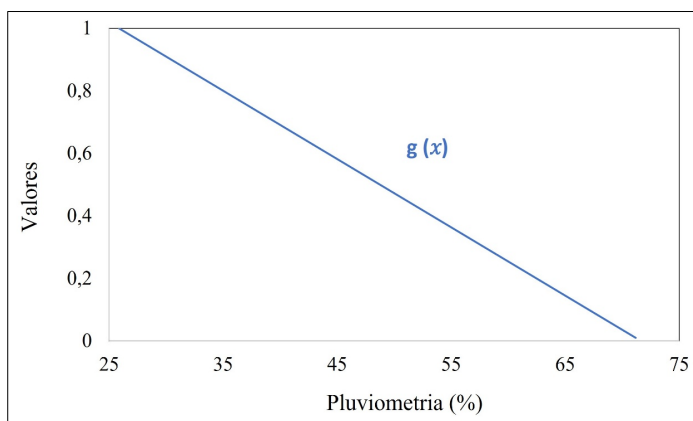


Figura 4.12 - Gráfico da função $g(x)$ para valoração dos elementos do mapa de altitude.

Para calcular os valores dos elementos empregando as funções de pertinência aos mapas, foi utilizada a ferramenta “calculadora *raster*” do QGIS.

4.3.4.3 Método AHP

Após a aplicação das funções de pertinência fuzzy para os devidos temas ambientais, a presente etapa produziu o mapa de fragilidade ambiental a partir dos pesos obtidos pelo método AHP.

A matriz AHP foi calculada a partir da avaliação par a par dos temas ambientais adotando valores da escala de importância relativa desenvolvida por Saaty (1977) (Tabela 4.6). A avaliação foi realizada por um grupo de especialistas selecionados com base em sua formação acadêmica e experiência profissional em áreas diretamente relacionadas ao objeto de estudo. Foram convidados 18 profissionais, com atuação em diferentes localidades nos campos da engenharia (ambiental, agrônômica e cartográfica), geociências, matemática, meio ambiente e recursos hídricos, vinculados tanto a órgãos públicos quanto a instituições de ensino garantindo uma diversidade de perspectivas técnicas e científicas para a consolidação da matriz de decisão. A seleção também levou em conta a produção técnica e científica dos especialistas, bem como sua familiaridade com avaliação ambiental e métodos multicritério.

O contato com os especialistas foi realizado por meio de convite enviado via e-mail, contendo a apresentação dos objetivos da pesquisa e instruções detalhadas para o preenchimento da matriz comparativa, incluída em anexo. Os participantes foram orientados a realizar julgamentos pareados com base na seguinte questão orientadora: “Qual a importância relativa dos temas ambientais para avaliar sua influência na conservação dos recursos hídricos?”. A planilha foi programada para emitir alertas automáticos de consistência: caso o Grau de Inconsistência excedesse o limite de 0,1, era exibida a mensagem “Revise seus julgamentos!”, solicitando a reavaliação das comparações realizadas. Somente quando o índice fosse inferior ou igual a 0,1, a planilha indicaria “Julgamentos consistentes!”, validando a etapa de avaliação pareada dos critérios. Essa estratégia foi adotada para garantir a consistência dos dados coletados e evitar a necessidade de contatos adicionais para correções posteriores.

Dos especialistas convidados, nove responderam e tiveram suas avaliações consideradas já que, conforme alinhamento da planilha, apresentaram consistência. Em seguida, foi realizado o cálculo da média geométrica de cada componente da matriz, resultando nos pesos finais atribuídos a cada tema ambiental.

A consistência das comparações dos avaliadores foi verificada pela razão de consistência (RC), comparando o índice de consistência (IC) da matriz com o índice de

consistência de uma matriz recíproca de ordem n , com elementos não-negativos e randômicos (IR), conforme detalhado no tópico 3.3.3. O objetivo é que o valor de RC seja inferior a 0,1 ou 10%, garantindo assim uma consistência satisfatória e uma fundamentação confiável no julgamento (Saaty, 1990). Após a obtenção dos pesos de cada tema pelo método AHP, os mapas foram reclassificados em ambiente SIG e sobrepostos utilizando a ferramenta “calculadora *raster*” do QGIS, empregando a Equação 4.4 e, por fim, gerando o mapa final de fragilidade ambiental, gerado a partir da combinação das funções de pertinência fuzzy e do método AHP.

Tabela 4.6 – Escala de importância relativa entre dois critérios, orientativa para a definição de pesos no método AHP

Menos importante	Extremamente	1/9
	Muito fortemente	1/7
	Fortemente	1/5
	Moderadamente	1/3
Igualmente		1
Mais importante	Moderadamente	3
	Fortemente	5
	Muito fortemente	7
	Extremamente	9

Fonte: Saaty (1977).

$$\begin{aligned}
 \text{Fragilidade ambiental} = & (\text{peso AHP APP} \cdot \text{tema APP}) + (\text{peso AHP cobertura e uso} \\
 & \text{do solo} \cdot \text{tema cobertura e uso do solo}) + (\text{peso AHP} \\
 & \text{pedologia} \cdot \text{tema pedologia}) + (\text{peso AHP declividade} \cdot \text{tema} \\
 & \text{declividade}) + (\text{peso AHP pluviometria} \cdot \text{tema pluviometria})
 \end{aligned}
 \quad (4.4)$$

4.3.5 Comparação dos métodos

Esta etapa consistiu em efetuar uma análise comparativa entre os mapas gerados e as áreas apresentadas, com intuito de testar a hipótese deste trabalho. Para isso, foi analisada a distribuição dos graus de fragilidade (muito baixa, baixa, média, alta e muito alta) nos mapas produzidos por cada uma das metodologias – tradicional e funções de pertinência fuzzy combinadas com o método AHP. A comparação visou identificar qual método apresentou maior sensibilidade espacial, isto é, maior capacidade de captar as heterogeneidades ambientais ao longo do território, representando de forma mais fiel as transições entre áreas com diferentes graus de fragilidade, além de maior coerência com as características ambientais observadas na área de estudo.

Primeiramente, foi realizada uma avaliação geral, com base na quantificação da área (em hectares e porcentagem da área total) ocupada por cada grau de fragilidade nos diferentes mapas. Em um segundo momento, foi conduzida uma análise mais aprofundada nas sub-bacias hidrográficas que apresentaram os contrastes mais significativos entre os métodos.

Desse modo, foi possível avaliar não apenas as diferenças quantitativas entre os métodos, mas também sua capacidade qualitativa de representar, com fidelidade, a complexidade ambiental do território municipal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo deste capítulo, são apresentados os resultados encontrados que incluem: os mapas temáticos segundo a atribuição dos graus de intensidade de fragilidade; o mapa de fragilidade aplicando o método tradicional; o mapa de fragilidade aplicando as funções de pertinência fuzzy e o método AHP; e, finalmente, a comparação entre eles, bem como as orientações para o planejamento e gestão ambiental do município de Lorena.

5.1. Mapas temáticos

Nesta seção, são apresentados os mapas dos temas ambientais elaborados a partir dos dados coletados, bem como suas versões reclassificadas com os respectivos graus de fragilidade atribuídos. Com base nesses mapas, foi possível realizar um diagnóstico detalhado das características do meio físico do município de Lorena, avaliando individualmente cada tema ambiental em função de seu papel específico na dinâmica territorial.

A topografia é um elemento essencial para compreender a dinâmica hidrológica e ambiental (Costa *et al.*, 2010). A declividade do terreno exerce influência sobre a dinâmica do escoamento superficial, determinando tanto a velocidade quanto o volume da água que escoar, onde áreas com maiores inclinações favorecem o escoamento acelerado, o que intensifica o arraste de partículas do solo e eleva a suscetibilidade à erosão (Silva, 1995). Além disso, em relevo mais acentuado, a capacidade de infiltração da água no solo é reduzida, resultando em menor recarga hídrica e maior transporte de sedimentos para os corpos d'água, com possíveis implicações para o assoreamento e a qualidade ambiental dos ecossistemas aquáticos (Vidaletti *et al.*, 2021).

Desse modo, verifica-se que esta variável é de grande relevância para ser incorporada ao mapa de fragilidade ambiental, a fim de que sejam identificadas as regiões que apresentem maiores declividades e que, por isso, poderão apresentar maior suscetibilidade ao escoamento superficial intenso e à erosão.

O município de Lorena possui uma diversidade de formações de relevo e declividade (Figura 5.1). Para este estudo, foram consideradas as classes de declividade definidas pela Embrapa, que varia de relevos planos (0 a 3%) a relevos escarpados (> 75%) (Embrapa, 1979). Na região norte, onde se inicia a Serra da Mantiqueira, encontram-se colinas, morros baixos e morrotes, e declividades suaves a onduladas. A área urbana central, por sua vez, é caracterizada por terrenos planos, como planícies e terraços fluviais. Ao sul da área urbana, há morrotes,

morros baixos, morros altos e declividades onduladas. Na porção sul, predomina o relevo de serras e morros altos da Serra do Mar e declividades onduladas a montanhosas (Ampla, 2016).

As classes de fragilidade de declividade são apresentadas na Figura 5.2, bem como as classes de fragilidade que as representam segundo a Tabela 5.1. Em resumo, a declividade predominante é a de classe ondulada (8% a 20%), que representa uma fragilidade média, cobrindo 39,3% da área do município de forma distribuída, com exceção das sub-bacias 1, 2, 7, 8, 10 e 11 onde predomina o grau de fragilidade muito baixa.

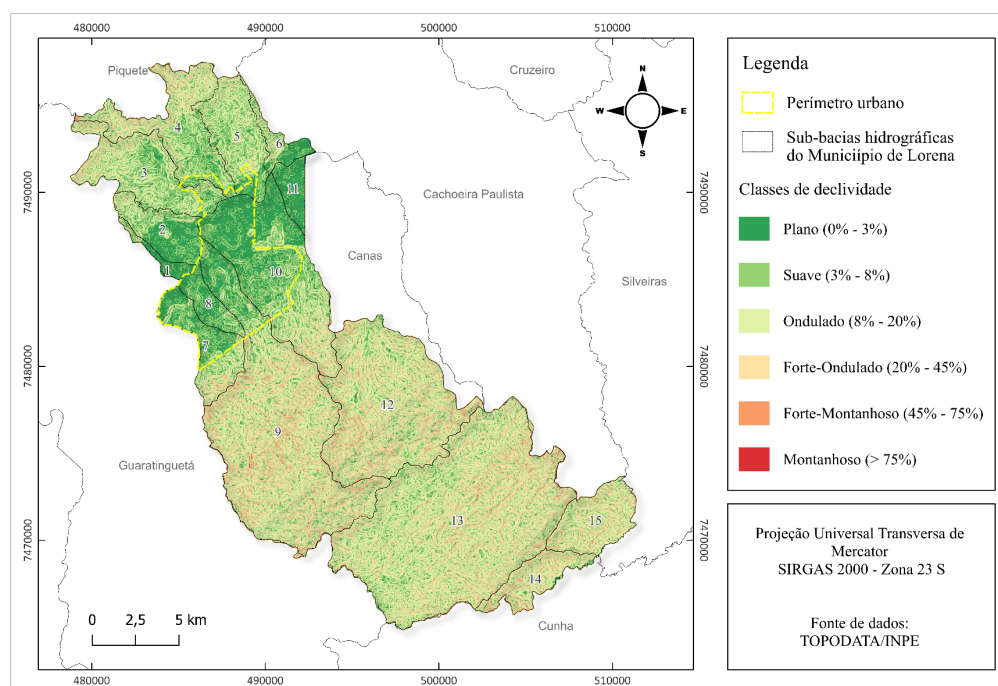


Figura 5.1 – Mapa de declividade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas segundo as classes definidas pela EMBRAPA

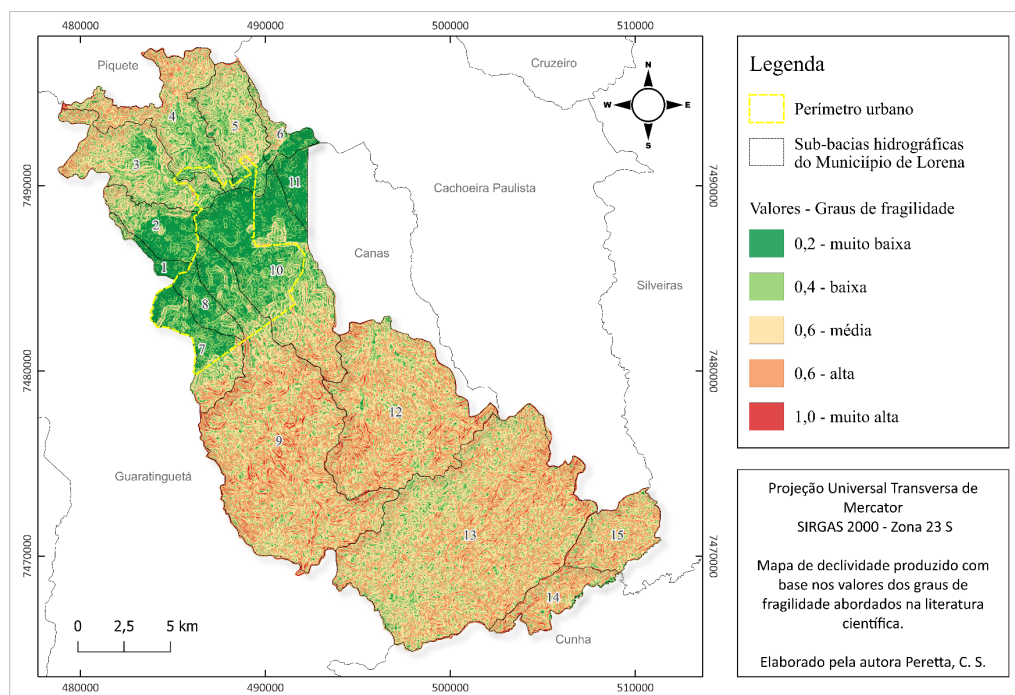


Figura 5.2 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema declividade

Tabela 5.1 – Valores das áreas das classes de declividade e dos graus de fragilidade do município de Lorena

Classes de declividade	Área (ha)	Área (%)	Grau de fragilidade	Área (%)
Plano (0% - 3%)	5.313,1	12,7	0,2 – Muito baixa	12,7
Suave (3% - 8%)	9.834,0	23,5	0,4 – Baixa	23,5
Ondulado (8% - 20%)	16.473,9	39,3	0,6 – Média	39,3
Forte-ondulado (20% - 45%)	9.579,0	22,9	0,8 – Alta	22,8
Forte-montanhoso (45% - 75%)	675,9	1,6	1,0 – Muito alta	1,7
Montanhoso (>75%)	31,2	0,1		
Total	41.907,1	100	-	100,0

A pedologia foi um dos temas ambientais selecionados como relevantes para a incorporação ao mapa de fragilidade ambiental, visto que as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo influenciam diretamente na infiltração, na permeabilidade, na capacidade

total de armazenamento de água e na resistência aos processos de erosão (Spörl, 2007). Essas propriedades podem variar em função do tipo de solo, do uso e manejo adotado, do comprimento e grau do declive, de práticas conservacionistas e da intensidade e duração de agentes erosivos (Lal *et al.*, 1997; Silva, 1995).

Solos mais porosos e permeáveis, geralmente com maior teor de areia, apresentam altas taxas de infiltração, mas são mais suscetíveis à erosão. Em contrapartida, solos mais finos e de menor porosidade, como aqueles com maior teor de argila, têm taxas de infiltração mais baixas, resultando em maior escoamento superficial. Entretanto, os solos argilosos costumam ser mais resistentes à erosão do que os arenosos, devido à sua maior capacidade de agregação das partículas (Silva, 1995; Lima, 2003; Seraphim, 2018).

O processo erosivo nos solos pode impactar significativamente os corpos hídricos, estando diretamente relacionado ao assoreamento nas bacias hidrográficas. Esse fenômeno gera diversas consequências, como a redução da capacidade de armazenamento de água em reservatórios usados para abastecimento humano e geração de energia, degradação da qualidade da água, diminuição das áreas navegáveis e aumento do risco de inundações, entre outros efeitos (Guerra; Cunha, 1995; Francke *et al.*, 2008; Barbosa 2014; Lense *et al.*, 2023).

Em relação à pedologia, a Figura 5.3 e a Figura 5.4 ilustram, respectivamente, o mapa pedológico do município de Lorena e o mapa com os graus de fragilidade associados à pedologia, enquanto a Tabela 5.2 apresenta a área de cada classe de solo e de cada grau de fragilidade e suas respectivas porcentagens.

As classes de solo área urbana e gleissolo melânico estão presentes em 12,8% do território do município de Lorena e representam o grau de muito alta fragilidade, visto que estas classes de solo possuem drenagem deficiente e baixa velocidade de infiltração da água, promovendo o escoamento superficial (Valle; Francelino; Pinheiro, 2016) que, neste caso, configura um fator negativo, pois influencia a ocorrência de inundações e alagamentos, eventos que ocorrem com certa frequência na região central do município. A fragilidade alta, por sua vez, totaliza 24,6% do território e é constituído pelo cambissolo háplico, caracterizado por ser um tipo de solo jovem, de ocorrência em áreas declivosas e por possuírem baixa capacidade de armazenamento de água, elevando o escoamento superficial e o processo de erosão hídrica (Ferreira *et al.*, 2010; Bonna, 2011). Por outro lado, os graus de fragilidade muito baixa e baixa, representados pelos latossolos, ocupam quase metade da área do município de Lorena (46,9%). Com estrutura estável, alta porosidade, boa drenagem e ocorrência em relevo suave, esses solos favorecem a infiltração da água e oferecem menor risco de erosão e degradação ambiental (Ket, 1997).

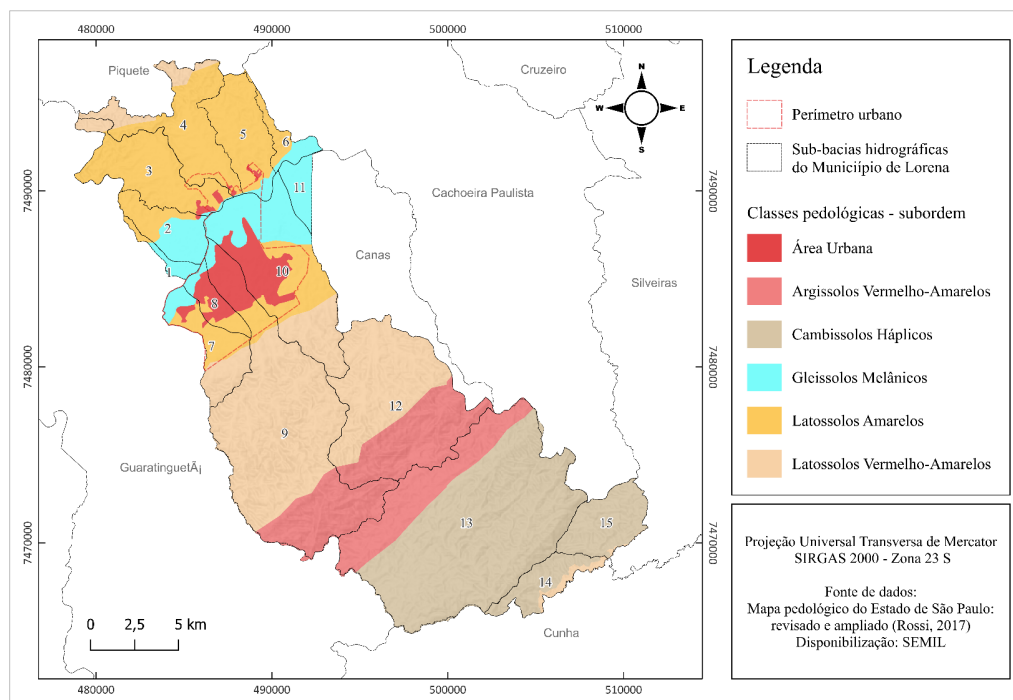


Figura 5.3 – Mapa pedológico do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas

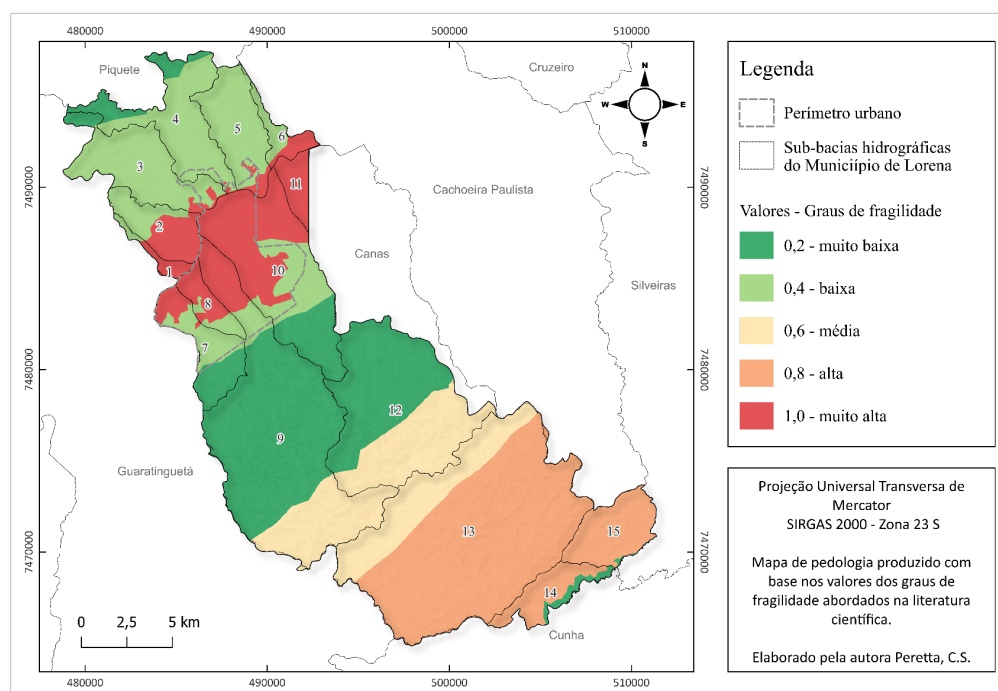


Figura 5.4 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema pedologia

Tabela 5.2 – Valores das áreas das classes de solo e dos graus de fragilidade do município de Lorena

Classes de solos	Área (ha)	Área (%)	Graus de fragilidade	Área (%)
Latossolos Vermelho-Amarelos	10.956,7	26,5	0,2 – Muito baixa	26,5
Latossolos Amarelos	8.419,6	20,4	0,4 –Baixa	20,4
Argissolos Vermelho-Amarelos	6.500,1	15,7	0,6 – Média	15,7
Cambissolos Háplicos	10.115,4	24,6	0,8 – Alta	24,6
Gleissolos Melânicos	3.371,1	8,2	1,0 – Muito alta	12,8
Área urbana	1.907,2	4,6		
Total	41.270,1	100,0	-	100,0

A cobertura e uso do solo retratam as atividades humanas que podem significar pressão e impacto sobre os elementos naturais (Santos, 2004). As diferentes coberturas e usos do solo podem influenciar os processos do ambiente natural, exercendo proteção ou maximizando os impactos das ações antrópicas. As áreas recobertas por mata, por exemplo, oferecem proteção ao solo do impacto e ação erosiva das chuvas; por outro lado, as áreas de pastagens e agricultura de ciclo longo oferecem proteção média; já as áreas sem nenhuma proteção vegetal oferecem baixa proteção aos solos (Spörl, 2007).

Segundo Ross (1994), as unidades de fragilidade dos ambientes naturais devem ser definidas a partir de estudos integrados que considerem a dinâmica de funcionamento desses sistemas, sendo essencial a análise da cobertura e uso do solo, elementos que não devem ser vistos como externos à natureza, mas como parte integrante de suas dinâmicas. Assim, a ação antrópica provoca grandes alterações na paisagem natural e, por isso, é relevante integrar esta variável no mapa de fragilidade ambiental.

Conforme as classes de cobertura e uso do solo presentes no município de Lorena (Figura 5.5) e o grau de fragilidade que representam (Figura 5.6), cujas áreas e porcentagens são descritas na Tabela 5.3, a pastagem é a classe de maior incidência (46,0%), seguida pelos mosaicos de uso (20,9%) – que, segundo Mapbiomas (2022), são áreas de uso agropecuário

onde não foi possível distinguir claramente entre pastagem e agricultura – e formação florestal (20,6%). Pastagem e mosaicos de uso representam o grau de média fragilidade, cobrindo 66,9% da área do município. A formação florestal é um dos tipos de cobertura e uso que compõe a fragilidade muito baixa. Observa-se que o grau de muito alta fragilidade está associada à área urbanizada, representando 4,3% da área total do município.

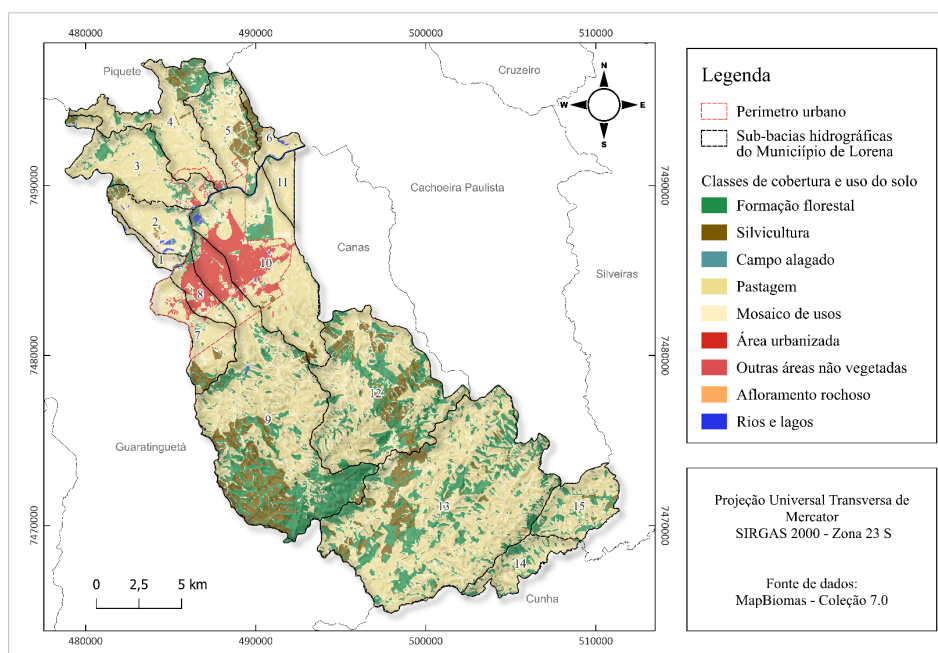


Figura 5.5 – Mapa de cobertura e uso do solo do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas

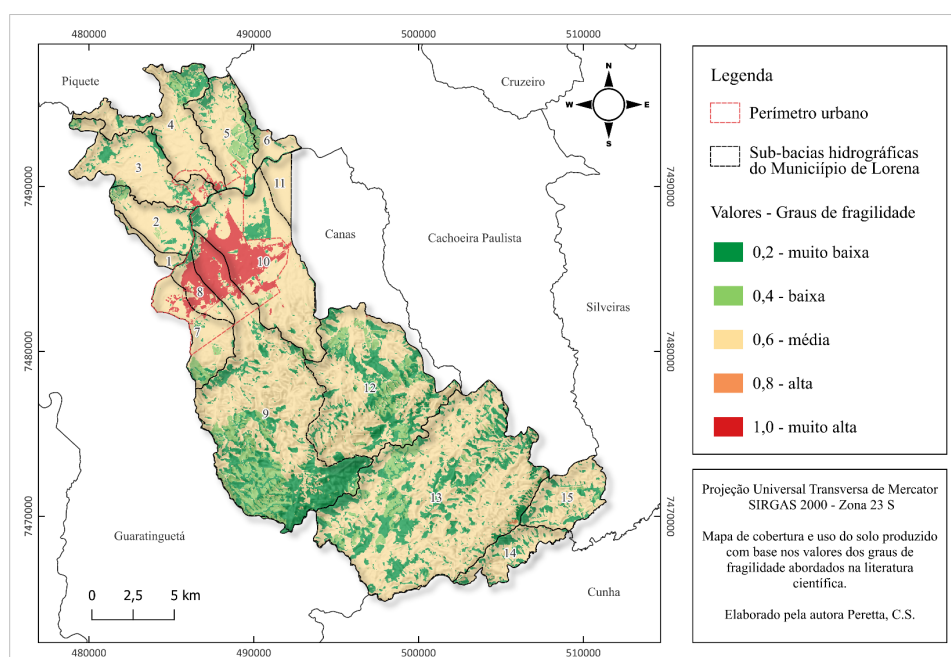


Figura 5.6 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema cobertura e uso do solo

Tabela 5.3 – Valores das áreas das classes e dos graus de fragilidade de cobertura e uso do solo no município de Lorena

Classe de cobertura e uso do solo	Área (ha)	Área (%)	Graus de fragilidade	Área (%)
Formação florestal	8.521,5	20,6	0,2 – Muito baixa	21,0
Campo Alagado e Área Pantanosa	5,0	0,0		
Rios e lagos	189,4	0,4		
Silvicultura	3.171,4	7,7	0,4 – Baixa	7,7
Pastagem	19.040,9	46,0	0,6 – Média	66,9
Mosaico de usos	8.637,6	20,9		
Afloramento Rochoso	22,6	0,1	0,8 – Alta	0,1
Área Urbanizada	1.762,5	4,2	1,0 – Muito alta	4,3
Outras áreas não vegetadas	34,6	0,1		
Total	41.385,5	100,0	-	100,0

A inclusão das APPs é fundamental para avaliar a fragilidade ambiental, pois a delimitação de áreas que devem estar vegetadas ao longo das margens dos cursos d'água — conhecida como mata ciliar ou vegetação ripária — desempenha um papel essencial no fornecimento dos serviços ecossistêmicos. Entre suas principais funções, destacam-se a proteção do solo, a regulação da dinâmica hidrológica e do transporte de sedimentos auxiliando na recarga de aquíferos e garantindo o abastecimento de água, preservação dos corpos d'água, manutenção da permeabilidade do solo e fornecimento de refúgio e corredores ecológicos, promovendo o fluxo gênico da fauna e flora, especialmente entre áreas urbanas e periurbanas (MMA, 2015; Lowance *et al.*, 1997; Miranda, 2017).

Estudos demonstram que a presença de vegetação ripária atua direta e indiretamente na dissipação da energia de eventos de alto fluxo (vazão), bloqueando e reduzindo sua velocidade e, com isso, minimizando os danos causados pelas inundações à jusante (Monteiro *et al.*, 2016; DPI NSW, 2004); controle do lençol freático, com armazenamento e recarga de aquíferos, facilitando as trocas entre as águas superficiais e subterrâneas (Tabacchi *et al.*, 2000); estabilização de leitos e margens de cursos d'água contra erosão, remoção e retenção de sedimentos (Rutherford; Ladson, 2014; Nelle, 2014;).

Os benefícios da presença de vegetação são interrompidos quando há fragmentação longitudinal dos corredores da vegetação ripária. Assim, sua ausência pode influenciar os

eventos de inundações em três maneiras: geomorfologicamente, afetando a forma e a profundidade do canal; hidrológicamente, alterando a quantidade de água e hidraulicamente, alterando a resistência ao fluxo de água (Salemi *et al.* 2012; Rutherford, Ladson, 2014). Os efeitos geomorfológicos pela falta de vegetação ripária incluem a formação de voçorocas, aprofundamento e alargamento do leito que alteram a hidráulica e a hidrologia produzindo mudanças nas vazões e nas cheias (Tucci; Meller, 2007). Se o uso e cobertura do solo na área da bacia hidrográfica for predominantemente antrópico, este fato, somado à impermeabilização dos solos nas cidades, aumenta a vazão e velocidade das águas, afetando principalmente assentamentos existentes nas planícies de inundações dos cursos d'água capazes de causar desastres naturais e prejuízos à população, seja no âmbito da saúde, econômicos, sociais e ambientais (CEMADEN, 2016).

No Brasil, a conservação da vegetação ripária constitui obrigação legal. As APPs definidas pela Lei Federal 12.651/2012 (Brasil, 2012) são:

“Art. 3º, II: Áreas protegidas, cobertas ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas”.

Sendo assim, a vegetação ripária ou mata ciliar configura-se como APP hídrica, visto que ocupam faixas marginais dos cursos d'água natural, perene e intermitente, tanto das áreas urbanas como das áreas rurais.

No município de Lorena, as APPs hídricas consideradas correspondem a 23,3% do território. Conforme as larguras estabelecidas pela legislação, essas APPs variam entre 30 metros a 100 metros: cursos d'água com menos de 10 metros de largura devem possuir APPs hídricas com largura de 30 metros; cursos d'água que tenham de 10 a 50 metros de largura estão relacionadas às APPs de 50 metros de largura; e, para cursos d'água que tenham de 50 a 200 metros de largura, as APPs devem ser de 100 metros de largura (Brasil, 2012). Neste último caso, na área de estudo, são APPs referentes ao rio Paraíba do Sul, que transpassa o município de Lorena. A Tabela 5.4 demonstra o valor das áreas para cada largura das APPs na área de estudo.

Tabela 5.4 – Quadro de áreas das diferentes larguras das áreas de preservação permanente hídricas na área de estudo

Largura das APPs (m)	Área das APPs (ha)	Área das APPs (%)
30	7.663,0	79,3
50	1.703,7	17,6
100	293,1	3,1
Total	9.659,8	100,0

Conforme a Tabela 5.5, mais da metade das APPs de Lorena é constituída por cobertura e usos do solo voltadas para pastagem (34,0%) e mosaico de usos (28,7%). Esses dados evidenciam um cenário com significativa presença de atividades antrópicas em áreas que deveriam estar cobertas por vegetação, o que contribui para a degradação ambiental e compromete a função ecológica dessas áreas. Por outro lado, as APPs cobertas por formação florestal, que representam 32,3% da área total, tendem a apresentar melhores condições de preservação e conservação dos recursos hídricos. Isso se deve, principalmente, à presença de matas ciliares, que desempenham um importante papel na manutenção dos serviços ecossistêmicos, como a proteção dos cursos d'água, controle da erosão, regulação do microclima e conservação da biodiversidade, conforme discutido anteriormente. A Figura 5.7 ilustra as APPs e as respectivas classes de cobertura e uso do solo no município de Lorena.

Tabela 5.5 – Áreas das classes de cobertura e uso do solo nas APPs hídricas presentes no município de Lorena

Classes de cobertura e uso do solo das APPs	Área (ha)	Área (%)
Pastagem	3.282,23	34,0
Formação florestal	3.117,58	32,3
Mosaico de usos	2.771,37	28,7
Silvicultura	355,035	3,7
Área Urbanizada	82,05	0,8
Rios e lagos	25,55	0,3
Afloramento Rochoso	3,23	0,03
Outras áreas não vegetadas	1,53	0,01
Campo Alagado e Área Pantanosa	1,62	0,01
Total	9.640,19	100,0

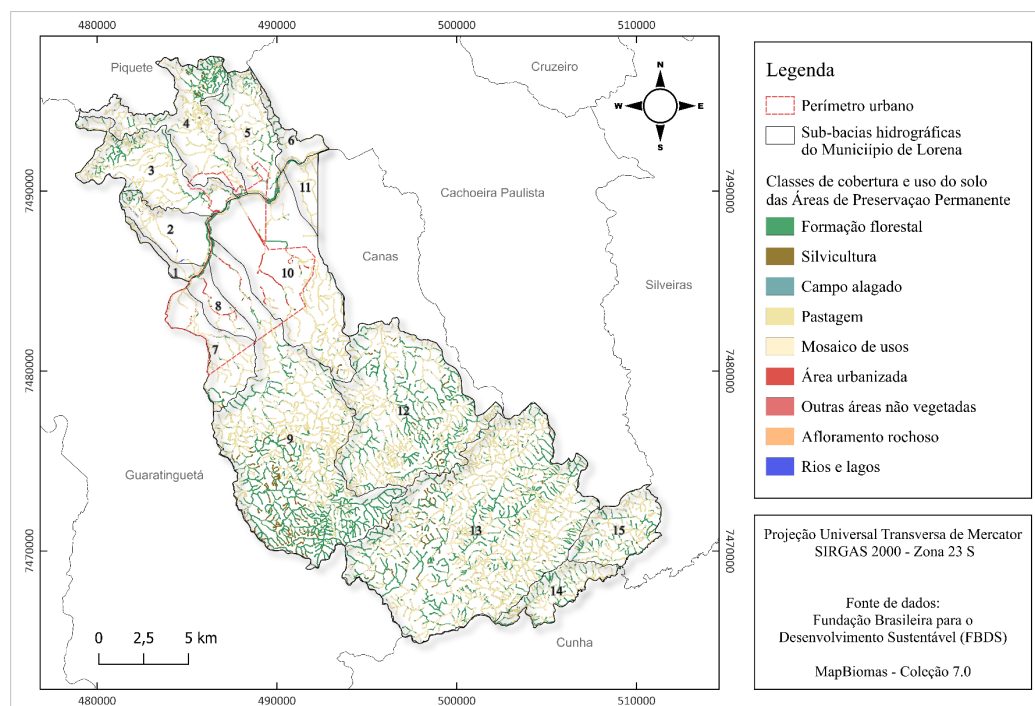


Figura 5.7 – Cobertura e uso do solo nas áreas de preservação permanente hidrica do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas

Na Figura 5.8 e na Tabela 5.6 são apresentados os valores atribuídos aos diferentes graus de fragilidade ambiental, considerando a presença ou a ausência de APP nas sub-bacias e as classes de cobertura e uso do solo, conforme metodologia descrita no item 4.3.2.

Verifica-se que a maior parte das áreas delimitadas como APPs associadas às classes de uso do solo pastagem e mosaico de usos apresenta alto grau de fragilidade ambiental, que está distribuído por toda a extensão territorial do município. Essa condição evidencia a vulnerabilidade dessas áreas frente às pressões antrópicas e à perda de funções ecológicas. Já a delimitação das APPs inseridas em áreas classificadas como área urbana, afloramento rochoso e outras áreas não vegetadas concentram-se predominantemente na região central da cidade em que as APPs estão inseridas em espaços urbanos consolidados, onde a ocupação intensa e a impermeabilização do solo conferem uma classe de fragilidade ambiental classificado como muito alta.

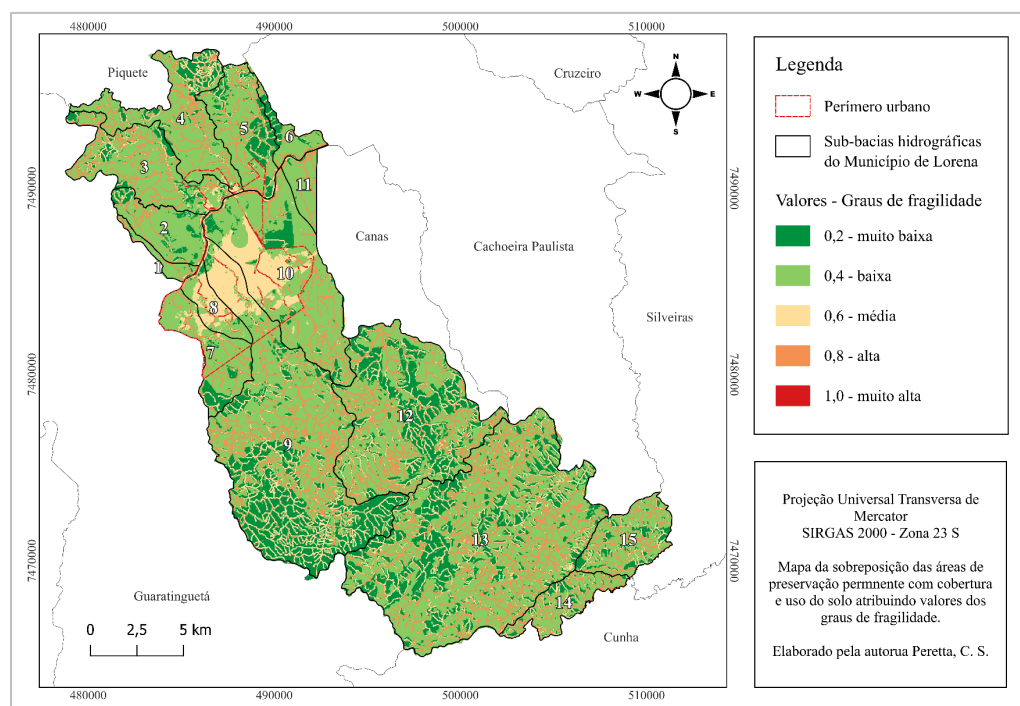


Figura 5.8 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema APP

Tabela 5.6 – Valores das áreas dos graus de fragilidade em função da presença ou ausência de APP e do uso e cobertura do solo no município de Lorena

APP	Classes de cobertura e uso do solo	Área (ha)	Área (%)	Grau de fragilidade	Área (%)
Ausente	Florestas/Campos alagados/Rios/Silvicultura	8.394,2	20,3	0,2 - Muito baixa	20,3
Ausente	Pastagem/Mosaico	21.642,2	52,3	0,4 - Baixa	52,3
Ausente	Área urbana/Afloramento rochoso/outras áreas não vegetadas	1.734,2	4,2	0,6 - Média	12,6
Presente	Florestas/Campos alagados	3.502,6	8,4		
Presente	Pastagem/Mosaico	6.058,4	14,6	0,8 - Alta	14,6
Presente	Área urbana/Afloramento rochoso/outras áreas não vegetadas	86,9	0,2	1,0 - Muito alta	0,2
Total		41.418,5	100,0	-	100,0

A precipitação é uma variável climática com importância fundamental no planejamento eficiente em diversos setores da sociedade (planejamento agrícola, ambiental e urbano, geração de energia elétrica, dimensionamento de obras, gestão dos recursos hídricos e de bacias hidrográficas), capaz de moldar a dinâmica do ambiente (Coan; Back; Bonetti, 2015; Costa *et al.*, 2015; Carvalho; Assad, 2005; Villela; Mattos, 1975; Simioni; Rovani; Lensse; Wollmann, 2014; Leandro, 2013). Entender a variabilidade da precipitação numa escala regional auxilia na

definição de políticas de gestão de recursos hídricos, e contribui também com o planejamento de atividades sustentáveis (Liang *et al.*, 2011).

Neste estudo, o tema da pluviometria foi abordado a partir da análise da precipitação média do mês mais seco, utilizada para caracterizar um cenário de escassez hídrica a ser atribuído ao mapa de fragilidade ambiental e hídrica. Entre os principais impactos associados a este cenário, destacam-se o aumento dos processos de degradação do solo, como a erosão, e a maior ocorrência de focos de incêndio (Vicente-Serrano *et al.*, 2020); a redução da biomassa vegetal provocada pela mortalidade das plantas, comprometendo o funcionamento dos processos hidrológicos e afetando a interceptação da chuva, percolação, infiltração no solo e escoamento superficial, o que influencia diretamente a disponibilidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (Brown *et al.*, 2005).

Como consequência, há prejuízos significativos no abastecimento de água para a população, na produtividade agrícola e pecuária (Alpino; Sena; Freitas, 2016), além de impactos negativos sobre a biodiversidade, como alterações na composição e estrutura das comunidades vegetais e na fauna associada (Barbora; Buriti, 2022).

Sendo assim, foi realizada a interpolação da precipitação média do mês mais seco, com base nos dados das séries históricas registrados pelos pluviômetros da região (Figura 5.9) e a geração das isoietas correspondentes à interpolação (Figura 5.10).

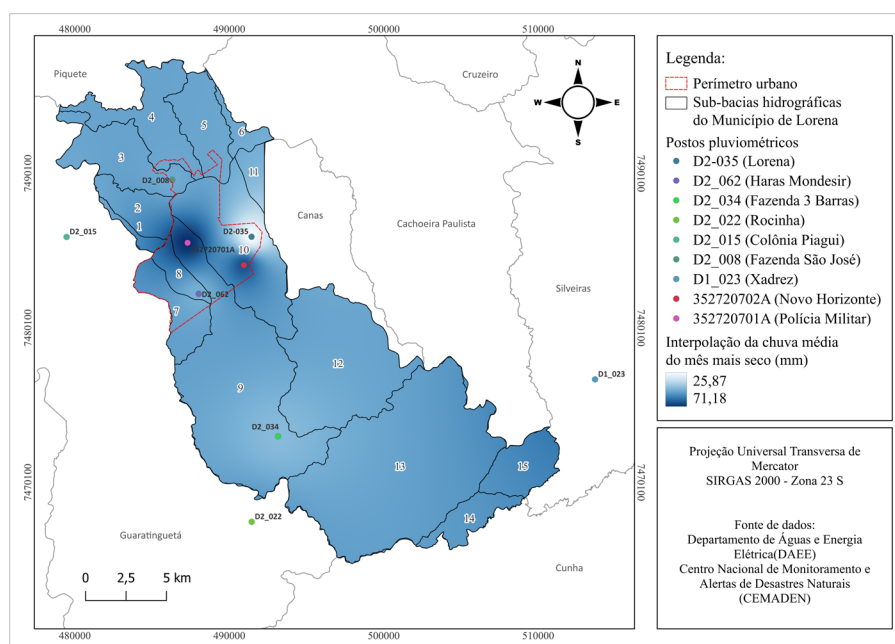


Figura 5.9 – Distribuição dos pluviômetros utilizados e resultado da interpolação da precipitação média do mês mais seco para o município de Lorena

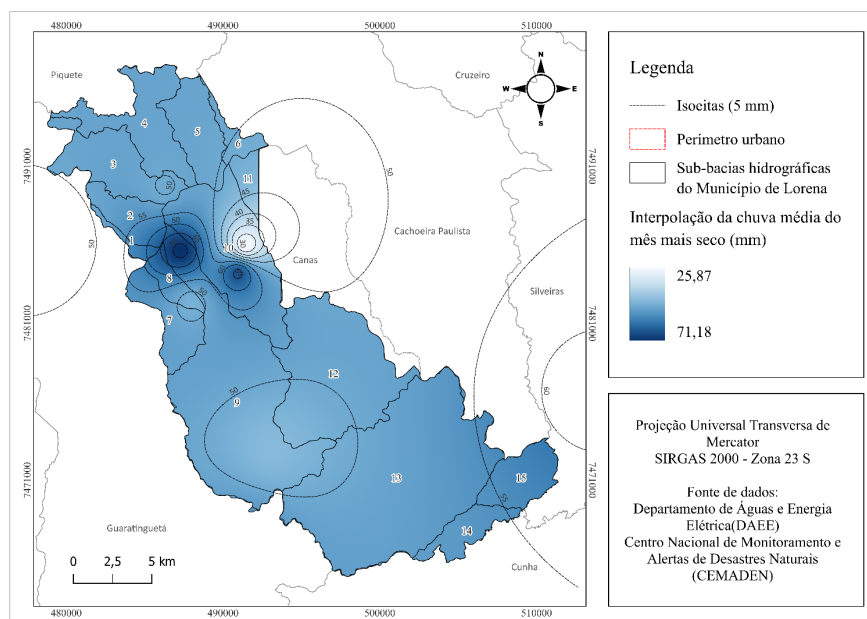


Figura 5.10 – Isoietas geradas pela interpolação espacial da precipitação média do mês mais seco no município de Lorena

Partindo dos valores resultantes da interpolação, a fragilidade média é o grau com maior área no território municipal (89,0%), conforme a Tabela 5.7 e a Figura 5.11, sugerindo que grande parte do município se encontra em uma condição de suscetibilidade moderada frente a cenários de secas, o que requer atenção em termos de planejamento ambiental e gestão dos recursos naturais nesses períodos.

Tabela 5.7 - Valores das áreas das classes de pluviometria e dos graus de fragilidade no município de Lorena

Classes de pluviometria	Área (ha)	Área (%)	Grau de fragilidade	Área (%)
65,0 – 71,27	410,6	1,0	0,2 – Muito baixa	1,0
59,0 – 65,0	1.009,4	2,4	0,4 – Baixa	2,4
48,0 – 59,0	36.838,6	89,0	0,6 – Média	89,0
37,0 – 48,0	2.742,9	6,6	0,8 – Alta	6,6
25,65 – 37,0	376,0	0,9	1,0 – Muito alta	0,9
Total	41.337,5	100,0	-	100,0

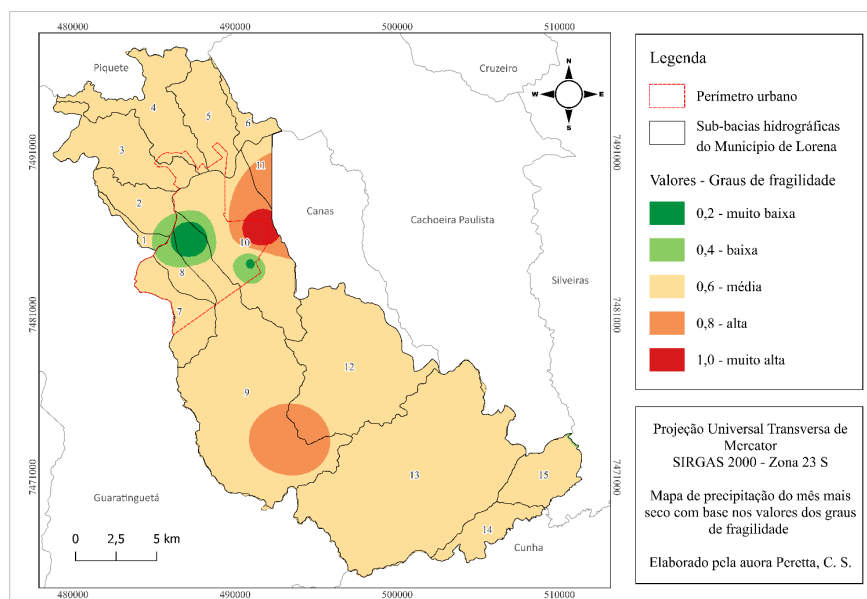


Figura 5.11 – Graus de fragilidade do município de Lorena e suas sub-bacias hidrográficas para o tema pluviometria

5.2. Mapa de fragilidades ambientais e hídricas – Método tradicional: sobreposição por média aritmética

A partir da sobreposição dos temas ambientais e seus respectivos graus de fragilidade individuais pela média aritmética, chamado neste trabalho de método tradicional, foi possível elaborar o mapa de fragilidades das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena (Figura 5.12). Com esta abordagem metodológica, foram obtidas quatro classes de fragilidade: baixa, média, alta e muito alta (muito baixa, presente nos temas individuais, não apareceu na sobreposição), cujas áreas em geral são apresentadas na Tabela 5.8 e de cada sub-bacia hidrográfica na Tabela 5.9.

Tabela 5.8 - Áreas dos graus de fragilidades do município de Lorena pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional)

Graus de fragilidade	Fragilidade ambiental e hídrica	
	Área (ha)	Área (%)
Muito baixa	-	-
Baixa	1.280,0	3,1
Média	27.116,8	65,7
Alta	12.825,3	31,1
Muito alta	47,2	0,1
Total	41.269,3	100,00

Tabela 5.9 – Fragilidade ambiental e hídrica das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional)

Sub-bacias hidrográficas	Muito baixa		Baixa		Média		Alta		Muito alta		Total
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
1	-	-	2,3	2,2	50,5	48,9	50,5	48,9	-	-	103,2
2	-	-	18,1	1,6	951,0	83,3	173,0	15,1	-	-	1.142,1
3	-	-	85,7	3,8	1.884,4	83,3	288,2	12,7	2,7	0,1	2.260,9
4	-	-	74,3	3,1	2.072,1	87,6	218,8	9,2	0,5	0,0	2.365,7
5	-	-	75,6	4,4	1.480,2	85,7	170,5	9,9	-	-	1.726,3
6	-	-	9,5	2,0	373,3	79,6	86,5	18,4	-	-	469,2
7	-	-	67,5	5,0	1.111,9	81,8	179,4	13,2	0,3	0,0	1.359,0
8	-	-	11,3	1,8	287,7	47,1	308,4	50,5	3,7	0,6	611,1
9	-	-	483,8	5,9	6.381,7	78,0	1.310,7	16,0	1,2	0,0	8.177,3
10	-	-	36,7	0,9	2.574,2	60,9	1.577,6	37,3	38,7	0,9	4.227,2
11	-	-	-	-	141,7	28,2	361,1	71,8	-	-	502,8
12	-	-	396,7	7,2	4.123,4	74,6	1.006,5	18,2	-	-	5.526,5
13	-	-	10,4	0,1	4.654,6	45,7	5.530,3	54,2	0,1	0,0	10.195,2
14	-	-	7,9	0,8	382,7	38,9	592,9	60,3	-	-	983,5
15	-	-	0,1	0,0	466,5	32,9	952,6	67,1	-	-	1.419,3

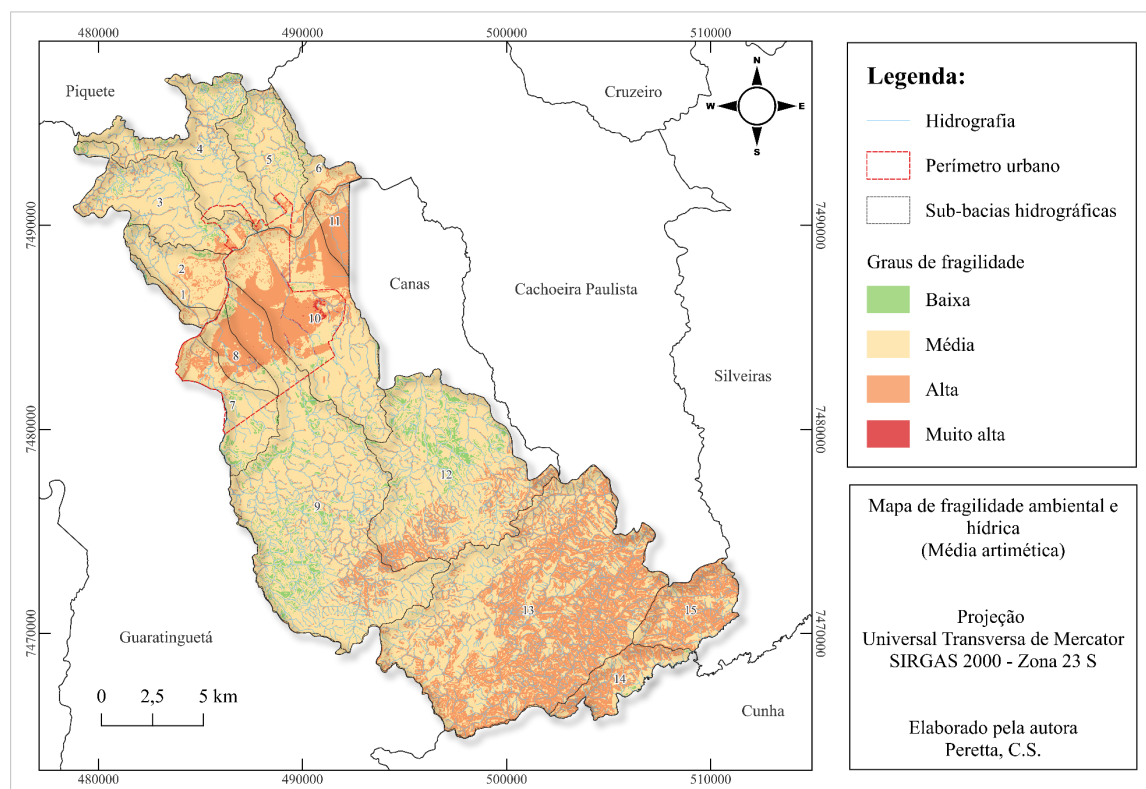


Figura 5.12 - Mapa de fragilidades ambientais e hídricas do município de Lorena e suas sub-bacias pelo emprego do método de sobreposição por média aritmética (método tradicional)

Por meio do método tradicional, pode-se observar que o grau de fragilidade predominante no município de Lorena foi a média (65,7% da área), seguido pela alta (31,1% da área), sendo

a fragilidade muito alta quase inexistente (0,1% da área). As sub-bacias hidrográficas que apresentaram mais de 50% de suas áreas enquadradas no grau de alta fragilidade (maior preocupação, já que a fragilidade muito alta quase não esteve presente) são as sub-bacias de número 8 (50,5%), 11 (71,8%), 13 (54,2%), 14 (60,3%) e 15 (67,1%).

Destaca-se que as sub-bacias 8 e 11 possuem áreas relativamente pequenas em comparação com as demais unidades analisadas, o que contribui para a acentuação da predominância da alta fragilidade. No caso da sub-bacia 8, a alta fragilidade tem relação com a intensa ocupação urbana, caracterizada por solos impermeabilizados e também uma pequena porção com fragilidade muito alta (0,6%). Já na sub-bacia 11, os fatores predominantes foram a pedologia, formada por gleissolo melânico, e a baixa precipitação, ambos classificados como muito alta fragilidade. Ambas as sub-bacias estão situadas nas regiões das várzeas do Rio Paraíba do Sul, áreas naturalmente mais sensíveis e, por consequência, mais propensas à degradação. Ainda, a cobertura e uso nas delimitações das APPs inseridas nessas sub-bacias refletem as pressões antrópicas, como urbanização (sub-bacia 8) e uso agropecuário (sub-bacia 11), reforçando os maiores riscos de degradação ambiental.

As sub-bacias 13, 14 e 15, localizadas na porção sul do território municipal, são compostas predominantemente por cambissolos háplicos, associados a relevo com declividades onduladas a fortemente onduladas. Essas características, combinadas com a cobertura e uso do solo composta por pastagem e mosaicos de uso, elevam a suscetibilidade ambiental da região e justificam sua classificação como de alta fragilidade. Nessas áreas, a combinação entre o uso inadequado do solo e as declividades acentuadas intensifica os processos erosivos, inclusive nas APPs, comprometendo a estabilidade das encostas e a integridade dos ecossistemas ripários.

Dessa forma, tais áreas demandam ações prioritárias voltadas à conservação ambiental, como reflorestamento e manejo adequado do solo, com o objetivo de manter os serviços ecossistêmicos essenciais prestados por essas áreas sensíveis.

O grau de muito alta fragilidade foi identificado em maior quantidade, embora ainda incipiente, na sub-bacia 10 (0,9%), notadamente ao longo da APP do Ribeirão Mandi e seu afluente, o Córrego Mondesir. As margens desses cursos d'água apresentam elevado grau de antropização, com histórico de ocupação irregular e lançamento indevido de efluentes domésticos e industriais.

Com relação à fragilidade baixa, as sub-bacias 9 (5,9%) e 12 (7,2%) apresentaram áreas pouco expressivas, correspondentes principalmente a remanescentes de vegetação nativa. Destaca-se, nesse contexto, o Parque Ecológico do Taboão, inserido na sub-bacia do Ribeirão

Taboão (ou Tabuão ou Lorena), área de relevante valor para a conservação ambiental e o desenvolvimento do ecoturismo no município.

A classe de fragilidade média foi predominante nas sub-bacias localizadas na porção norte do município de Lorena, destacando-se as sub-bacias 2 (83,3%), 3 (83,3%), 4 (87,6%) e 5 (85,7%). Nessas unidades, observa-se o predomínio do uso do solo voltado para pastagem e mosaico de usos, padrão de cobertura e uso do solo que ocorre em grande parte do município, contribuindo para a manutenção do grau de fragilidade em nível intermediário. Embora não se trate de áreas intensamente urbanizadas ou com relevo acentuado, a remoção parcial da cobertura vegetal e o manejo agrícola expõem o solo a processos de degradação, como compactação, erosão laminar e assoreamento de corpos hídricos.

5.3. Mapa de fragilidades ambientais e hídricas – Funções de pertinência fuzzy e método AHP

5.3.1. Funções de pertinência fuzzy

A aplicação das funções de pertinência aos temas declividade e pluviometria resultou na elaboração dos mapas apresentados na Figura 5.13 e Figura 5.14, bem como nas tabelas que apresentam os valores correspondentes das áreas de cada grau de fragilidade (Tabela 5.10 e Tabela 5.11).

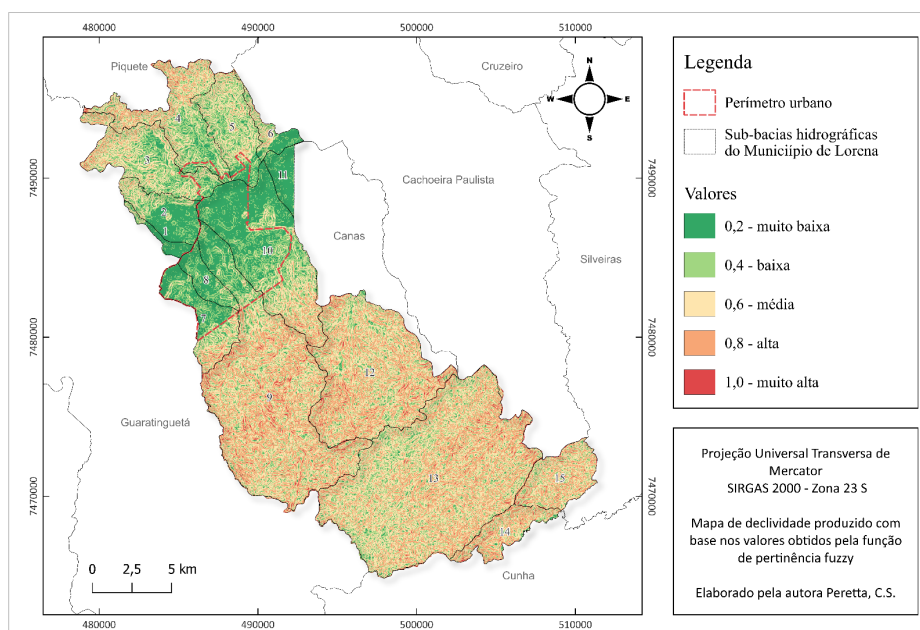


Figura 5.13 – Mapa de declividade do município de Lorena e suas sub-bacias após a atribuição dos valores resultantes das funções de pertinência fuzzy

Tabela 5.10 – Valores das áreas das classes de declividade e dos graus de fragilidade do município de Lorena pelo emprego da função de pertinência fuzzy

Classes de declividade	Área (ha)	Área (%)	Grau de fragilidade	Área (%)
Plano (0% - 3%)	5.313,1	12,7	0,2 – Muito baixa	15,6
Suave (3% - 8%)	9.834,0	23,5	0,4 – Baixa	22,9
Ondulado (8% - 20%)	16.473,9	39,3	0,6 – Média	38,3
Forte-ondulado (20% - 45%)	9.579	22,9	0,8 – Alta	21,8
Forte-montanhoso (45% - 75%)	675,9	1,6	1,0 – Muito alta	1,4
Montanhoso (>75%)	31,2	0,1		
Total	41.907,1	100,0	-	100,0

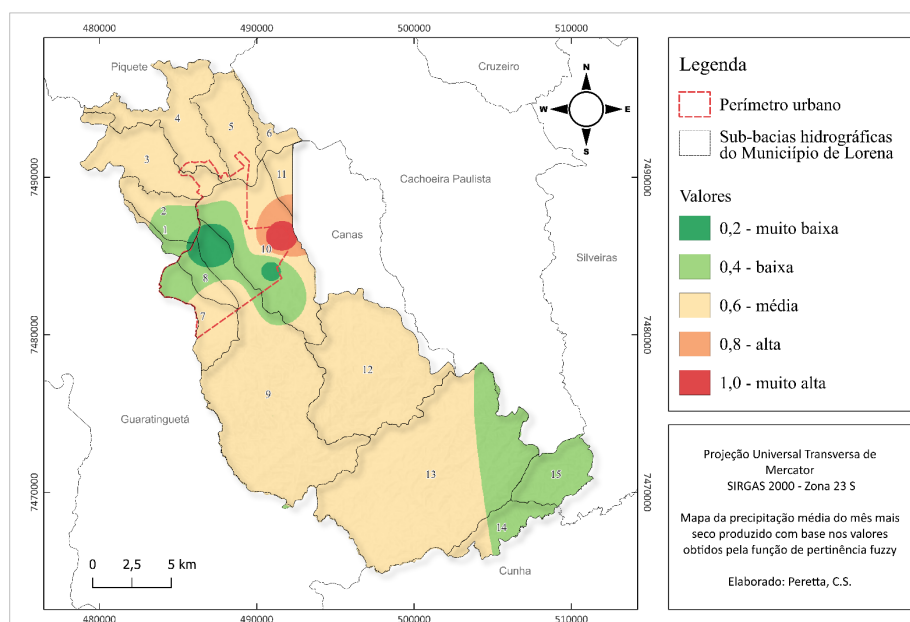


Figura 5.14– Mapa de pluviometria do município de Lorena e suas sub-bacias após a atribuição dos valores resultantes da função de pertinência fuzzy

Tabela 5.11 – Valores das áreas das classes de pluviometria e dos graus de fragilidade do município de Lorena pelo emprego da função de pertinência fuzzy

Classes de pluviometria	Área (ha)	Área (%)	Grau de fragilidade	Área (%)
65,0 – 71,27	410,6	1,0	0,2 – Muito baixa	1,9
59,0 – 65,0	1.009,4	2,4	0,4 – Baixa	18,6
48,0 – 59,0	36.838,6	89,0	0,6 – Média	77,6
37,0 – 48,0	2.742,9	6,6	0,8 – Alta	1,2
25,65 – 37,0	376,0	0,9	1,0 – Muito alta	0,7
Total	41.337,5	100,0	-	100,0

A aplicação das funções de pertinência fuzzy aos mapas temáticos de declividade e pluviometria revelou comportamentos distintos quanto à variação dos graus de fragilidade ambiental. No caso da declividade, a função fuzzy linear crescente, baseada na premissa de que inclinações mais acentuadas elevam o risco de processos erosivos, resultou em uma suavização dos dados, com variações pouco significativas entre as classes. Isso ocorreu porque a distribuição espacial das declividades no município já apresentava uma estrutura contínua e bem definida, o que limitou o impacto da transformação fuzzy. Em contraste, o mapa de pluviometria apresentou variações mais expressivas, uma vez que a função de pertinência utilizada foi linear decrescente, atribuindo maior fragilidade às regiões com menores índices de precipitação. Como a distribuição das chuvas é mais heterogênea, a aplicação da lógica fuzzy acentuou os contrastes, especialmente nas áreas com valores extremos de precipitação, que passaram a representar graus mais elevados de fragilidade. Essa diferença de comportamento entre os dois temas evidencia como a natureza dos dados e o tipo de função fuzzy aplicada influenciam diretamente os resultados finais na análise espacial da fragilidade ambiental.

5.3.2. Método AHP

Nesta etapa, foram determinados os pesos dos temas ambientais para sobreposição por meio do método AHP, com a participação de especialistas, o que resultou na obtenção dos vetores de prioridade (ω) apresentados na Tabela 5.12. A matriz de comparação avaliada pelos especialistas, bem como a memória de cálculo, pode ser consultada no Apêndice D.

Tabela 5.12 – Matriz AHP calculada a partir da análise dos especialistas

	APP	Declividade	Cobertura e uso do solo	Pedologia	Pluviometria	Prioridade (ω)
APP	1,0000	2,7627	1,4831	2,2036	2,3523	0,337
Declividade	0,3620	1,0000	0,5427	0,8363	1,0675	0,129
Cobertura e uso do solo	0,6743	1,8427	1,0000	2,3983	1,8949	0,260
Pedologia	0,4538	1,1958	0,4170	1,0000	1,3893	0,147
Pluviometria	0,4251	0,9368	0,5277	0,7198	1,0000	0,126

A análise revelou que o tema ambiental considerado como de maior importância para a conservação dos recursos hídricos pelos especialistas foi a área de preservação permanente (0,337), seguida pela cobertura e uso do solo (0,260), pedologia (0,147), declividade (0,129) e pluviometria (0,126).

Por fim, foi elaborado o mapa das fragilidades ambientais e hídricas com o apoio das funções de pertinência fuzzy e do método AHP (Figura 5.15). Com base na Tabela 5.13, pode ser observado que o grau de fragilidade predominante foi a média, com 67,2% da área do território municipal. Os graus de baixa e alta fragilidade ficaram com distribuição similar, isto é, por volta de 16%. Já o grau de fragilidade muito baixa mostrou-se ausente, assim como no mapa elaborado com o método da sobreposição por média aritmética. A Tabela 5.14 apresenta o detalhamento das áreas das classes de fragilidade por sub-bacias hidrográficas.

Tabela 5.13 – Áreas dos graus de fragilidades do município de Lorena pelo emprego do método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy

Graus de fragilidade	Fragilidade ambiental e hídrica	
	Área (ha)	Área (%)
Muito baixa	-	-
Baixa	6.607,4	16,0
Média	27.722,9	67,2
Alta	6.842,8	16,6
Muito alta	64,3	0,2
Total	41.237,4	100,0

Tabela 5.14 – Fragilidade ambiental e hídrica das sub-bacias hidrográficas do município de Lorena pelo emprego do método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy

Sub-bacia hidrográfica	Muito baixa		Baixa		Média		Alta		Muito alta		Total
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha
1	-	-	12,2	4,9	195,1	79,4	38,3	15,6	-	-	245,5
2	-	-	161,4	14,1	890,4	77,9	90,8	7,9	-	-	1.142,6
3	-	-	239,7	10,6	1.654,6	73,2	362,3	16,0	3,9	0,2	2.260,5
4	-	-	270,7	11,5	1.752,4	74,2	336,6	14,3	0,9	0,0	2.360,5
5	-	-	376,5	21,8	1.146,1	66,4	202,3	11,7	-	-	1.724,9
6	-	-	105,7	22,5	308,3	65,8	54,7	11,7	-	-	468,7
7	-	-	165,3	12,2	1.034,6	76,2	157,3	11,6	0,5	0,0	1.357,6
8	-	-	25,2	4,1	284,7	46,6	287,7	47,1	13,2	2,2	610,8
9	-	-	2.080,5	25,4	4.788,9	58,6	1.304,4	16,0	3,8	0,0	8.177,6
10	-	-	329,4	7,8	2.733,5	64,9	1.109,1	26,3	41,9	1,0	4.213,8
11	-	-	13,9	2,8	413,6	82,4	74,4	14,8	-	-	501,8
12	-	-	1.244,4	22,5	3.599,4	65,2	676,6	12,3	-	-	5.520,3
13	-	-	1.261,6	12,4	7.180,7	70,6	1.726,9	17,0	-	-	10.169,2
14	-	-	106,4	10,8	704,4	71,7	172,3	17,5	-	-	983,1
15	-	-	186,1	13,2	977,8	69,4	245,3	17,4	-	-	1.409,2

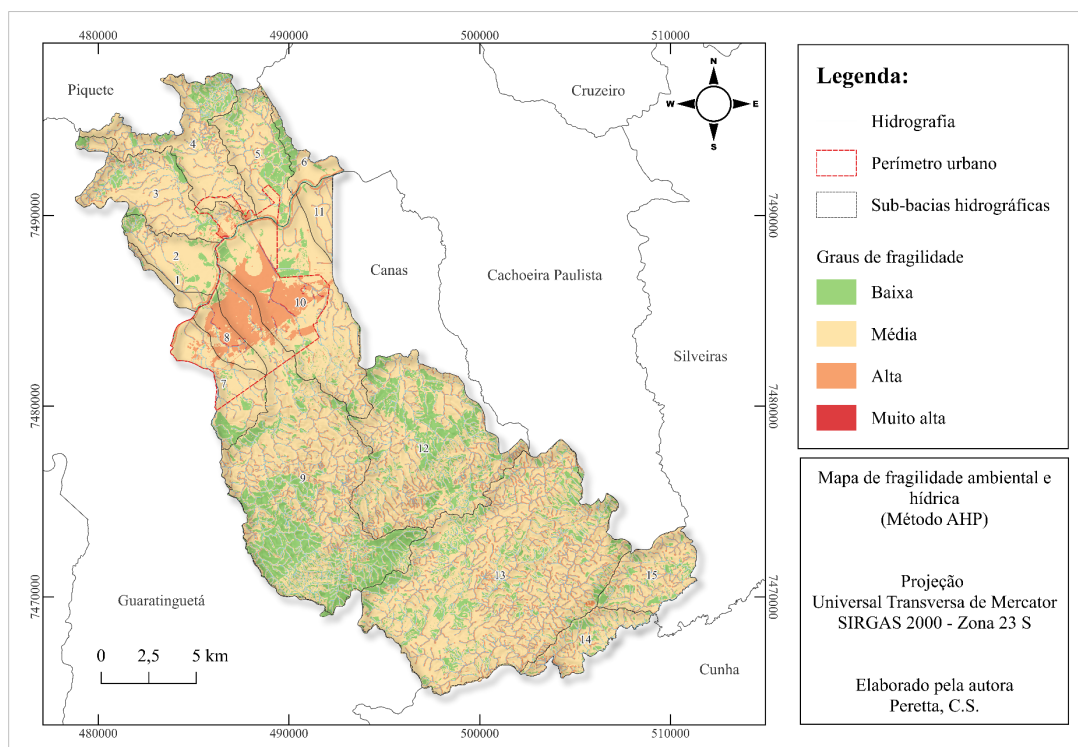


Figura 5.15 – Mapa de fragilidades ambientais e hídricas do município de Lorena e suas sub-bacias considerando o emprego das funções de pertinência fuzzy e método AHP

Em relação às sub-bacias hidrográficas do município de Lorena, observou-se que 14 delas apresentaram mais da metade de suas áreas classificadas com grau de fragilidade ambiental média. A única exceção foi a sub-bacia 8, que apresentou 47,1% de sua área com alta fragilidade e 46,6% com média fragilidade, refletindo a influência significativa da ocupação urbana e da impermeabilização do solo.

As áreas com grau de fragilidade baixa apareceram de forma mais destacada nas sub-bacias 5 (21,8%), 6 (22,5%), 9 (25,4%) e 12 (22,5%). As sub-bacias 9 (Ribeirão Taboão) e 12 apresentaram maior cobertura florestal, formada não apenas por vegetação nativa, mas também por florestas plantadas, especialmente de eucalipto. Como o tema cobertura e uso do solo foi o segundo de maior peso na análise multicritério por meio do método AHP, as áreas com formações florestais foram mais destacadas no mapa de fragilidade ambiental.

Situação semelhante foi observada nas sub-bacias 5 e 6, que também possuem parcelas significativas de vegetação, embora em menor escala, considerando sua extensão territorial reduzida em comparação às sub-bacias 9 e 12.

No que se refere às sub-bacias com predominância de áreas classificadas como alta e muito alta fragilidade, destacaram-se novamente as sub-bacias 8 e 10. No mapa de fragilidade ambiental e hídrica elaborado pelo método AHP combinado com as funções de pertinências fuzzy, observou-se um aumento na extensão das áreas com alta fragilidade nessas unidades, o

que evidencia a crescente pressão antrópica sobre os cursos d'água e suas respectivas APPs. Ressalta-se que tais cursos d'água passaram por processos de retificação e canalização, o que contribui significativamente para a perda de suas funções ecológicas.

A sub-bacia 13, que possui uma das maiores extensões territoriais e relevo predominantemente ondulado, apresentou 70,6% de sua área com grau de fragilidade classificado como médio. A escassez de cobertura vegetal nativa, aliada ao uso intensivo do solo para pastagem contribui para a exposição das APPs e aumento da vulnerabilidade ambiental nessa sub-bacia.

Assim como no mapa de fragilidades ambientais e hídricas elaborado por meio da sobreposição por média aritmética, as sub-bacias 2, 3, 4 e 5 mantiveram elevados percentuais de área classificados como grau de fragilidade média. No entanto, o método AHP trouxe uma mudança ao destacar, de forma mais evidente, áreas com grau de fragilidade baixa, apontando a presença de fragmentos florestais remanescentes nessas sub-bacias.

Embora a fragilidade fosse considerada média, observou-se que os impactos causados pelo uso predominante de pastagem e mosaicos de ocupação, somados à fragmentação da vegetação nativa, resultaram em uma paisagem desconectada ecologicamente. A ausência de corredores ecológicos ou a escassez de áreas contínuas de vegetação limita o funcionamento adequado dos ecossistemas e compromete diversos serviços ecossistêmicos, como a regulação do microclima, a proteção dos recursos hídricos e a conservação da biodiversidade.

Portanto, ainda que essas sub-bacias não estejam inseridas nas categorias de maior fragilidade ambiental, as condições atuais de uso do solo demandam atenção e planejamento, sendo de fundamental importância a promoção de práticas conservacionistas e estratégias de recomposição vegetal, tanto em APPs quanto em Reservas Legais, com o objetivo de mitigar os processos de degradação e promover a restauração funcional da paisagem.

5.3.3. Comparação entre métodos

A comparação entre os métodos empregados na pesquisa evidenciou representações distintas da fragilidade ambiental e hídrica no município de Lorena. Com base nos dados da Tabela 5.8 pelo método tradicional (média aritmética), o grau predominante foi o de fragilidade média, ocupando 65,7% da área do município, seguido pelas classes de fragilidade alta (31,1%) e baixa (3,1%). As classes muito baixas e muito alta praticamente não aparecem, o que sugere uma tendência à suavização dos extremos. Por outro lado, conforme os dados da Tabela 5.13, o método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy, ao atribuir pesos específicos a cada tema com base na opinião de especialistas, resultou em uma maior diversificação das

classes de fragilidade. A fragilidade média manteve-se predominante (67,2%), porém observou-se um aumento significativo da classe baixa (16,0%) e uma substancial redução da alta (16,6%). A classe muito alta também apresentou ligeira ampliação (0,16%), embora ainda muito pequena.

Desse modo, verificou-se que o método AHP conferiu maior destaque às áreas com vegetação florestal (baixa fragilidade), em função do peso atribuído pelos especialistas ao tema cobertura e uso do solo. Já o método tradicional, baseado apenas na sobreposição dos mapas e no cálculo da média aritmética, sem considerar pesos específicos para os temas, resultou na suavização das diferenças e na generalização dos padrões de fragilidade.

No que se refere às sub-bacias hidrográficas, conforme indicado na Tabela 5.9 e na Tabela 5.14, as variações observadas entre os métodos seguiram a mesma tendência dos graus de fragilidade geral, representados nos valores supramencionados, embora com apontamentos relevantes. As sub-bacias 2, 3, 4 e 5, mesmo apresentando predominância de fragilidade média em ambos os métodos, mostraram ampliação das áreas classificadas como baixa fragilidade pelo método AHP (Figura 5.16). Isso está diretamente relacionado à presença de fragmentos florestais, que foram melhor evidenciados pela importância atribuída ao tema cobertura e uso do solo.

A sub-bacia 8, fortemente impactada pela ocupação urbana, manteve a alta fragilidade como predominante em ambos os métodos. No entanto, o AHP destacou uma área maior com fragilidade muito alta, alinhando-se à presença de APPs degradadas e solos impermeabilizados. A sub-bacia 10, igualmente sob pressão antrópica significativa, apresentou comportamento semelhante, com incremento das áreas classificadas como fragilidade muito alta no método AHP, concentradas principalmente nas APPS (Figura 5.17).

Figura 5.16 – Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 2, 3, 4 e 5

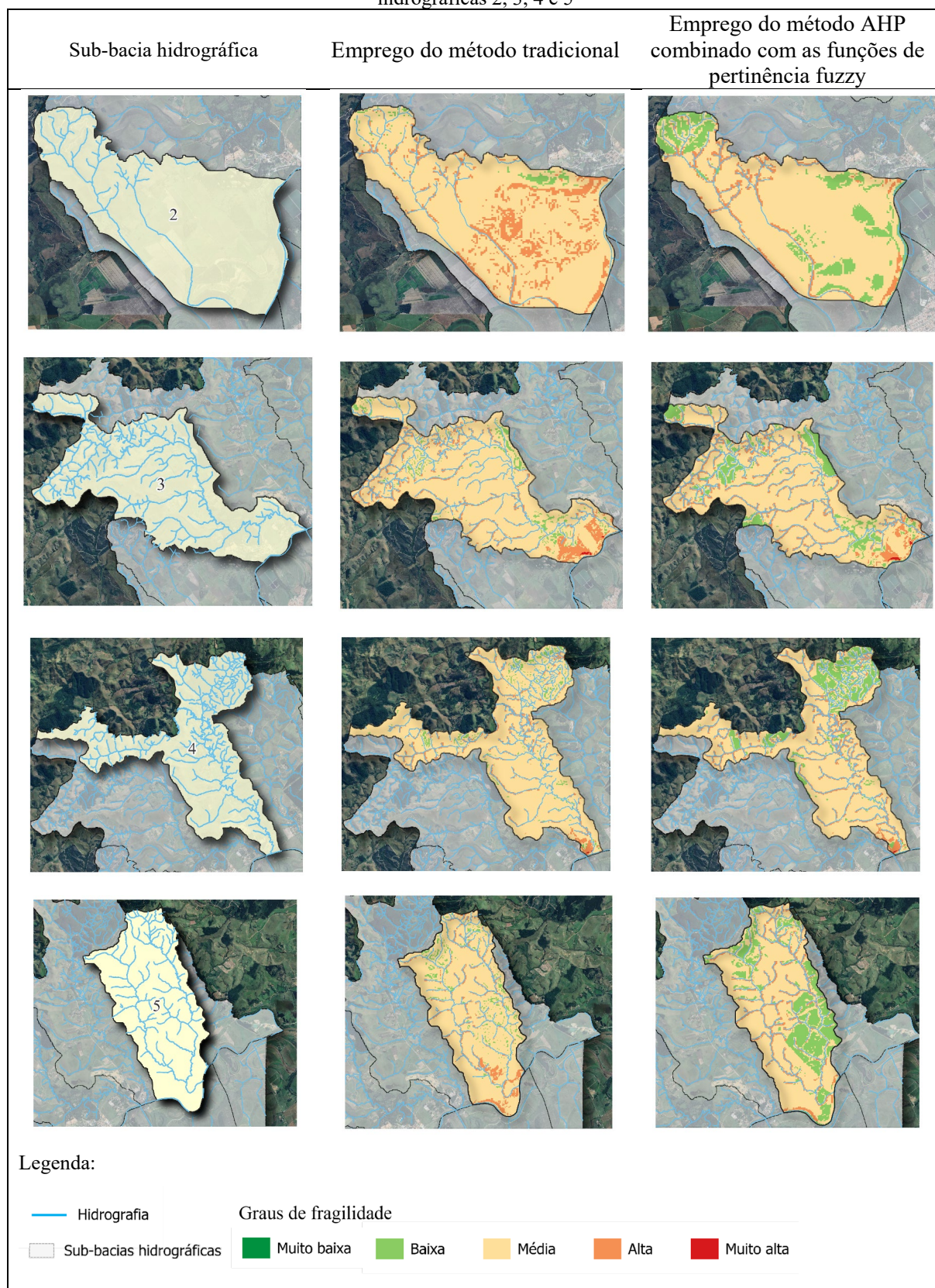
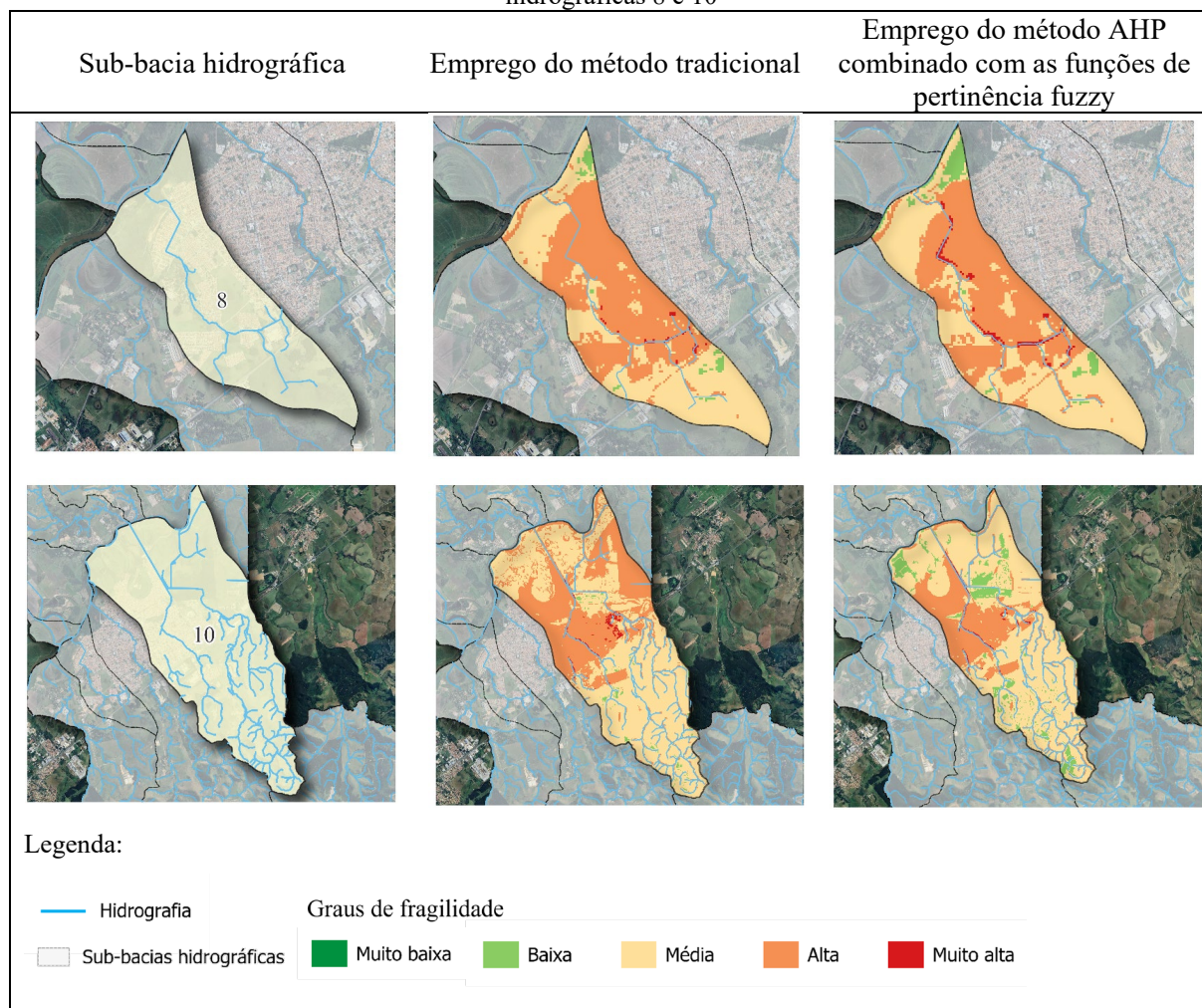


Figura 5.17– Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 8 e 10

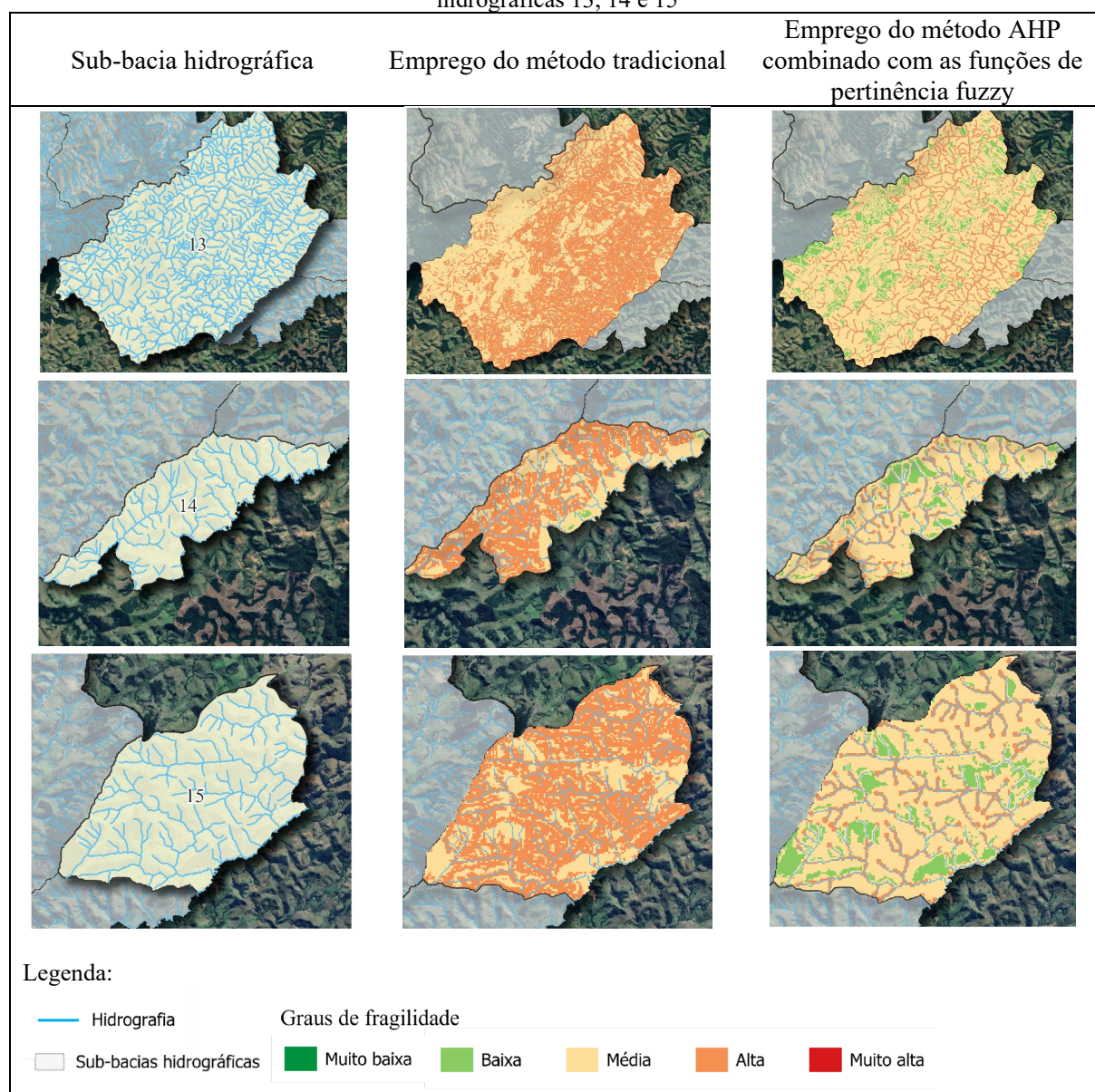


Nas sub-bacias 13, 14 e 15, o grau de alta fragilidade ocupou áreas significativamente maiores no mapa gerado pelo método tradicional, abrangendo mais da metade da extensão dessas sub-bacias. No entanto, com a aplicação do método AHP, observou-se uma mudança substancial na distribuição das classes de fragilidade: as áreas de alta fragilidade passaram a se concentrar principalmente nas regiões de delimitação das APPs, enquanto novas áreas de baixa fragilidade foram identificadas, especialmente em regiões de vegetação florestal. Como resultado, grande parte do território dessas sub-bacias foi reclassificada como de fragilidade média, evidenciando uma distribuição mais equilibrada das classes e uma melhor identificação das diferentes feições ambientais (Figura 5.18).

Em relação aos temas ambientais, constatou-se que a pedologia concentrou, individualmente, a maior proporção de áreas com fragilidade elevada (alta ou muito alta), especialmente devido à presença de gleissolos melânicos e áreas urbanas, classificadas como de fragilidade muito alta e correspondentes a 12,8% do território municipal. Além disso, os

cambissolos háplicos, que abrangem 24,6% do território, foram classificados com fragilidade alta. Dessa forma, aproximadamente 37,4% da área total foi considerada de alta ou muito alta fragilidade, tomando apenas o tema pedologia, o que a torna a variável mais crítica de forma isolada. Contudo, na matriz AHP, esse tema ocupou a terceira posição em importância relativa (peso 0,147), atrás dos temas APP e cobertura e uso do solo. Isso indica que, embora não tenha sido o fator de maior peso no modelo, sua relevância foi reconhecida.

Figura 5.18– Comparação da fragilidade entre os dois métodos empregados na pesquisa para as sub-bacias hidrográficas 13, 14 e 15



Durante a aplicação do método AHP, a APP foi o tema com maior peso relativo (0,337), o que é tecnicamente justificável diante de sua relevância ecológica e respaldo legal. Apesar do peso elevado, não houve aumento desproporcional da fragilidade nas áreas correspondentes, já

que as APPs ocupam uma porção mais restrita do território em comparação com temas como a pedologia, que se distribui de forma mais ampla e que, por isso, contribui significativamente para a delimitação das áreas frágeis mesmo com peso menor.

Assim, o fato de o método AHP ter atribuído maior peso ao tema APP não comprometeu a coerência ou fidelidade do mapa final, já que esse tema representa, de fato, uma área crítica, e seu peso elevado reflete sua importância técnica. Este método demonstrou equilíbrio ao permitir que variáveis como o tipo de solo continuassem a exercer influência significativa sobre os resultados, considerando a extensão e gravidade das fragilidades associadas.

No que tange às APPs, suas principais fragilidades relacionam-se à função ecológica que desempenham, como a proteção de corpos hídricos, encostas e áreas com vegetação nativa remanescente – regiões naturalmente mais suscetíveis à degradação ambiental. Quando essas áreas sofrem intervenções irregulares ou uso inadequado do solo, apresentam alta vulnerabilidade, justificando sua classificação como zonas de elevada fragilidade, mesmo que em menor extensão territorial. Nesse sentido, sua presença no modelo AHP contribuiu significativamente para a identificação e delimitação de áreas prioritárias voltadas à conservação e ao planejamento ambiental.

A aplicação das funções de pertinência fuzzy proporcionou uma abordagem mais contínua e realista para variáveis ambientais com comportamento gradual, como declividade e precipitação. Essas funções permitiram que um mesmo ponto do território fosse representado com graus distintos de pertinência a diferentes classes, contribuindo para uma transição mais suave entre os níveis de fragilidade e uma representação mais fiel da complexidade ambiental.

É importante destacar que, embora os temas declividade e precipitação tenham sido tratadas com funções de pertinência fuzzy, os efeitos observados foram diferentes. No caso da declividade, foi utilizada uma função linear crescente aplicada a dados que já apresentavam uma variação contínua e bem distribuída e, portanto, a transformação fuzzy teve pouco impacto nas classificações finais de fragilidade. Em outras palavras, os valores já estavam organizados de forma gradual, e a função apenas refinou esse padrão. Por outro lado, a aplicação da função fuzzy linear decrescente para no mapa de pluviometria apresentou uma distribuição espacial mais expressiva que atribui maior fragilidade às áreas com menos precipitação. O resultado foi uma diferenciação mais evidente entre as regiões, destacando com mais clareza aquelas com menor índice pluviométrico. Essa diferença entre os temas evidencia que, além do tipo de função fuzzy utilizada, é fundamental considerar as características e a forma como os dados se distribuem no território.

Vale ressaltar ainda que neste trabalho não foi utilizada a lógica fuzzy em sua totalidade, ou seja, não se aplicou um sistema de inferência fuzzy completo com regras linguísticas, operadores fuzzy, composição de regras e defuzzificação dos resultados. Foram empregadas apenas as funções de pertinência isoladamente, como forma de atribuir valores contínuos às variáveis ambientais com base em seu comportamento gradual. Essa escolha metodológica, embora não represente a aplicação completa da lógica fuzzy, já demonstrou ganhos consideráveis na suavização das fronteiras entre classes de fragilidade e na precisão das análises espaciais e com isso, foi possível identificar com maior refinamento áreas críticas e captar nuances territoriais que métodos de classificação tradicionais tendem a desconsiderar.

Perante o exposto, pode-se inferir que o método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy mostrou-se mais sensível às variações locais do ambiente, destacando com maior precisão as áreas com vegetação e refletindo melhor a realidade ecológica do município de Lorena e suas sub-bacias analisadas.

A hipótese da pesquisa afirmava que o uso de funções de pertinência fuzzy, em combinação com o método AHP, proporcionaria uma descrição mais completa e precisa da fragilidade ambiental e hídrica nas sub-bacias hidrográficas de Lorena, superando a abordagem tradicional baseada na média aritmética. Com base nas análises comparativas e nos mapas resultantes, pode-se afirmar que essa hipótese foi confirmada. A integração das funções de pertinência fuzzy com o método AHP permitiu uma representação mais gradual e realista da fragilidade ambiental, captando com maior precisão as transições entre diferentes condições, o que é particularmente relevante em paisagens com usos mistos do solo, como pastagem, floresta, agricultura e áreas urbanas — características presentes no município de Lorena.

Ademais, ao ponderar as variáveis conforme sua relevância ambiental, o AHP resultou em um mapa mais alinhado às problemáticas locais, destacando, por exemplo:

- a importância da cobertura vegetal na redução da fragilidade;
- a pressão antrópica como fator determinante em áreas de alta e muito alta fragilidade;
- a representação mais fiel de APPs degradadas e áreas com intensa ocupação urbana.

Portanto, mesmo sem a aplicação completa da lógica fuzzy, o uso das funções de pertinência já representou um avanço metodológico expressivo. O produto final mostrou-se mais sensível, analiticamente robusto e útil para o planejamento ambiental e a conservação dos recursos hídricos, atendendo aos objetivos propostos pela pesquisa.

Além disso, o emprego das funções de pertinência e do método AHP incorporou conhecimento técnico e científico ao processo de definição dos pesos dos temas, resultando em um produto final com maior precisão e resolução — aspectos essenciais para uma gestão ambiental eficaz e sensível às dinâmicas locais. Ao evidenciar zonas prioritárias para conservação e mitigação de impactos, os métodos utilizados, embora mais complexos e exigentes em termos de tempo e organização, agregaram valor científico e prático, consolidando-se como ferramentas altamente recomendadas para políticas públicas e planejamento ambiental de qualidade.

5.3.4. Orientações para o planejamento e gestão ambiental do município de Lorena

Os mapas de fragilidade ambiental e hídrica, especialmente aquele resultante da combinação das funções de pertinência fuzzy com o método AHP, demonstram elevado potencial para subsidiar o planejamento e a gestão territorial do município de Lorena. A capacidade dessa última metodologia em captar nuances e transições ambientais permite uma leitura mais fiel da realidade ecológica, oferecendo um instrumento técnico qualificado e sensível às dinâmicas locais, capaz de orientar decisões voltadas à conservação dos recursos hídricos e ao uso sustentável do solo.

A partir da análise dos graus de fragilidade identificados, é possível sugerir algumas diretrizes para subsidiar o planejamento ambiental. Em primeiro lugar, as áreas classificadas como baixa fragilidade devem ser entendidas como espaços com maior estabilidade ambiental relativa, muitas vezes, associadas à presença de vegetação nativa ou reflorestamento. Por essa razão, não devem ser vistas como zonas preferenciais para expansão urbana ou ocupações antrópicas, mas sim como áreas estratégicas para conservação preventiva, a fim de manter sua integridade ecológica e os serviços ambientais que prestam, principalmente quando se trata da vegetação nativa. O eventual uso dessas áreas deve ser cuidadosamente avaliado, sendo limitado a atividades de baixo impacto ambiental e compatíveis com a manutenção de suas funções ecológicas, sempre respaldadas por planejamento técnico e instrumentos de licenciamento ambiental. Isso porque, mesmo áreas de menor fragilidade podem perder rapidamente sua estabilidade caso submetidas a pressões antrópicas desordenadas.

Por outro lado, observou-se que muitas das áreas atualmente ocupadas, especialmente por usos urbanos e agropecuários, encontram-se em regiões classificadas como de alta ou muito alta fragilidade. Isso evidencia um processo histórico de ocupação desordenada, em que a

fragilidade ambiental não foi considerada como critério para expansão urbana ou uso produtivo do território. De modo particular, as sub-bacias 8, 10 e 13 exemplificam essa condição, revelando que a fragilidade não é apenas uma característica natural, mas frequentemente acentuada pela ação humana. Nessas áreas, torna-se urgente a implementação de ações de recuperação ambiental, tais como: recomposição de matas ciliares; implantação de sistemas agroflorestais em áreas de uso rural; controle de erosão em encostas por meio de terraceamento e práticas conservacionistas.

Em relação às APPs, mesmo ocupando menor extensão territorial, sua relevância ecológica se confirmou nos resultados, evidenciando que essas áreas continuam desempenhando importante papel na regulação hídrica, estabilização do solo e conservação da biodiversidade. No entanto, várias APPs se encontram atualmente degradadas ou ocupadas irregularmente, como demonstrado nas sub-bacias 8 e 10, comprometendo sua funcionalidade. Assim, a recuperação e a proteção efetiva das APPs devem ser tratadas como prioridade no planejamento ambiental, com ações como: fiscalização ambiental e regularização fundiária; fomento à adesão a programas de regularização ambiental; incentivo a projetos de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) voltados à conservação de nascentes e matas ciliares; busca de recursos financeiros federais e estaduais para restauração florestal, entre outros.

Além disso, o mapa de fragilidade pode ser utilizado pela administração pública como ferramenta estratégica de apoio ao planejamento territorial. Sua aplicação é especialmente relevante na revisão do Plano Diretor, no zoneamento ambiental do município e na formulação ou atualização de instrumentos como o Plano Municipal de Conservação da Mata Atlântica e um eventual Plano Municipal de Recursos Hídricos. Também pode orientar a delimitação de áreas prioritárias para conservação e recuperação ambiental, bem como ações de monitoramento e incentivo à adoção de práticas sustentáveis.

Cabe destacar que a análise integrada da fragilidade ambiental deve ser interpretada não como uma proibição absoluta ao uso humano, mas como uma ferramenta de orientação técnica, indicando os graus de sensibilidade e os cuidados necessários a cada tipo de intervenção. Desse modo, o mapa elaborado se configura como um diagnóstico espacial fundamentado, útil tanto para ações corretivas quanto para políticas de planejamento em longo prazo.

Portanto, a principal contribuição do mapa de fragilidade — especialmente na versão gerada por meio do método AHP combinado com as funções de pertinência fuzzy — é sua capacidade de orientar o uso e ocupação do solo de forma mais racional, ambientalmente adequada e responsável. Ao promover o equilíbrio entre desenvolvimento e conservação, esse instrumento viabiliza a construção de uma nova cultura de planejamento territorial, mais

sensível às dinâmicas naturais e sociais do município. Além disso, ao identificar com maior precisão as áreas críticas e as regiões estratégicas para preservação, o mapa se consolida como uma ferramenta essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos, contribuindo diretamente para a proteção das nascentes, da qualidade da água, das áreas de preservação permanente e da funcionalidade ecológica das bacias hidrográficas.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa teve como objetivo analisar a fragilidade ambiental e hídrica do município de Lorena/SP, por meio da comparação entre dois métodos de avaliação espacial: o método tradicional, baseado na média aritmética simples, e o método AHP combinado com funções de pertinência fuzzy. A proposta visou identificar e compreender a distribuição das áreas frágeis e contribuir, por meio de instrumentos metodológicos e produtos (mapas) para o apoio ao planejamento e gestão ambiental e a conservação dos recursos hídricos nas sub-bacias do município.

Os resultados evidenciaram diferenças entre as abordagens metodológicas. O método tradicional apresentou uma tendência à homogeneização dos dados, com predominância da classe de fragilidade média e pouca representação das classes extremas, o que resultou em uma suavização da realidade ambiental. Já o método AHP combinado com funções de pertinência fuzzy, ao atribuir pesos diferenciados às variáveis com base em sua relevância ecológica, permitiu uma leitura mais detalhada e ajustada das condições do território, destacando com maior precisão áreas de formação florestal e zonas sob intensa pressão antrópica.

As sub-bacias hidrográficas analisadas demonstraram que o método AHP foi mais eficaz em identificar nuances espaciais, especialmente ao evidenciar a importância de variáveis como a cobertura e uso do solo e as delimitações de APPs. Sub-bacias com presença de vegetação nativa e baixa ocupação mostraram-se menos frágeis, enquanto regiões com adensamento urbano e uso inadequado do solo apresentaram maior fragilidade, o que foi reforçado pelas classificações obtidas.

Entre os temas ambientais avaliados, a pedologia destacou-se por conter a maior proporção de áreas classificadas com grau de fragilidade alta ou muito alta, refletindo o papel determinante dos tipos de solo, como os gleissolos melânicos e cambissolos háplicos, na vulnerabilidade ambiental local. Contudo, na estrutura de pesos definida pelo AHP, o tema mais influente foi APP, seguido da cobertura e uso do solo, revelando um modelo de análise que equilibra critérios técnicos, ecológicos e legais e também fatores naturais e de ocupação.

A hipótese da pesquisa, de que a aplicação conjunta das funções de pertinência fuzzy e do método AHP proporcionaria uma representação mais precisa da fragilidade ambiental, foi confirmada. O modelo proposto mostrou-se capaz de captar transições graduais entre zonas de fragilidade e retratar de maneira mais fiel a complexidade ambiental do município de Lorena. A integração dessas abordagens ofereceu uma alternativa mais robusta em relação à média aritmética, fornecendo um produto cartográfico de maior valor analítico e de maior qualidade.

Além do avanço técnico, os resultados possuem implicações práticas importantes. O mapa final gerado pelo modelo AHP poderá subsidiar ações de planejamento e gestão ambiental, orientando intervenções mais eficazes e localizadas, sobretudo em áreas de maior fragilidade. A delimitação precisa dessas regiões contribui para estratégias de conservação dos recursos hídricos, mitigação de impactos e definição de políticas públicas ambientais.

É relevante destacar que o presente estudo contou com a participação de profissionais oriundos de diferentes regiões do país, o que proporcionou uma análise da matriz AHP a partir de uma perspectiva mais ampla, desvinculada de especificidades locais do município de Lorena. Essa abordagem permitiu que o método AHP utilizado seja considerado como uma estrutura metodológica replicável em diferentes contextos territoriais. No entanto, recomenda-se que, em aplicações futuras, sejam elaboradas matrizes de comparação ajustadas às particularidades ambientais e territoriais do recorte espacial analisado, de modo a refletir com maior fidelidade as especificidades locais. Essa adaptação contribui para a ampliação da aplicabilidade do método, fortalecendo sua capacidade de apoiar o planejamento ambiental em distintas realidades regionais

Portanto, a adoção de métodos multicritério e lógicas fuzzy representa uma metodologia relevante, especialmente em contextos territoriais marcados pela heterogeneidade do uso do solo e pela crescente pressão sobre os recursos naturais. Apesar de demandarem maior organização, conhecimento técnico e tempo de processamento, esses métodos oferecem ganhos expressivos em termos de precisão e confiabilidade, tornando-se ferramentas recomendadas para estudos ambientais, planejamento urbano e gestão integrada de bacias hidrográficas.

Para avanços em estudos posteriores, sugere-se o aprofundamento no uso da lógica fuzzy em sua totalidade, visando obter resultados ainda mais refinados na avaliação da fragilidade ambiental, capturando de maneira mais precisa as transições entre diferentes condições do meio. Além disso, recomenda-se a ampliação da base de dados utilizada, incorporando variáveis climáticas, bem como a uniformização das escalas, o que possibilitaria uma análise ainda mais abrangente e precisa da fragilidade ambiental e hídrica.

Como outra sugestão para pesquisas futuras, destaca-se a importância de incorporar o atual contexto de mudanças climáticas, considerando especialmente a ocorrência de chuvas intensas na elaboração dos mapas de fragilidade ambiental, em complemento ao cenário de escassez hídrica adotado neste estudo. Essa abordagem amplia a capacidade de avaliação de riscos — tanto ambientais quanto sociais — e contribui para um planejamento territorial mais resiliente e adaptativo à realidade local, sobretudo com enfoque na área urbana e nos riscos sociais associados.

Também é recomendada a reavaliação dos valores atribuídos às classes de uso e cobertura do solo, com especial atenção à silvicultura. Recomenda-se que espécies exóticas de rápido crescimento, como o eucalipto, sejam tratadas com graus de fragilidade diferenciados, uma vez que estudos indicam que essas culturas podem ter efeitos negativos sobre a conservação dos recursos hídricos, devido à elevada demanda hídrica e ao impacto na dinâmica do solo e da biodiversidade. No presente estudo, os valores de fragilidade atribuídos às classes de uso do solo foram definidos com base em referências da literatura, o que resultou na classificação da silvicultura como área de média fragilidade devido somente à sua associação como cobertura vegetal para a proteção de solo. Assim, seria relevante, em estudos futuros, simular a atribuição de valores mais elevados a essa classe, com o intuito de verificar em que medida tal reclassificação impactaria a configuração final do mapa de fragilidade ambiental. Essa análise contribuiria para uma representação mais sensível aos potenciais efeitos ambientais negativos associados a esse tipo de cobertura vegetal.

Por fim, uma diretriz estratégica para estudos é a elaboração de um zoneamento ambiental das sub-bacias hidrográficas estudadas. Esse instrumento pode subsidiar políticas públicas voltadas à gestão territorial e ambiental, como o Plano Diretor Municipal, o Plano de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica e outros documentos, orientando ações de conservação, recuperação de áreas degradadas e uso sustentável dos recursos naturais. Nesse contexto, o mapa de fragilidade pode ser utilizado como base técnica para esse zoneamento, auxiliando na definição de áreas de preservação, de uso restrito ou com potencial para recuperação, além de apoiar o planejamento de ações preventivas em regiões vulneráveis à degradação ambiental e hídrica.

REFERÊNCIAS

- ANPLA – Ampla Assessoria e Planejamento Ltda. **Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos**: Produto 6 – Versão final do PMGIRS. Lorena: Prefeitura Municipal de Lorena, 2016.
- ALDERSON, P.; GREEN, S., HIGGINS, J. P. T. *Cochrane Reviewers' Handbook 4.2.1*. Chichester: John Wiley & Sons, 2004.
- ALMEIDA, A. T. **Processo de Decisão nas Organizações**: Construindo Modelos de Decisão Multicritério. São Paulo: Atlas, 2013. 256 p.
- ALPINO, T. A.; SENA, A. R. M.; FREITAS, C. M. Desastres relacionados à seca e saúde coletiva – uma revisão da literatura científica. **Ciência & Saúde Coletiva**, v.21, n 3, p. 809 - 820, 2016.
- AMARAL, R.; ROSS, J. L. S. As unidades ecodinâmicas na análise da fragilidade ambiental do Parque Estadual do Morro do Diabo e entorno, Teodoro Sampaio/SP. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 26, p. 59-78, 2009.
- AMORIM, A. T.; LOPES, E. R. N.; SOUSA, J. A. P.; SILVA, R. C. F.; SOUZA, J. C.; LOURENÇO, W. L. Geomorphometric environmental fragility of a watershed: a multicriteria spatial approach. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n.12, p. 850, 2021.
- AMARAL, R. T. S. **A transformação da várzea do Vale do Paraíba Paulista em espaço econômico: um olhar sobre a arquitetura vernacular**. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Desenvolvimento Regional) - Departamento de Economia, Contabilidade e Administração da Universidade de Taubaté, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2016.
- ANJINHO P. S.; BARBOSA M.; COSTA C. W.; MAUAD, F. F. Environmental fragility analysis in reservoir drainage basin land use planning: a Brazilian basin case study. **Land Use Policy**, v. 100, n. 104946, 2021.
- ARCASSA, W. S. **A natureza da Geografia em Richard Hartshorne**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Estadual de Londrina (UEL), Londrina, 2018.
- AVELLAR, R. G. **Rio Paraíba do Sul – Sua Importância como recurso hídrico e os impactos de sua exploração em relação aos usos múltiplos**. Trabalho final. (Tecnólogo em Gestão Ambiental) - Departamento de Educação Superior do CEFET/RJ - Rio de Janeiro, 2015.
- BĄCZKIEWICZ, A.; WĄTROBSKI, J.; KIZIELEWICZ, B.; SAŁABUN, W. Towards Objectification of Multi-Criteria Assessments: a Comparative Study on MCDA Methods. **Proceedings of the 16th Conference on Computer Science and Intelligence Systems**, v. 25, p. 417-425, 2021.
- BANA E. COSTA, C. MACBETH - An interactive path towards the construction of cardinal value functions. **International Transactions in Operational Research**, v. 1, n. 4, p. 489 – 500, 1994.

BAPTISTELLI, S. C.; JANUARIO, G. F.; CAMPOS, M. R. F. Comparação técnico-econômica e ambiental de alternativas no PDAA utilizando o método AHP - Analytic Hierarchy Process. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, ABES. 30. 16 a 19 de junho, Natal, RN, 2019. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2019.

BARGOS, D. C.; LAGO, G. M. T.; FERRAZ, F. Geotecnologias aplicadas ao mapeamento e classificação das formas de uso da terra na área de preservação permanente da microbacia do Ribeirão dos Passos (Lorena-SP). **Caminhos de Geografia**: Uberlândia, v. 18, n. 64, p. 47–59, 2017.

BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial**: conceitos, modelos e instrumentos. São Paulo: Saraiva, 2007.

BARGER, N. N., GARDNER, T. A., SANKARAN, M., BELNAP, J., BROADHURST, L., BROCHIER, V., ISBELL, F., MEYFROIDT, P., MOREIRA, F., NIEMINEN, T. M., OKURO, T., RODRIGUES, R. R., SAXENA, V., ROSS, M. Chapter 3: Direct and indirect drivers of land degradation and restoration. In IPBES (2018): **The IPBES assessment report on land degradation and restoration**. MONTANARELLA, L., SCHOLLES, R., BRAINICH, A. (eds.). Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany, p. 137-218, 2018.

BARROCAS, V. C.; RODRIGUES, J. M.; MEIRELES, M. L. L. N. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Distrito Federal**. Caderno Técnico: SEMA, Distrito Federal, 2017.

BARROS, L. C.; FERNANDES, V. F. **Introdução à Teoria Fuzzy** - Notas de Aula. Campinas, 2019.

BELTON, V.; STEWART, T. J. **Multiple criteria decision analysis**: an integrated approach. Massachusetts: Springer Science & Business Media, 2002.

BONNA, J. L. **Mapeamento pedológico e de suscetibilidade erosiva no Alto Córrego Prata (Ouro Preto-MG)**. Dissertação (Mestrado em Geografia com ênfase em Análise Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

BORN, R. H. **Agenda 21 e a biodiversidade (Caderno de debate agenda 21 e sustentabilidade)**. Brasília: MMA, 2006. p. 23. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/CadernodeDebates9.pdf. Acesso em 07 de janeiro de 2024.

BOSCHET, C.; RAMBONILAZA, M. Integrating water resource management and land-use planning at the rural-urban interface: insights from a political economy approach. **Water Resources and Economics**, [s. l.], v. 9, p. 45-59, 2015.

BOTELHO, R. R. L.; CUNHA, C. C. A.; MACEDO, M. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, Belo Horizonte, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

BOUYSSOU, D.; MARCHANT, T.; PIRLOT, M.; PERNY, P.; TSOUKIAS, A.; VINCKE, P. **Evaluation models: a critical perspective**. Boston: Springer Science & Business Media, 2000.

BRANS, J. P., & VINCKE, P. (1985). A Preference Ranking Organisation Method: The PROMETHEE Method for Multiple Criteria Decision-Making. **Management Science**, v. 31, n. (6), p. 647–656, 1985.

BRANS, J. P.; VINCKE, P.; MARESCHAL, B. How to select and how to rank projects: The Promethee method. **European Journal of Operational Research**, v. 24, n. 2, p. 228–238, 1986.

BRASIL. **Lei 6.938, de 31 de agosto de 1981 (Política Nacional de Meio Ambiente)**. Brasília. Diário Oficial da União. 1981. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em 18 de novembro de 2023.

BRASIL. **Lei 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (Política Nacional de Recursos Hídricos)**. Brasília. Diário Oficial da União. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em 18 de novembro de 2023.

BRASIL. **Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001 (Estatuto das Cidades)**. Brasília. Diário Oficial da União. 2001. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/leis_2001/l10257.htm. Acesso em 19 de novembro de 2023.

BRASIL. **Decreto nº 4.297, de 10 de julho de 2002**. Brasília. Diário Oficial da União. 2002. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/2002/d4297.htm. Acesso em 19 de novembro de 2023.

BRASIL. **Lei Complementar nº 140, de 8 de dezembro de 2011**. Brasília. Diário Oficial da União. 2011. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/lcp/lcp140.htm. Acesso em 22 de novembro de 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos. Departamento de Ciência e Tecnologia. **Diretrizes metodológicas: elaboração de revisão sistemática e metanálise de ensaios clínicos randomizados**/ Ministério da Saúde, Secretaria de Ciência, Tecnologia e Insumos Estratégicos, Departamento de Ciência e Tecnologia. – Brasília: Editora do Ministério da Saúde, 2012.

BROWN, A. E.; ZHANG, L.; MCMAHON, T. A.; WESTERN, A. W.; VERTESSY, R. A. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. **Journal of Hydrology**, v. 310, p. 28–61, 2005.

BRESSANE, A.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M.; MOCHIZUKI, P. S.; MARTINS, A. C. G.; MEDEIROS, G. A.; PECHE FILHO, A.; RIBEIRO, A. I. Aplicação do processo analítico hierárquico na construção de um sistema fuzzy de apoio ao planejamento do uso futuro na recuperação de áreas degradadas: estudo de uma cava mineral na Serra do Japi. São Paulo, UNESP, **Geociências**, v. 34, n. 1, p. 88-102, 2015.

BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. Finland: SpringerBriefs in Operations Research, 2015.

BURSZTYN, M. A.; BURSZTYN, M. **Fundamentos de política e gestão ambiental: caminhos para a sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Garamond, 2012.

CAGGY, A. L., ALMEIDA, E. S. AHP & fuzzy logic hybrid method for decision making in project management in a forestry industry. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 2, e4225, 2020.

CAMPOS, J. A.; SILVA, D. D.; MOREIRA, M. C.; FILHO, F. C. M. M. Environmental fragility and land use capacity as instruments of environmental planning, Caratinga River basin, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 264, 2021.

CAMPOS, J. A.; SILVA, D. D.; FILHO, E. I. F.; PIRES, G. F.; AMORIM, R. S. S.; FILHO, F. C. M. M.; RIBEIRO, C. B. M.; ULIANA, E. M.; AIRES, U. R. V. Environmental vulnerability assessment of the Doce River basin, southeastern Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 9, p. 1119, 2023.

CASTELO, A. F. M.; MARQUESAN, F. F. S.; SILVA, J. B. A problemática das políticas públicas ambientais no Brasil. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, [s. l.], v. 38, n. 2, p. 180-199, mai./ago. 2021. Disponível em: <https://periodicos.furg.br/remea/article/view/12617/9009>, Acesso em 23 de novembro de 2023.

CASTRO, J. de S.; COSTA, L. S.; BARBOSA, G. R.; ASSEMAN, P. P.; CALIJURI, M. L. Utilização de SIG e análise multicritério para seleção de áreas com potencial para a construção de universidades e loteamentos universitários. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 21, n 3, p. 652 - 657, 2015.

CASTRO, C. M.; LEMOS, C. C. **Planejamento ambiental**. Volume único. Rio de Janeiro: Fundação Cecierj, 2016.

CHUNG, C. F.; FABBRI A.G. Prediction models for landslide hazard zonation using a fuzzy set approach. *Geomorphology and Environmental Impact Assessment*, Balkema, Lisse. **The Netherlands**, p. 31–47, 2001.

CONSÓRCIO ENGECORPS-MAUBERTEC. **Revisão/Atualização de planos municipais de saneamento específicos dos serviços de abastecimento de água potável e esgotamento sanitário, dos municípios regulados e fiscalizados pela ARSESP**. Produto 2 (P2) – Revisão/Atualização dos Planos Municipais de Saneamento Básico dos Serviços de Abastecimento de Água Potável e Esgotamento Sanitário Município – Lorena – Bloco 01, UGRHI 02 – Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, São Paulo: Secretaria Estadual de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2022.

COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; LUCENA, A. M. P.; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.

COSTA C. W.; PIGA, F. G.; MORAES, M. C. P.; DORICI, M.; SANGUINETTO, E. C.; LOLLO, J. A.; MOSCHINI, L. E.; LORANDI, R.; Oliveira, L. J. Fragilidade ambiental e

escassez hídrica em bacias hidrográficas: Manancial do Rio das Araras – Araras, SP, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 946 – 958, 2015.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José do Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001.

CRISPIM, A. B.; SOUZA, M. J. N.; LOURENÇO, R. M. Relação sociedade/natureza, fragilidade e degradação ambiental: bases conceituais para os estudos ambientais. **Revista Geonordeste**, São Cristóvão, Ano XXV, n. 3, p. 24-39, 2014.

CRUZ, D. K. A.; NÓBREGA, A. A.; MONTENEGRO, M. M. S.; PEREIRA, V. O. M. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e as fontes de dados para o monitoramento das metas no Brasil. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, Brasília, 31, 2022.

D'ELBOUX, R. Uma promenade nos trópicos: os barões do café sob as palmeiras-imperiais, entre o Rio de Janeiro e São Paulo. **Anais do Museu Paulista**, v. 14, n. 2, p. 193-250, 2006.

DALTROZO, C. C. **Zoneamento ambiental em bacias hidrográficas**. Estudo de caso: zoneamento ambiental da microbacia hidrográfica das nascentes do Rio Ibicui Mirim até a barragem Saturnino de Brito. Dissertação (Mestrado em Geomática) - Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2008.

DIBIESO, E. P. **Planejamento ambiental e gestão dos recursos hídricos: estudo aplicado à bacia hidrográfica do manancial do alto curso do rio Santo Anastácio – São Paulo/Brasil**. Tese (Programa de Pós-graduação em Geografia) - Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo, 2013.

DONHA, A. G.; SOUZA, L. C. de P.; SUGAMOSTO, M. L. Determinação da fragilidade ambiental utilizando técnicas de suporte à decisão e SIG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.1, p.175–181, 2006.

EDWARDS, W.; BARRON, F. H. SMARTS and SMARTER: Improved Simple Methods for Multiattribute Utility Measurement. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, v. 60, n. 3, p. 306–325, 1994.

Embrapa, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Súmula da X Reunião Técnica de levantamento de solos**. Reunião técnica de levantamento de Solos, Rio de Janeiro: Embrapa, 1979.

EVANGELISTA, J. G. Alguns aspectos de Lorena nos meados do século XIX (1850-1869). **Revista de História**, São Paulo, v. 26, n. 54, 1963.

EYERKAUFER, M. L.; SEDLACEK, A. C.; MOSER P.; FABRE, V. V. Planejamento estratégico para desenvolvimento sustentáveis local sob a ótica da governança pública. **Revista Gestão e Planejamento**, Salvador, v. 21, p. 397-415, 2020.

FAVRETTO, J.; NOTAR, L. A. Utilização da metodologia Analytic Hierarchy Process (AHP) a definição de um software acadêmico para uma instituição de ensino superior do oeste catarinense. *Revista Eletrônica Sistemas & Gestão*, v. 11, n. 2, p 183-191, 2016.

FERREIRA, C. C. F.; MIRANDOLA, P. H.; SAKAMOTO, A. Y.; GONÇALVES, F. Uso de SIG para análise da vulnerabilidade ambiental da Bacia do Alto Sucuriú – MS/BR. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO- SBSR. XV. 30 de abril a 05 de maio de 2011, Curitiba. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2011, p. 1171.

FERREIRA, M. B. M.; SALLES, A. O. T. Política Ambiental Brasileira: análise histórico inconstitucionalista das principais abordagens estratégicas. **Revista de Economia**, Curitiba/PR, v. 43, n. 2, 2016.

FERREIRA, P. S.; SILVA, C. A. O método AHP e a álgebra de mapas para determinar a fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Brilhante (Mato Grosso do Sul /Brasil), proposições para a gestão do território. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, v. 46, 2020.

FERREIRA, R. R. M.; TAVARES FILHO, J.; FERREIRA, V. M.; RALISCH, R. **Estabilidade física de solo sob diferentes manejos de pastagem extensiva em cambissolo. Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 3, p. 531-538, 2010.

FERREIRA, V. O. A abordagem da paisagem no âmbito dos estudos ambientais integrados. **GeoTextos**, v. 6, n. 2, p. 187-208, 2010.

FRANÇA, L. C. J.; MUCIDA, D. P.; SANTANA, R. C; MORAIS, M. S.; GOMIDE, L. R. BATEIRA, C. V. M. AHP approach applied to multi-criteria decisions in environmental fragility mapping. **FLORESTA**, Curitiba, v. 50, n. 3, p. 1623 - 1632, 2020.

FRANÇA, L. C. J.; LOPES, L. F.; MORAIS, M. S.; LISBOA, G. S.; ROCHA, S. J. S.; MOARAIS JUNIOR, V. T. M.; SANTANA, R. C.; MUCIDA, D. P. Environmental Fragility Zoning Using GIS and AHP Modeling: Perspectives for the Conservation of Natural Ecosystems in Brazil. **Conservation**, v. 2, p. 349–366, 2022.

FLORIANO, E. P. **Políticas de gestão ambiental**. 3 ed. Santa Maria: UFSM-DCF, 2007.

FREITAS, A. L. P.; MARINS, C. S.; SOUZA, D. de O. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. **GEPROS – Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, [s. l.], ano 1, n. 3, 2006.

GABERŠČIK, A.; MURLIS, J. The role of vegetation in the water cycle. **Ecohydrology and Hydrobiology**, [s. l.], v. 11, n. 3–4, p. 175–181, 2011.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. **LOGEION: Filosofia da informação**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p. 57-73, set. 2019/fev. 2020.

GOMEDE, E.; BARROS, R. M. Utilizando o Método Analytic Hierarchy Process (AHP) para a priorização de Serviços de TI: Um Estudo de Caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE

INFORMAÇÃO (SBSI). VII. 16 a 18 de maio de 2012, São Paulo. **Anais [...]**, Porto Alegre: SBC, p. 408-419, 2012.

GOMES, C. F. S.; SANTOS, M.; SOUZA, H. H.; SANSEVERINO, A. M.; MELLO, M. H. S. Formação de um portfólio de projetos de TI: uma abordagem multicritério. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, XLIX., 27 a 30 de agosto de 2017, Blumenau-SC. **Anais [...]**. Blumenau, 2017, p. 1249-1260.

GOMES, L. F. A. M.; ARAYA, M. C. G; CARIGNANO, C. **Tomada de decisões em cenários complexos**. São Paulo: Cengage Learning. 2004.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de Decisão Gerencial: Enfoque Multicritério**. São Paulo: Atlas, 2014.

GOMES, L. F. A. M.; LIMA, M. M. P. P. TODIM Basic and application to multicriteria ranking of projects with environmental impacts. **Foundations of Computing and Decision Sciences**, v. 16, n. 3-4, p. 113–127, 1991.

GOMES, L. F. A. M.; LIMA, M. M. P. P. From Modeling Individual Preferences to Multicriteria Ranking of Discrete Alternatives: A Look at Prospect Theory and the Additive Difference Model. **Foundations of Computing and Decision Sciences**, v. 17, n. 3, p. 171–184, 1992.

GOMES, R. C.; BIAS, E. S. Integração do método AHP e SIG como instrumento de análise do nível de conservação ambiental em áreas hidrográficas. **Geociências**, São Paulo, v. 37, n. 1, p. 167 - 182, 2018.

GREENE, R.; DEVILLERS, R.; LUTHER, J. E.; EDDY, B. G. GIS - Based Multiple-Criteria Decision Analysis. **Geography Compass**, v. 5, n. 6, p. 412–432, 2011.

GUIRRA, A. P. M. **Novas contribuições ao modelo de fragilidade ambiental à processos erosivos: estudo de caso aplicado ao perímetro urbano de Rondonópolis, Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Mato Grosso, Rondonópolis, 2017.

HARTSHORNE, R. **The Nature of Geography**. Lancaster: Association of American Geographers, 1939.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. **Cochrane handbook for systematic reviews of interventions**. Londres: The Cochrane Collaboration, version 5.1.0, 2011.

HWANG, C. L.; YOON, K. Multiple Attribute Decision Making. **Springer-Verlag**, v. 186, 1981.

ICMBio, Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Lorena**: Volume I – Diagnóstico, ICMBio: Lorena, 2016.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. SHUKLA, P. R.; SKEA, J.; CALVO BUENDIA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D. C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.;

NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PEREIRA, J. P.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J., **Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.** [s.l.] 2019. Disponível em <https://www.ipcc.ch/srccl/>. Acesso em 15 de janeiro de 2024

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Mapa Municipal.** Abril 2021. Disponível em https://geoftp.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/mapas_municipais/colecao_de_mapas_municipais/2020/SP/lorena/3527207_MM.pdf. Acesso em 15 de janeiro de 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Panorama.** IBGE Cidades, 2022. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/lorena/panorama>. Acesso em 15 de janeiro de 2024.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de áreas de alto e muito alto risco a deslizamentos e inundações do Município de Lorena, SP.** Relatório técnico, São Paulo: IPT, 2015.

ISHIZAKA, A., Comparison of Fuzzy logic, AHP, FAHP and Hybrid Fuzzy AHP for new supplier selection and its performance analysis. **International Journal of Integrated Supply Management**, v. 9, n. 1/2, p. 1-22, 2014.

JONES, T.; EVANS, D. Conducting a systematic review. **Australian Critical Care**, v. 13, n. 2, p. 66-71, 2000.

JORGE, L. A. B.; EUFRATE JUNIOR, H. J.; MARMONTEL, C. V. F. **Planejamento Ambiental**, São Carlos: Editora Cubo, 2020. (livro eletrônico). Disponível em: <https://doi.editoracubo.com.br/10.4322/978-65-86819-01-4>. Acesso em 03 de dezembro de 2023.

JUSTEN, A. F.; FROTA, M. B. Planejamento e políticas públicas: apontamentos sobre as limitações em países em desenvolvimento. In: Simpósio brasileiro iberoamericano em comércio internacional, desenvolvimento e integração regional, 8, 2017, Cerro Largo. **Anais [...]**. Cerro Largo: UFFS, 2017. p. 1087-1102. Disponível em: <https://www.uffs.edu.br/campi/cerro-largo/repositorio-ccl/anais-viii-simposio-iberoamericano-de-cooperacao-para-o-desenvolvimento-e-a-integracao-regional/planejamento-e-politicas-publicas-apontamentos-sobre-as-limitacoes-em-paises-em-desenvolvimento>. Acesso em 18 de novembro de 2023.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHUARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII., abril 2005, Goiânia-Go. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2203-2210.

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. Decisions with Multiple Objectives. Cambridge University Press., 1993.

KENSKI, V. M. Repensando a avaliação da aprendizagem. In: VEIGA, I. P. A (Org.) **Repensando a didática**. 23 ed. Campinas: Papirus, 2006.

KET, J. C. Os latossolos do Brasil: uma revisão. **GEONOMOS**, v. 5, n. 1, p. 17-40, 1997.

KOHAGURA, T. **Lógica Fuzzy e suas aplicações**. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) - Departamento de Computação da Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, 2007, f. 49.

KRUSCHE, F. B. **Aplicação de inteligência artificial na otimização e análise de incertezas em materiais compósitos laminados**. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), São Paulo, 2023.

LEANDRO, D. **Modelagem de fragilidade ambiental usando índices baseados em dados espaciais e com suporte de sistema especialista**. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

LEITE, L. C. O. F.; CORTINES, E. Análise da fragilidade ambiental da bacia hidrográfica do córrego Cantagalo, Três Rios, RJ – Brasil, **Geofronter**, Campo Grande, v. 10, p. 01-23, 2024.

LEMOS, R. S.; MAGALHÃES JR., A. P.; WSTNE, C. Planejamento e gestão territorial: reflexões a partir da modernidade, da ciência e da participação social. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 58, 2019.

LÍDER ENGENHARIA E GESTÃO DE CIDADES. **Revisão do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Lorena – SP: versão final**. Lorena: 2024.

LIMA, E. C. Planejamento ambiental em bacias hidrográficas semiáridas do nordeste brasileiro. **Revista Geociências Nordeste**, Caicó, v.6, n.2, p.91-94, 2020.

LIRA, K. C. S.; FRANCISCO, H. R.; FEIDEN, A. Classification of environmental fragility in watershed using Fuzzy logic and AHP method. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, MG, v. 34, 2022.

LOPES, J. L. S.; CESTARO, L. A.; KELTING, F. M. S. Zoneamento Ambiental como Instrumento de Suporte e Planejamento de Uso e Ocupação do Solo do Município de Quiraz/CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 04, p.738-747, 2011.

LOURO, C. A. de L.; MENEZES, J. O planejamento na gestão ambiental urbana dos municípios brasileiros. **Caderno de Estudos Geoambientais – CADEGEO**, v. 03, n. 01, p. 62-75, 2012.

LUSTOSA, M. C.; YOUNG, C. E. F. Política Ambiental. In: KUPFER, D. HASENCLEVER, L. (Org.). **Economia industrial**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. p. 341 – 352.

MALCZEWSKI, J. GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 20, n. 7, p. 703–726, 2006,

MARGULIS, S. **A regulamentação ambiental: instrumentos e implementação**. Texto para discussão nº 437. Rio de Janeiro: Ipea, 1998.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomass – Coleção 8.0 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Disponível em https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/initiatives/brasil/collection_8/lcluc/coverage/brasil_coverage_2022.tif. Acesso em 16 de março de 2024.

MARGULIS, S. **A regulamentação ambiental**: instrumentos e implementação. Texto para discussão nº 437. Rio de Janeiro: Ipea, 1998.

MARTINS, F. B.; ROCHA, J. S. M.; ROBAINA, A. D.; KURTZ, S. M. J. M.; KURTZ, F. C.; GARCIA, S. M.; SANTOS, A. H. O.; DILL, P. R. J.; NOAL, T. N. Zoneamento ambiental da sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS) (estudo de caso). **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 315-322, 2005.

MILARÉ, E. **Direito do Ambiente**. 10 ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2015.

MMA – Ministério do Meio Ambiente. **Áreas de Preservação Permanente Urbanas**. 2015, Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/areas-verdes-urbanas/%C3%A1reas-de-prote%C3%A7%C3%A3o-permanente.html>. Acesso em 16/02/2025.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Zoneamento Ambiental Municipal**: o meio ambiente contribuindo para o planejamento urbano. Brasília: MMA, 2018.

MOLTZ, H. L. N.; WALLACE, C. W.; SHARIFI, E; BENCALA, K. Integrating sustainable water resource management and land use decision-making. **Water**, v. 12, n. 2282, 2020.

MONOSOWSKI, E. Políticas ambientais e desenvolvimento no Brasil. **Cadernos FUNDAP**, São Paulo, p. 15-24, 1989.

MONTAÑO, M. **Os recursos hídricos e o zoneamento ambiental**: o caso do Município de São Carlos. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo, 2002.

MONTEIRO, J. A. F.; KAMALI, B.; SRINIVASAN, R.; ABBASPOUR, K.; GÜCKER, B. Modelling the effect of riparian vegetation restoration on sediment transport in a human-impacted Brazilian catchment. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1289–1303, 2016.

MOTA, S. **Urbanização e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

MOURA, A. C. M. Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano. Rio de Janeiro: Editora Interciência Ltda, 2014.

MOURA, A. M. M. Trajetória da política ambiental federal no Brasil. In: MOURA, A. M. M. (Org.) **Governança ambiental no Brasil**: instituições, atores e políticas públicas. Brasília: Ipea, 2016. p. 13 – 44.

MUNN, Z.; STERN, C.; AROMATARIS, E; LOCKWOOD, C.; JORDAN, Z. What kind of systematic review should I conduct? A proposed typology and guidance for systematic

reviewers in the medical and health sciences. **Medical Research Methodology**, v. 18, n. 5, p. 1-9, 2018.

NAPOLEÃO, R. P. **Zoneamento ambiental como subsídio à gestão dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio Capivari (SP)**. Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente), Universidade Estadual Paulista - Campus Rio Claro, São Paulo, 2003.

NELLE, S. **Managing riparian areas: a guide to caring for special places that need preferential treatment**. Uvalde, Texas: Nueces River Authority, 2014.

NSW DPI – New South Wales. Degradation of native riparian vegetation along NSW water courses. Primefacts: **Profitable & sustainable primary industries**, n.12. New South Wales, 2005.

NUNES, B. S. J. **Desigualdade socioambiental urbana: análise da ocupação da bacia hidrográfica do Ribeirão Mandi, Município de Lorena – SP**. Dissertação. (Mestrado em Planejamento Urbano e Regional) - Programa de Pós-Graduação em Planejamento Urbano e Regional da Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2017.

NUNES, M. R.; PHILIPPI JR., A.; FERNANDES, V. Gestão Ambiental Municipal: objetivos, instrumentos e agentes. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 23, 2012.

OĞUZTİMUR, S. **Why fuzzy analytic hierarchy process approach for transport problems?** In: PROCEEDINGS OF THE EUROPEAN REGIONAL SCIENCE ASSOCIATION 2011 CONGRESS, Barcelona, Spain, 30 August–3 September 2011; p. 438. Disponível em: <https://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa11/e110830aFinal00438.pdf>. Acesso em 16 de janeiro de 2024.

OLIVEIRA, A. V. L. C.; CESTARO, L. A. Os instrumentos de planejamento ambiental territorial e suas aplicações no âmbito municipal: uma análise do Plano Diretor e exercícios de zoneamento. **Geografia em questão**, Marechal Cândido Rondon/PR, v.13, n. 01, p. 115-128, 2020.

OLIVEIRA, H. S. **Políticas ambientais sustentáveis de comando e controle e a eficácia dos instrumentos econômicos**. Frutal/MG. Editora Prospectiva, 2016.

OLIVEIRA, R. C.; BOIN, M. N.; FELÍCIO, M. J. Ecodinâmica aplicada à confecção de carta de fragilidade ambiental para instalação de aterro sanitário. **GEOGRAFIA**, Rio Claro, v. 42, n. 1, p. 5-21, 2017.

OLIVEIRA, V. A.; MELLO, C. R.; VIOLA, M. R.; SRINIVASAN, R. Land-use change impacts on the hydrology of the Upper grande river basin, Brazil. **CERNE**, Lavras/MG, v. 24, n. 4, 2018.

ONU – Assembleia Geral. **A/RES/70/1 -Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York, 2015. Disponível em: <https://docs.un.org/en/A/RES/70/1>. Acesso em 15 de julho de 2025.

OPRICOVIC, S.; TZENG, G.-H. Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. **European Journal of Operational Research**, v. 156, n. 2, p. 445–455, 2004.

ORTIZ-MOYA, F.; KOIE, H.; OTA, J.; KATAOKA, Y.; FUJINO, J. State of the Voluntary Local Reviews 2020 —Local Action for Global Impact in Achieving the SDGs. **Institute for Global Environmental Strategies (IGES)**, 2020.

PAES JUNIOR, N. S.; SIMÕES, S. J. C. Evolução espacial de áreas irrigadas com base em sensoriamento remoto no Médio Vale do Paraíba do Sul, Sudeste do Brasil. **Revista Ambiente & Água - An interdisciplinary Journal of Applied Science**: v. 1, n. 1, 2006.

PEDRO MIYAZAKI, L. C. **Dinâmicas de apropriação e ocupação em diferentes formas de relevo**: Análise dos impactos e da vulnerabilidade nas cidades de Presidente Prudente/SP. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, 2014.

PEDROSA, S. M. P. A. **Jovens de fanfarra: Memórias e representações**. Tese. (Doutorado em Educação) - Programa de Pós-Graduação em Educação do Departamento de Educação do Centro de Teologia e Ciências Humanas da Pontifícia Universidade Católica (PUC), Rio de Janeiro, 2007.

PERES, K. K.; GUICHO, R.; MEDEIROS G.; AMARAL, M. W. W.; SILVA, T. T., PILATTI, M. C.; PRIOR, M.; BUENO, N. C. Environmental fragility as an indicator of the risk of contamination by human action in watersheds used for public supply in western Paraná, Brazil, **Environmental Earth Sciences**, v. 81, n. 486, 2022.

PERROTTA, M. M.; SALVADOR, E. D.; LOPES, R. C.; D'AGOSTINO, L. Z.; CHIEREGATI, L.A.; PERUFFO, N.; GOMES, S. D.; SACHS, L. L. B.; MEIRA, V. T.; GARCIA, M. G. M.; LACERDA FILHO, J. V. **Mapa Geológico do Estado** de São Paulo, escala 1:750.000. São Paulo: CPRM, 2006.

PINESE JÚNIOR, F.; RODRIGUES, S. C. O método de análise hierárquica – AHP – como auxílio na determinação da vulnerabilidade ambiental da bacia hidrográfica do Rio Piedade (MG). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 23, p. 4-26, 2012.

POLIDORO, M.; CARMO, J.P. A.; SOUZA, G. F.; LOLLO, J. A. Identificação de áreas suscetíveis a expansão urbana utilizando carta de fragilidade ambiental. *Geotecnia* n.º 129, p. 3-16, 2013. Disponível em <https://impactum-journals.uc.pt/geotecnia/article/view/10541>. Acesso em 20 de novembro de 2024.

PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPINAS. Plano Municipal de Recursos Hídricos. Campinas: Secretaria do Verde, Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável – SVDS, 2016.

PROCHNOW, M. C. R. Análise ambiental da sub bacia do rio Piracicaba: subsídios ao seu planejamento e manejo. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 1990.

PROFILL. **Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Relatório técnico: CEIVAP, 2021.

PULLIN, A. S.; FRAMPTON, G. K.; LIVORELI, B.; PETROKOFISKY, G. **Collaboration for Environmental Evidence 2022**: Guidelines and Standards for Evidence synthesis in Environmental Management, version 5.1, 2022. Disponível em: <https://environmentalevidence.org/information-for-authors/>. Acesso em 17 de maio de 2024

RAHMAN, R.; NURUZZAMAN, AKTER, S.; RAHMAN, N. Leveraging AHP—Fuzzy Logic Model and Geoinformation Technology for Comprehensive Landslide Vulnerability Assessment: A Case Study in Hilly Districts of Bangladesh. In: RAHMAN, R.; A. RAHMAN, SAHA, S. K. (Org.) **Advanced GIScience in Hydro-Geological Hazards: Applications, Modelling and Management**: Springer, p. 245-273, 2025.

RAMIREZ, D. A. G. A importância do uso dos SIG na gestão ambiental do município Ribero, Estado Sucre na Venezuela, **Mediação**, Pires do Rio/GO, v. 13, n. 1, p. 112-122. 2018.

REGEA – GEOLOGIA, ENGENHARIA E ESTUDOS AMBIENTAIS. **Revisão e atualização do Plano de Bacia Hidrográfica da UGRHI 02 – Paraíba do Sul**. São Paulo, 2016.

REGEA – GEOLOGIA, ENGENHARIA E ESTUDOS AMBIENTAIS. **Revisão e atualização do Plano de Bacia Hidrográfica da UGRHI 02 – Paraíba do Sul (2020-2023)**. São Paulo, 2021.

RÊGO, I. S.; AGUIAR, L. F. M. C.; SOARES, M. O. Environmental zoning and coastal zone conservation: the case of a protected area in Northeastern Brazil. **Journal of Integrated Coastal Zone Management /Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 16, n. 1, p. 35-43, 2016.

REIS, A. C. B.; SCHRAMM, V. B. **Guia de Análise multicritério em Análise de Impacto Regulatório (AIR) no Inmetro**. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: Brasília, 2022.

RIBEIRO, J. V. M.; MENDES, T. S. G.; SIMÕES, S. J. C.; MASSI, K. G. CAMARINHA, P. I. M.; FERREIRA, C. C. Strategic landscape analysis relating multicriteria analysis and socioeconomic and environmental context to define potential areas for active restoration in São Paulo, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 130, 2023.

RIBEIRO, P. F. R. V.; RIBEIRO, J. C. J. O Zoneamento Ecológico Econômico como instrumento de planejamento de políticas públicas municipais: um estudo sob a perspectiva do ciclo de políticas públicas. **CONPEDI Law Review**, v. 8, n. 1, p. 169 – 191, 2022.

RIGNEL, D. G. S.; CHENCI, G. P.; LUCAS, C. A. Uma introdução a Lógica Fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistema de Informação e Gestão Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2011. Disponível em: <http://www.logicafuzzy.com.br/wp-content/uploads/2013/04/uma_introducao_a_logica_fuzzy.pdf>. Acesso em: 17 janeiro de 2024.

RISSATO, D.; SPRICIGO, B. A política ambiental no Brasil no período de 1970-1999. **Revista Ciências Sociais em Perspectiva**, Cascável/PR, v. 9, n. 16, 2010.

RODRÍGUEZ-MERINO, A.; GARCÍA-MURILLO, P.; FERNÁNDEZ-ZAMUDIO, R. Combining multicriteria decision analysis and GIS to assess vulnerability within a protected area: An objective methodology for managing complex and fragile systems. **Ecological Indicators**, v. 108, 2020.

ROSA, F. S. Plano Diretor Ambiental como estratégia de desenvolvimento rural e urbano. **Boletim Paulista de Geografia**, v. 100, p. 96-111, 2018.

ROSA, M. R.; ROSS, J. L. Aplicação de SIG na geração de cartas de fragilidade. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 13, 1999.

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. O. O zoneamento ambiental enquanto instrumento para o planejamento e gestão territorial: abordagem aplicada ao município de Araguari-MG. **Caderno de Geografia**, v 31, n 64, 2021.

ROSA, R. M.; FERREIRA, V. Proposal of environmental zoning for watersheds: application in the Water Resources Planning and Management Unit from Low Paranaíba River, Minas Gerais State, Brazil. **Geosp**, v. 26, n. 2, e-180525, 2022. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geosp/workflow/index/180525/4>. Acesso em 25 de novembro de 2023.

ROSS, J L S. **Geomorfologia: ambiente e planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**. São Paulo, n. 8, 1994.

ROSS, J. L. S. **Ecogeografia do Brasil: subsídios para o planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina dos textos, 2009.

ROSSI, C. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado**. São Paulo: Instituto Florestal, 2017.

ROTHER, E. T. Revisão sistemática X revisão narrativa. **Acta Paulista de Enfermagem**, São Paulo, v. 20, n. 2, 2007. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-21002007000200001&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 13 de janeiro de 2024.

ROY, B. The outranking approach and the foundations of electre methods. **Theory and Decision**, v. 31, n. 1, p. 49–73. 1991.

RUTHERFORD, I.; ANDERSON, B.; LADSON, A. Managing the effects of riparian vegetation on flooding. In: LOVETT, S.; PRICE, P. **Principles for riparian lands management**. Canberra: Land & Water Australia, 2007, p. 63-84.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation**. McGraw-Hill International Book Company, 1980.

SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process - What it is and how it is used? **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.

SAATY, T. L. **Método de Análise Hierárquica**. Tradução de Wainer da Silveira e Silva, McGraw-Hill, Makron, São Paulo, 1991.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19-43, 1994.

SAATY, T. L. Decision Making with Dependence and Feedback: The Analytic Network Process: the Organization and Prioritization of Complexity. **RWS Publications**, 1996.

SAATY, T. L.; VARGAS, L. G. Decision Making with the Analytic Network Process. **Springer US**, 2 ed., v. 195, 2013.

SALEMI, L. F.; GROppo, J. D.; TREVISAN, R.; MORAES, J. M.; LIMA, W. P.; MARTINELLI, L. A. Riparian vegetation and water yield: a synthesis. **Journal of Hydrology**, v. 454–455, p. 195–202, 2012.

SAMPAIO, R. F.; MANCINI, M.C. Estudos de revisão sistemática: um guia para síntese criteriosa da evidência científica. **Revista brasileira de fisioterapia**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 83-89, 2007.

SANCHES, A. C.; MELO, M. F. S.; SILVA, W. L. C.s; CALEMAN, S. M. Q. Descentralização da gestão ambiental no brasil: análise histórica dos principais momentos do processo. **Gestão e Desenvolvimento**, v. 14, n. 2, 2017.

SANTOS, J. O. Relações entre fragilidade ambiental e vulnerabilidade social na susceptibilidade aos riscos. **Mercator**, Fortaleza, v. 14, n. 2, p. 75-90, 2015.

SANTOS, J. R. N.; SILVA JÚNIOR, C. H. L.; PEREIRA, D. C. A. Zoneamento da fragilidade ambiental utilizando Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico - AHP: o caso da bacia hidrográfica do Rio Anil, em São Luís – MA. In: Simpósio brasileiro de sensoriamento remoto. XVII. 25 a 29 de abril de 2015, João Pessoa-PB. **Anais [...]**. São José dos Campos: INPE, 2015.

SANTOS, R. F. **Planejamento ambiental**: teoria e prática. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

SANTOS, S. L. **A integração entre gestão das águas e uso do solo: o zoneamento ambiental como instrumento de interface no planejamento de bacias hidrográficas**. Dissertação (Mestrado Profissional em Rede Nacional em Gestão e Regulação de Recursos Hídricos - ProfAgua) - Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2020.

SCHMIDT, A. M. A. **Processo de apoio à tomada de decisão: abordagens AHP e MACBETH**. Dissertação (Mestrado em Engenharia – Especialidade em Engenharia de Produção), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/30433070>. Acesso em 15 de fevereiro de 2024.

SCHMIDT, M. A.; BARBOSA, G. R. Uso de redes neurais artificiais na ponderação inicial da técnica AHP em análise de vulnerabilidade de bacias hidrográficas. **Boletim Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 3, p. 511-525, 2016.

SICSÚ, J.; CASTELAR, A. **Sociedade e economia**: estratégias de crescimento e desenvolvimento. Brasília: Ipea, 2009.

SHEEHAN, T.; GOUGH, M. A platform-independent fuzzy logic modeling framework for environmental decision support. **Ecological Informatics**, v. 34, p. 92–101, 2016.

SILVA, J. A. **Direito urbanístico brasileiro**. 6 ed. São Paulo: Malheiros Editores, 2010.

SILVA JÚNIOR, C. H. L. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico (AHP) aplicados ao Zoneamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos: Uma Revisão. **Revista Monografias Ambientais – REMOA**, v. 14, n.3, p. 42-58, 2015.

SILVA JUNIOR, C. H. L.; FREIRE, A. T. G.; MENDES, J. J. Lógica Fuzzy e Processo Analítico Hierárquico – AHP na avaliação da qualidade ambiental de nascentes. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 19, n. 2, p. 292–303, 2015.

SILVA, J. S. V.; SANTOS, R. F. Zoneamento para planejamento ambiental: vantagens e restrições de métodos e técnicas. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v. 21, n. 2, p.221-263, 2004.

SILVA, M. S. L. **Estudos da erosão**. Petrolina: Ministério da Agricultura do Abastecimento e da Reforma - MAARA, 1965.

SILVA, V. C. B.; MACHADO, P.S. SIG na Análise Ambiental: Susceptibilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima. **Revista de Geografia (UFPE)**, Minas Gera, v. 31, n. 2, 2014.

SILVA, W. D. **Aspectos gerais da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA)**. Exercício de aprendizagem (Graduação em Direito) - Centro Universitário UNIC, Cuiabá, 2019. Disponível em: <https://www.jusbrasil.com.br/artigos/politica-nacional-do-meio-ambiente-pnma/708908402>. Acesso em 06 de fevereiro de 2024.

SMITH, W. S.; SILVA, F. L.; RENATA C. B. Desassoreamento de rios: quando o poder público ignora as causas, a biodiversidade e a ciência. **Ambiente & Sociedade**, São Paulo, v. 22, 2019.

SOUZA, M. L. **Mudar a cidade**: Uma introdução crítica ao planejamento e à gestão urbanos. 11. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2002.

SOUZA, A. S. S.; JERÔNIMO, T. B. Revisão Sistemática das aplicações em Administração do uso dos Métodos de Decisão Multicritério nas organizações. **Revista dos Mestrados**. Recife: UFPE, v. 9, n. 2, 2020.

SOUZA, C. M. P.; SILVA, L. A. P.; VELOSO, G. V.; LEITE, M. E.; FERNANDES FILHO, E. I. Environmental fragility by machine learning algorithms. **Mercator**, Fortaleza, v. 21, 2022.

SOUZA, D. A. **Zoneamento ambiental da bacia hidrográfica do Alto São Francisco -MG**. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais, 2017.

SOUZA, J. **Proposta de uma sistemática para análise multicriterial de investimentos**. Porto Alegre: UFRGS. 2008.

SOUZA, J. **Proposta de uma sistemática para análise multicriterial de investimentos**. Porto Alegre: UFRGS, 2008. Disponível em: http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/publicacoes/266_Disserta%C3%A7%C3%A3o_Joana%20Siqueira%20de%20Souza.pdf. Acesso em 17 de dezembro de 2024.

SOUZA, M. P. **Instrumentos de gestão ambiental: fundamentos e prática**. São Carlos: Riani Costa. 2000.

SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. Artigo. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 15, p. 39-49, 2004.

SPÖRL, C. **Metodologia para elaboração de modelo de fragilidade ambiental utilizando redes neurais**. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

STRAUCH, J. C.; SOUZA, J. M. Uma Metodologia para Implantação de Sistemas de Informações Geográficas. In: NAJAR, A. L.; MARQUES, E. C. (Org.) **Saúde e espaço: estudos metodológicos e técnicas de análise**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, p. 109 – 123, 1998.

TABACCHI, E, LAMBS, L.; GUILLOY, H.; PLANTY-TABACCHI, A. M.; MULLER, E. DÉCAMPS, H. Impacts of riparian vegetation on hydrological processes. Hydrological Processes, **John Wiley & Sons Ltd.**, v. 14, p. 2959–2976, 2000.

TAHERDOOST, H.; MADANCHIAN, M. Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Methods and Concepts. **Encyclopedia**, v. 3, 77–87, 2023.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro, IBGE, Diretoria Técnica, SUPREN, 1977.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, Robin T. Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento: revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH)**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 135–152, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. Porto Alegre: ABRH, 2015.

TUCCI, E. E. M.; MELLER, A. **Regulação das águas pluviais urbanas**. REGA, v. 4, n. 1, p. 75-89, 2007.

TURNER, B. L.; KASPERSON R. E.; MATSON P. A.; MCCARTHY J. J.; CORELL R. W.; CHRISTENSEN L.; ECKLEY N.; KASPERSON J. X.; LUERS A.; MARTELLO M. L.; POLSKY C.; PULSIPHER A.; SCHILLER A. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, n. 14, 2003.

UEHARA, T. H. K.; OTERO, G. G. P.; MARTINS, E. G. A.; PHILIPPI JR., A.; MANTOVANI, W. Pesquisas em gestão ambiental: análise de sua evolução na Universidade de São Paulo. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v. XIII, n. 1, p. 165-185, 2010.

UNITED NATIONS. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. **Resolução A/RES/49/23, 25 de setembro de 2015**. Disponível em: <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>. Acesso em 23 de junho de 2023.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. Projeto de Produtividade em Pesquisa “Modelagem de dados topográficos SRTM, São José dos Campos: INPE, 2008.

VALLE, I. C., FRANCELINO, M. R., PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ, **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295-308, 2016,

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **TOPODATA: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento de dados SRTM**. São José dos Campos: INPE, 2010.

VANTI, A. A.; LINDSTAEDT, A. R. S.; MIOTTO, G. R.; PUGUES, L. M.; MURARO, M. A controladoria utilizando a lógica fuzzy no auxílio à empresa para definição das prioridades do planejamento estratégico: um estudo em uma empresa de turismo. **Revista de Administração Mackenzie**, v. 8, n.1, p. 31-58, 2007.

VARGAS, R.V. Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio. In: PMI GLOBAL CONGRESS, 2010, Washington, **Publicação**, Washington, 2010. Disponível em <http://www.ricardo-vargas.com/articles/analytic-hierarchy-process/#portuguese>. Acesso em 19 de dezembro de 2024.

VARELLA, C. A. Instrumentos de políticas ambientais, casos de aplicação e seus impactos. **Relatório de pesquisa nº 62/2001**. [s. l.], FGV EAESP, 2001.

VARELLA, M. D.; LEUZINGER, M. D. O meio ambiente na Constituição de 1988. Sobrevoos por alguns temas vinte anos depois. **Revista de Informação Legislativa**, Brasília, a. 45 n. 179, 2008.

VASCONCELOS, M. E. G.; SILVA, P. M. U. Participação das Políticas Municipais na Gestão Sustentável de Bacias Hidrográficas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20, 17-22 nov., Bento Gonçalves. **Anais [...]** Bento Gonçalves: ABRH, 2013.

VETTORAZZI, C. A. **Avaliação Multicritérios, em ambiente SIG, na definição de áreas prioritárias à restauração florestal visando à conservação de recursos hídricos**. Tese

(Livre Docência) Departamento de Engenharia Rural, USP – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 2006.

VIDALETTI, V. F.; MARINS, A. C.; SECCO, D.; RIZZI, R. L.; CHANG, P. Impacto da cobertura do solo, declividade e precipitação na infiltração de água no solo. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 17, 2021.

VIEIRA, I. M. **Mapeamento e Classificação do Nível de Degradação das Nascentes do Município de Lorena/SP como Subsídio ao Planejamento Ambiental**. Monografia. (Graduação em Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo, Lorena, 2020.

WEISS, R.; PIPPI, L. G. A. Análise multicritério na definição de vulnerabilidade ambiental. **Terr@Plural**, Ponta Grossa, v. 13, n. 3, p. 272-295, 2019.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington D. C: Department of Agriculture, Science and Education Administration, Agriculture, Handbook nº 537, 1978.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and control**, California, v. 8, p. 338-353, 1965.

APÊNDICE A – Códigos-fonte (Python e C#) para processamento de dados de precipitação

1. Código Python para verificação e organização de séries temporais

O *script* descrito a seguir consiste em um código em Python que foi utilizado como um organizador e verificador de dados ao longo da série histórica, como registros diários de precipitação.

```
!pip install pymannkendall
```

```
import numpy as np
import pandas as pd
from datetime import date
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib import style
import scipy
from scipy.stats import pearsonr, spearmanr
from sklearn.linear_model import LinearRegression
import pymannkendall as mk
import statsmodels.api as sm
```

```
def verification(name):
```

```
    df = name
    year_0 = df['Year'][0]
    year_i = df['Year'][len(df)-1]
    month_0 = df['Month'][0]
    month_i = df['Month'][len(df)-1]
    day_0 = df['Day'][0]
    day_i = df['Day'][len(df)-1]
```

```
    d0 = date(year_0, month_0, day_0)
    di = date(year_i, month_i, day_i)
    #print(d0)
    delta = di - d0
    ndays_verification = delta.days
    #print(ndays_verification)
    ndays_real = len(df)
    #ndays_real2 = df['Precipitation'].isnull().sum()
    #print(ndays_real)
```

```
    verif_number = ndays_verification - ndays_real
    if verif_number > 0:
        print('Fail - series incomplete / number of days missing = {d}'.format(d = verif_number))
    else:
        print('Series complete')
```

```
def set_date(name):
```

```
    df = name
```

```
    date_list = []
```

```

for i in range(0, len(df)):
    year_i = df['Year'][i]
    #print(year_i)
    month_i = df['Month'][i]
    #print(month_i)
    day_i = df['Day'][i]
    #print(day_i)
    try:
        di = date(year_i, month_i, day_i)
    except:
        print('ALERT!!!!')
        #raise Exception
        pass

    #print(di)
    date_list.append(di)

#print(date_list)
#input()
df['Date'] = date_list
#print(df)
df = df.set_index('Date')
df['Date'] = date_list
#print(df)

return df

def complete_date_series(name):
    df_original = name
    df = set_date(df_original)
    #print(df)

    d0 = df['Date'][0]
    di = df['Date'][len(df)-1]
    #print(d0, di)
    idx = pd.date_range(d0, di)

    df.index = pd.DatetimeIndex(df.index)
    df = df.reindex(idx)
    df['Date'] = df.index
    return df

df_ESTACAO_Faz_Serro_Alto = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_Serro_Alto.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_Serro_Alto)

df_ESTACAO_Faz_tres_barras = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_tres_barras.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_tres_barras)

df_ESTACAO_Lorena = pd.read_csv('/kaggle/input/Lorena.csv')
verification(df_ESTACAO_Lorena)

df_ESTACAO_Haras_Mondesir = pd.read_csv('/kaggle/input/Haras_Mondesir.csv')
verification(df_ESTACAO_Haras_Mondesir)

```

```

df_ESTACAO_Polder = pd.read_csv('/kaggle/input/Polder.csv')
verification(df_ESTACAO_Polder)

df_ESTACAO_Faz_Cerro_Alto = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_Cerro_Alto.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_Cerro_Alto)

df_ESTACAO_Faz_Sao_Jose = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_Sao_Jose.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_Sao_Jose)

df_ESTACAO_Rocinha = pd.read_csv('/kaggle/input/Rocinha.csv')
verification(df_ESTACAO_Rocinha)

df_ESTACAO_Faz_Vitoria = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_Vitoria.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_Vitoria)

df_ESTACAO_Colonia_Piagui = pd.read_csv('/kaggle/input/Colonia_Piagui.csv')
verification(df_ESTACAO_Colonia_Piagui)

df_ESTACAO_Faz_Sto_Antonio = pd.read_csv('/kaggle/input/Faz_Sto_Antonio.csv')
verification(df_ESTACAO_Faz_Sto_Antonio)

df_ESTACAO_Vargem_Tanque = pd.read_csv('/kaggle/input/Vargem_Tanque.csv')
verification(df_ESTACAO_Vargem_Tanque)

df_ESTACAO_Xadrez = pd.read_csv('/kaggle/input/Xadrez.csv')
verification(df_ESTACAO_Xadrez)

df_ESTACAO_PoliciaMilitar = pd.read_csv('/kaggle/input/PoliciaMilitar.csv')
verification(df_ESTACAO_PoliciaMilitar)

df_ESTACAO_NovoHorizonte = pd.read_csv('/kaggle/input/NovoHorizonte.csv')
verification(df_ESTACAO_NovoHorizonte)

df_ESTACAO_RioMandi = pd.read_csv('/kaggle/input/RioMandi.csv')
verification(df_ESTACAO_RioMandi)

```

2. Código C# para formatação de planilhas .csv (DAEE e CEMADEN)

Outro código, descrito a seguir, utilizado foi para a formatação de planilhas em formato .csv de dados pluviométricos, escrito em C# com intuito de organizar e padronizar os arquivos de dados (planilhas), projetado especificamente para lidar com dados de duas fontes, DAEE e CEMADEN.

```

using CsvHelper;
using CsvHelper.Configuration;
using CsvHelper.Configuration.Attributes;
using System;
using System.Diagnostics;
using System.Formats.Asn1;
using System.Globalization;
using System.IO;
using static System.Net.WebRequestMethods;

namespace CSVFormatter

```

```

{
    public class DAEE
    {
        public string? Month { get; set; }
        public string? Year { get; set; }
        public string? Day1 { get; set; }
        public string? Day2 { get; set; }
        public string? Day3 { get; set; }
        public string? Day4 { get; set; }
        public string? Day5 { get; set; }
        public string? Day6 { get; set; }
        public string? Day7 { get; set; }
        public string? Day8 { get; set; }
        public string? Day9 { get; set; }
        public string? Day10 { get; set; }
        public string? Day11 { get; set; }
        public string? Day12 { get; set; }
        public string? Day13 { get; set; }
        public string? Day14 { get; set; }
        public string? Day15 { get; set; }
        public string? Day16 { get; set; }
        public string? Day17 { get; set; }
        public string? Day18 { get; set; }
        public string? Day19 { get; set; }
        public string? Day20 { get; set; }
        public string? Day21 { get; set; }
        public string? Day22 { get; set; }
        public string? Day23 { get; set; }
        public string? Day24 { get; set; }
        public string? Day25 { get; set; }
        public string? Day26 { get; set; }
        public string? Day27 { get; set; }
        public string? Day28 { get; set; }
        public string? Day29 { get; set; }
        public string? Day30 { get; set; }
        public string? Day31 { get; set; }
    }

    public class CEMADEN
    {
        [Index(0)]
        public string? municipio { get; set; }
        public string? codEstacao { get; set; }
        public string? uf { get; set; }
        public string? nomeEstacao { get; set; }
        public string? latitude { get; set; }
        public string? longitude { get; set; }
        public string? datahora { get; set; }
        public string? valorMedida { get; set; }
    }

    public class TargetCsvFormat
    {
        [Index(0)]
        public string? Month { get; set; }
    }

```

```

[Index(1)]
public string? Day { get; set; }
[Index(2)]
public string? Year { get; set; }
[Index(3)]
public string? Time { get; set; }
[Index(4)]
public string? Precipitation { get; set; }
}

internal class Program
{
    static void Main(string[] args)
    {
        int spreadsheetType = 0;

        do
        {
            Console.WriteLine("[===== FORMATADOR DE CSV =====]");
            Console.WriteLine("Leia o arquivo README para obter instruções.\n");
            Console.WriteLine("Selecione uma opção:\n1 - Formatar planilhas DAEE\n2 - Formatar
planilhas CEMADEN\n3 - Sair");
            spreadsheetType = int.Parse(Console.ReadLine());

            switch (spreadsheetType)
            {
                case 1:
                    Console.Clear();
                    Console.WriteLine("Formato de planilha DAEE selecionado.");
                    Console.WriteLine("Formatação em progresso, aguarde...");
                    FormatDAEESpreadsheets();
                    Console.WriteLine("Formatação concluída.\n");
                    Console.WriteLine("(Pressione qualquer tecla para voltar ao menu inicial...)");
                    Console.ReadLine();
                    Console.Clear();
                    break;

                case 2:
                    Console.Clear();
                    Console.WriteLine("Formato de planilha CEMADEN selecionado.");
                    Console.WriteLine("Formatação em progresso, aguarde...");
                    FormatCEMADENSpreadsheets();
                    Console.WriteLine("Formatação concluída.\n");
                    Console.WriteLine("(Pressione qualquer tecla para voltar ao menu inicial...)");
                    Console.ReadLine();
                    Console.Clear();
                    break;

                case 3:
                    System.Environment.Exit(0);
                    break;

                default:
                    Console.Clear();
                    Console.WriteLine("Opção inválida.\n");

```

```

        break;
    }
}
while (spreadsheetType != 3);
}

static void FormatDAEESpreadsheets()
{
    //Get all spreadsheets in the directory
    string[] files = System.IO.Directory.GetFiles(Directory.GetCurrentDirectory() +
"\PLANILHAS_DAE", "*.csv");

    StreamReader streamReader; //= new StreamReader("filePersons.csv")
    CsvReader csvReader; //= new CsvReader(reader, CultureInfo.InvariantCulture)

    StreamWriter streamWriter; //=new StreamWriter("filePersons.csv")
    CsvWriter csvWriter; //= new CsvWriter(writer, CultureInfo.InvariantCulture)

    //Iterate through every spreadsheet found in the directory
    //For each iteration of this loop, a formatted spreadsheet will be generated
    foreach (string s in files)
    {
        streamReader = new StreamReader(s);
        csvReader = new CsvReader(streamReader, CultureInfo.InvariantCulture);

        //This is so we can keep the original CSV and create a formatted copy
        string formattedFileName = s.Replace(".csv", "_FORMATADO.csv");

        streamWriter = new StreamWriter(formattedFileName);
        csvWriter = new CsvWriter(streamWriter, CultureInfo.InvariantCulture);

        //Get all rows from the original CSV
        var originalCsv = csvReader.GetRecords<DAEE>();

        //List for objects that will compose the formatted CSV
        List<TargetCsvFormat> formattedCsvEntries = new List<TargetCsvFormat>();

        //Iterate through each row (corresponds to a month / year pair)
        foreach (DAEE daeeCsvEntry in originalCsv)
        {
            //Oh, God of Programming, forgive my sins for I'm a feeble heretic
            string[] daeeCsvEntryPrecipitationValues =
            { daeeCsvEntry.Day1, daeeCsvEntry.Day2, daeeCsvEntry.Day3,
            daeeCsvEntry.Day4, daeeCsvEntry.Day5, daeeCsvEntry.Day6,
            daeeCsvEntry.Day7, daeeCsvEntry.Day8, daeeCsvEntry.Day9,
            daeeCsvEntry.Day10, daeeCsvEntry.Day11, daeeCsvEntry.Day12,
            daeeCsvEntry.Day13, daeeCsvEntry.Day14, daeeCsvEntry.Day15,
            daeeCsvEntry.Day16, daeeCsvEntry.Day17, daeeCsvEntry.Day18,
            daeeCsvEntry.Day19, daeeCsvEntry.Day20, daeeCsvEntry.Day21,
            daeeCsvEntry.Day22, daeeCsvEntry.Day23, daeeCsvEntry.Day24,
            daeeCsvEntry.Day25, daeeCsvEntry.Day26, daeeCsvEntry.Day27,
            daeeCsvEntry.Day28, daeeCsvEntry.Day29, daeeCsvEntry.Day30,
            daeeCsvEntry.Day31 };

            //Just so we convert months "01" to "1"...but keep months 10, 20, 30

```

```

if (daeeCsvEntry.Month.IndexOf("0") == 0)
{
    daeeCsvEntry.Month = daeeCsvEntry.Month.Remove(0, 1);
}

//Iterate through days of the month
for (int i = 0; i < daeeCsvEntry.PrecipitationValues.Length; i++)
{
    TargetCsvFormat targetCsvEntry = new TargetCsvFormat();

    targetCsvEntry.Month = daeeCsvEntry.Month;
    targetCsvEntry.Day = (i + 1).ToString();
    targetCsvEntry.Year = daeeCsvEntry.Year;
    targetCsvEntry.Time = "12:00";

    //Days where in some months we have null data are marked by "---"
    //So we just add an entry if it's not a day with no data
    if (daeeCsvEntry.PrecipitationValues[i].Equals("---") == false)
    {
        targetCsvEntry.Precipitation = daeeCsvEntry.PrecipitationValues[i];

        formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);
    }
    else
    {
        //The spreadsheet has some "invalid days" in the middle of the month
        //So I need to identify if the "missing data" is in the middle or part of a "missing day"
        //This is because...if it's like, day 30 on february, it should be skipped
        //Because it's a day that doesn't exist in that month
        //But if it's day 15 in any month for instance, I need to keep the day
        //But simply insert a null value at the precipitation value

        targetCsvEntry.Precipitation = "";

        switch (int.Parse(daeeCsvEntry.Month))
        {
            //Months with 30 days
            case 4:
            case 6:
            case 9:
            case 11:
                if (i <= 29)
                {
                    formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);
                }
                break;

            //February
            case 2:
                if (IsLeapYear(int.Parse(daeeCsvEntry.Year)))
                {
                    //Feb. 29th
                    if (i <= 28)
                    {
                        formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

        }
    }
    else
    {
        //Feb. 28th
        if (i <= 27)
        {
            formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);
        }
    }
    break;

    //Months with 31 days: 1, 3, 5, 7, 8, 10, 12
    default:
        //Just add normally, it's always going to be a "missing data"
        //Since they always have 31 days, all days are "valid"
        formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);
        break;
    }
}
}
}

//Weee, formatted CSV
csvWriter.WriteRecords(formattedCsvEntries);

streamWriter.Close();
}
}

static void FormatCEMADENSpreadsheets()
{
    //Get all spreadsheets in the directory
    string[] files = System.IO.Directory.GetFiles(Directory.GetCurrentDirectory() +
"\\PLANILHAS_CEMADEN", "*.csv");

    StreamReader streamReader;
    CsvReader csvReader;

    //List for objects that will compose the formatted CSV
    List<TargetCsvFormat> policiaMilitarEntries = new List<TargetCsvFormat>();
    List<TargetCsvFormat> novoHorizonteEntries = new List<TargetCsvFormat>();
    List<TargetCsvFormat> rioMandiEntries = new List<TargetCsvFormat>();

    //Iterate through every spreadsheet found in the directory
    //Each file = one month...we'll append everything to corresponding objects (PM, Mandi or NH)
    //Only then will we generate the spreadsheets
    foreach (string s in files)
    {
        streamReader = new StreamReader(s);

        var config = new CsvConfiguration(CultureInfo.InvariantCulture)
        {
            Delimiter = ";",
        };
    }
}

```

```

csvReader = new CsvReader(streamReader, config);

//Get all rows from the CSV
var originalCsv = csvReader.GetRecords<CEMADEN>();

//Iterate through each row (corresponds to a month / year pair)
foreach (CEMADEN cemadenCsvEntry in originalCsv)
{
    //Each row corresponds to an object...
    TargetCsvFormat targetCsvEntry = new TargetCsvFormat();

    string year = cemadenCsvEntry.datahora.Substring(0, 4);
    string month = cemadenCsvEntry.datahora.Substring(5, 2);

    //Just so we convert months "01" to "1"...but keep months 10, 20, 30
    if (month.IndexOf("0") == 0)
    {
        month = month.Remove(0, 1);
    }

    string day = cemadenCsvEntry.datahora.Substring(8, 2);

    //Just so we convert days "01" to "1"...but keep days 10, 20, 30 etc
    if (day.IndexOf("0") == 0)
    {
        day = day.Remove(0, 1);
    }

    string time = cemadenCsvEntry.datahora.Substring(11, 5);

    //Just so we convert hours "01" to "1"...but keep hours 10, 20 etc
    if (time.IndexOf("0") == 0)
    {
        time = time.Remove(0, 1);
    }

    //This spreadsheet comes with values as "x,x" instead of "x.x"
    string precipitation = cemadenCsvEntry.valorMedida;
    precipitation = precipitation.Replace(",", ".");

    //format stuff
    targetCsvEntry.Month = month;
    targetCsvEntry.Day = day;
    targetCsvEntry.Year = year;
    targetCsvEntry.Time = time;
    targetCsvEntry.Precipitation = precipitation;

    switch (cemadenCsvEntry.nomeEstacao)
    {
        case "Polícia Militar":
            policiaMilitarEntries.Add(targetCsvEntry);
            break;

        case "Novo Horizonte":

```

```

        novoHorizonteEntries.Add(targetCsvEntry);
        break;

    case "Rio Mandi":
    case "LORENA_Rio Mandi":
        rioMandiEntries.Add(targetCsvEntry);
        break;
    }
}
}

//HERE, IMMA NEED ONE FILE FOR EACH STATION (PM, MANDI, NH)
//AND I'LL WRITE TO IT THE CORRESPONDING OBJECT LIST

StreamWriter streamWriter;
CsvWriter csvWriter;

streamWriter = new StreamWriter(Directory.GetCurrentDirectory() +
"\PLANILHAS_CEMADEN\\" + "_PoliciaMilitar_FORMATADO.csv");
csvWriter = new CsvWriter(streamWriter, CultureInfo.InvariantCulture);
csvWriter.WriteRecords(policiaMilitarEntries);

streamWriter.Close();

streamWriter = new StreamWriter(Directory.GetCurrentDirectory() +
"\PLANILHAS_CEMADEN\\" + "_NovoHorizonte_FORMATADO.csv");
csvWriter = new CsvWriter(streamWriter, CultureInfo.InvariantCulture);
csvWriter.WriteRecords(novoHorizonteEntries);

streamWriter.Close();

streamWriter = new StreamWriter(Directory.GetCurrentDirectory() +
"\PLANILHAS_CEMADEN\\" + "_RioMandi_FORMATADO.csv");
csvWriter = new CsvWriter(streamWriter, CultureInfo.InvariantCulture);
csvWriter.WriteRecords(rioMandiEntries);

streamWriter.Close();
}

// CREDIT: StackOverflow
// PRE: no year < 1 or > 9999
// POST: true if year is a leap year, or false if not.
static bool IsLeapYear(int year)
{
    if (year < 1 || year > 9999)
    {
        return false;
    }

    return year % 4 == 0 && (year % 100 != 0 || year % 400 == 0);
}
}
}

```

3. Código C# para resumo mensal de precipitação

O código a seguir, também em linguagem C#, teve como objetivo ler arquivos .csv com dados diários de precipitação e gerar novos arquivos .csv contendo resumos mensais. Cada resumo apresentou o ano, o mês, o maior valor de precipitação diária e a soma total da precipitação no mês. Esses dados permitiram identificar os valores máximos diários registrados pelas estações pluviométricas, além de auxiliar no cálculo da média de precipitação do mês mais seco.

```
using CsvHelper;
using CsvHelper.Configuration;
using CsvHelper.Configuration.Attributes;
using System.Globalization;

namespace CSVRainFormatter
{
    public class OriginalCsvFormat
    {
        [Index(0)]
        public string? Year { get; set; }
        [Index(1)]
        public string? Month { get; set; }
        [Index(2)]
        public string? Day { get; set; }
        [Index(3)]
        public string? Value { get; set; }
    }

    public class TargetCsvFormat
    {
        [Index(0)]
        public string? Year { get; set; }
        [Index(1)]
        public string? Month { get; set; }
        [Index(2)]
        public string? MaxDayPrecipitationValue { get; set; }
        [Index(3)]
        //public string? MonthlyAveragePrecipitation { get; set; }
        public string? MonthlyPrecipitationSum { get; set; }
    }

    internal class Program
    {
        static void Main(string[] args)
        {
            Console.WriteLine("Leia o arquivo README para instruções.\n");
            Console.WriteLine("Formatação em progresso, aguarde...");
            FormatSpreadsheets();
            Console.WriteLine("Formatação concluída. Pressione qualquer tecla para sair.\n");
            Console.ReadLine();
            System.Environment.Exit(0);
        }
    }
}
```

```

static void FormatSpreadsheets()
{
    //Get all spreadsheets in the directory
    string[] files = System.IO.Directory.GetFiles(Directory.GetCurrentDirectory() +
        "\\PLANILHAS", "*.csv");

    StreamReader streamReader;
    CsvReader csvReader;

    //Iterate through every spreadsheet found in the directory
    //For each iteration of this loop, a formatted spreadsheet will be generated
    foreach (string s in files)
    {
        streamReader = new StreamReader(s);
        var config = new CsvConfiguration(CultureInfo.InvariantCulture)
        {
            Delimiter = ";",
        };
        csvReader = new CsvReader(streamReader, config);

        StreamWriter streamWriter;
        CsvWriter csvWriter;

        //This is so we can keep the original CSV and create a formatted copy
        string formattedFileName = s.Replace(".csv", "_FORMATADO.csv");

        streamWriter = new StreamWriter(formattedFileName);
        csvWriter = new CsvWriter(streamWriter, CultureInfo.InvariantCulture);

        //Get all rows from the original CSV
        var originalCsv = csvReader.GetRecords<OriginalCsvFormat>();

        //List for objects that will compose the formatted CSV
        List<TargetCsvFormat> formattedCsvEntries = new List<TargetCsvFormat>();

        TargetCsvFormat targetCsvEntry = new TargetCsvFormat();

        //Initialize with this index so when the loop starts it gets the first default values
        int currentYear = int.Parse(originalCsv.FirstOrDefault().Year);
        int currentMonth = int.Parse(originalCsv.FirstOrDefault().Month);

        List<float> currentMonthDayValues = new List<float>();

        //Iterate through each row
        foreach (OriginalCsvFormat originalCsvEntry in originalCsv)
        {
            float number;
            float.TryParse(originalCsvEntry.Value, NumberStyles.AllowDecimalPoint, new
CultureInfo("en-US"), out number);
            currentMonthDayValues.Add(number);

            int y = int.Parse(originalCsvEntry.Year);
            int m = int.Parse(originalCsvEntry.Month);
            int d = int.Parse(originalCsvEntry.Day);

```

```

        if (((m == 4 || m == 6 || m == 9 || m == 11) && d == 30) ||
            (m == 2 && IsLeapYear(y) && d == 29) ||
            (m == 2 && IsLeapYear(y) == false && d == 28) ||
            ((m == 1 || m == 3 || m == 5 || m == 7 || m == 8 || m == 10 || m == 12) && d == 31)) {
            targetCsvEntry = new TargetCsvFormat();
            targetCsvEntry.Year = originalCsvEntry.Year;
            targetCsvEntry.Month = originalCsvEntry.Month;

            targetCsvEntry.MaxDayPrecipitationValue =
currentMonthDayValues.Max().ToString("0.00");
            //targetCsvEntry.MonthlyAveragePrecipitation =
currentMonthDayValues.Average().ToString("0.00");
            targetCsvEntry.MonthlyPrecipitationSum =
currentMonthDayValues.Sum().ToString("0.00");

            formattedCsvEntries.Add(targetCsvEntry);

            currentMonthDayValues.Clear();
        }
    }

    //Weee, formatted CSV
    csvWriter.WriteRecords(formattedCsvEntries);

    streamWriter.Close();
}

// CREDIT: Some guy on StackOverflow, as you do
// PRE: no year < 1 or > 9999
// POST: true if year is a leap year, or false if not.
static bool IsLeapYear(int year)
{
    if (year < 1 || year > 9999)
    {
        return false;
    }

    return year % 4 == 0 && (year % 100 != 0 || year % 400 == 0);
}
}
}

```

APÊNDICE B – Análise de sensibilidade dos temas selecionados

Abordagens adotadas:

- (1) sobreposição dos mapas dos temas pelo método tradicional (sobreposição dos mapas pela média aritmética);
- (2) sobreposição dos mapas dos temas atribuindo, alternadamente, um peso maior a cada variável, e
- (3) sobreposição dos mapas dos temas removendo, alternadamente, cada variável.

Pluviometria

Tabela 1 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação máxima diária para o tema pluviometria

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,2	9,2	9.072,8	22,0	3.362,6	8,1
Média	30.154,3	73,1	28.966,0	70,1	25.684,5	62,2
Alta	7.281,4	17,6	3.165,6	7,7	12.101,4	29,3
Muito alta	30,8	0,1	110,0	0,3	165,9	0,4
Total	41.275,8	100,0	41.314,3	100,0	41.314,3	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação máxima diária para o tema pluviometria. Conclusão: tema pluviometria no cenário de precipitação máxima diária é sensível.

Tabela 2 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema pluviometria

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	1.280,0	3,1	85,9	0,2	3.361,9	8,1
Média	27.116,8	65,7	27.459,3	66,4	25.675,0	62,2
Alta	12.825,3	31,1	13.552,6	32,8	12.098,7	29,3
Muito alta	47,3	0,1	233,9	0,6	166,1	0,4
Total	41.269,4	100,0	41.331,6	100,0	41.301,6	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema pluviometria. Conclusão: tema pluviometria no cenário de precipitação média do mês mais seco é sensível.

Área de Preservação Permanente (APP)

Tabela 3 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação máxima diária para o tema área de preservação permanente.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,2	9,2	8.514,5	20,6	2.622,7	6,4
Média	30.154,3	73,1	24.948,8	60,4	27.438,8	66,4
Alta	7.281,4	17,6	7.766,8	18,8	11.183,3	27,1
Muito alta	30,8	0,1	84,2	0,2	69,5	0,2
Total	41.275,8	100,0	41.314,3	100,0	41.314,3	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação máxima diária para o tema área de preservação permanente. Conclusão: tema área de preservação permanente no cenário de precipitação máxima diária é sensível.

Tabela 4 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema área de preservação permanente.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	1.280,0	3,1	8.130,2	19,7	416,2	1,0
Média	27.116,8	65,7	24.671,8	59,8	23.882,8	57,8
Alta	12.825,3	31,1	8.380,6	20,3	16.888,3	40,9
Muito alta	47,3	0,1	86,8	0,2	114,4	0,3
Total	41.269,4	100,0	41.269,4	100,0	41.301,6	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema área de preservação permanente. Conclusão: tema área de preservação permanente no cenário de precipitação média do mês mais seco é sensível.

Cobertura e uso do solo

Tabela 5 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação máxima diária para o tema cobertura e uso do solo.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,2	9,2	9.648,1	23,4	4.092,9	5,8
Média	30.154,3	73,1	24.260,1	58,7	28.906,5	41,2
Alta	7.281,4	17,6	5.709,4	13,8	28.906,5	41,2
Muito alta	30,8	0,1	1.696,7	4,1	8.305,8	11,8
Total	41.275,8	100,0	41.314,3	100,0	70.211,7	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação máxima diária para o tema cobertura e uso do solo. Conclusão: tema cobertura e uso do solo no cenário de precipitação máxima diária é sensível.

Tabela 6 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema cobertura e uso do solo.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	1.280,0	3,1	8.384,7	20,3	700,7	1,7
Média	27.116,8	65,7	20.539,7	49,7	25.709,2	62,3
Alta	12.825,3	31,1	10.634,0	25,8	14.851,9	36,0
Muito alta	47,3	0,1	1.743,3	4,2	39,9	0,1
Total	41.269,4	100,0	41.301,6	100,0	41.301,6	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema cobertura e uso do solo. Conclusão: tema cobertura e uso do solo no cenário de precipitação média do mês mais seco é sensível.

Pedologia

Tabela 7 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação máxima diária para o tema pedologia.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,2	9,2	11.236,6	27,2	5.304,5	12,8
Média	30.154,3	73,1	14.265,4	34,5	29.555,9	71,5
Alta	7.281,4	17,6	13.031,9	31,5	6.435,5	15,6
Muito alta	30,8	0,1	2.780,5	6,7	18,4	0,0
Total	41.275,8	100,0	41.314,3	100,0	41.314,3	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação máxima diária para o tema pedologia. Conclusão: tema pedologia no cenário de precipitação máxima diária é sensível.

Tabela 8 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema pedologia.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	1.280,0	3,1	10.555,1	25,6	1.461,4	3,5
Média	27.116,8	65,7	13.516,0	32,7	27.639,4	66,9
Alta	12.825,3	31,1	14.152,7	34,3	12.173,3	29,5
Muito alta	47,3	0,1	3.077,8	7,5	27,5	0,1
Total	41.269,4	100,0	41.301,6	100,0	41.301,6	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema pedologia. Conclusão: tema pedologia no cenário de precipitação média do mês mais seco é sensível.

Declividade

Tabela 9 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação máxima diária para o tema cobertura e uso do solo.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,2	9,2	5.199,4	12,6	6.792,0	16,4
Média	30.154,3	73,1	25.063,8	60,7	26.279,1	63,6
Alta	7.281,4	17,6	10.853,8	26,3	7.025,7	17,0
Muito alta	30,8	0,1	197,3	0,5	1.215,5	2,9
Total	41.275,8	100,0	41.314,3	100,0	41.312,3	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação máxima diária para o tema declividade. Conclusão: tema declividade no cenário de precipitação máxima diária é sensível.

Tabela 10 – Comparação da distribuição das áreas no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema cobertura e uso do solo.

Grau de fragilidade	Método tradicional		Peso maior		Remoção do tema	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	1.280,0	3,1	4.224,7	10,2	2.937,9	7,1
Média	27.116,8	65,7	22.164,1	53,7	23.345,0	56,5
Alta	12.825,3	31,1	14.657,1	35,5	14.083,7	34,1
Muito alta	47,3	0,1	255,7	0,6	932,0	2,3
Total	41.269,4	100,0	41.301,6	100,0	41.298,6	100,0

Análise: Variação das porcentagens dos graus de fragilidade em cada graduação (peso) no cenário de precipitação média do mês mais seco para o tema declividade. Conclusão: tema declividade no cenário de precipitação média do mês mais seco é sensível.

Conclusão Geral

A análise de sensibilidade demonstrou que todas os temas analisados apresentaram sensibilidade em diferentes graus, validando, portanto, sua utilização neste trabalho.

APÊNDICE C – Comparação entre os cenários da pluviometria

Figura 1 - Mapas de fragilidade ambiental elaborados pelo método tradicional para os dois cenários.

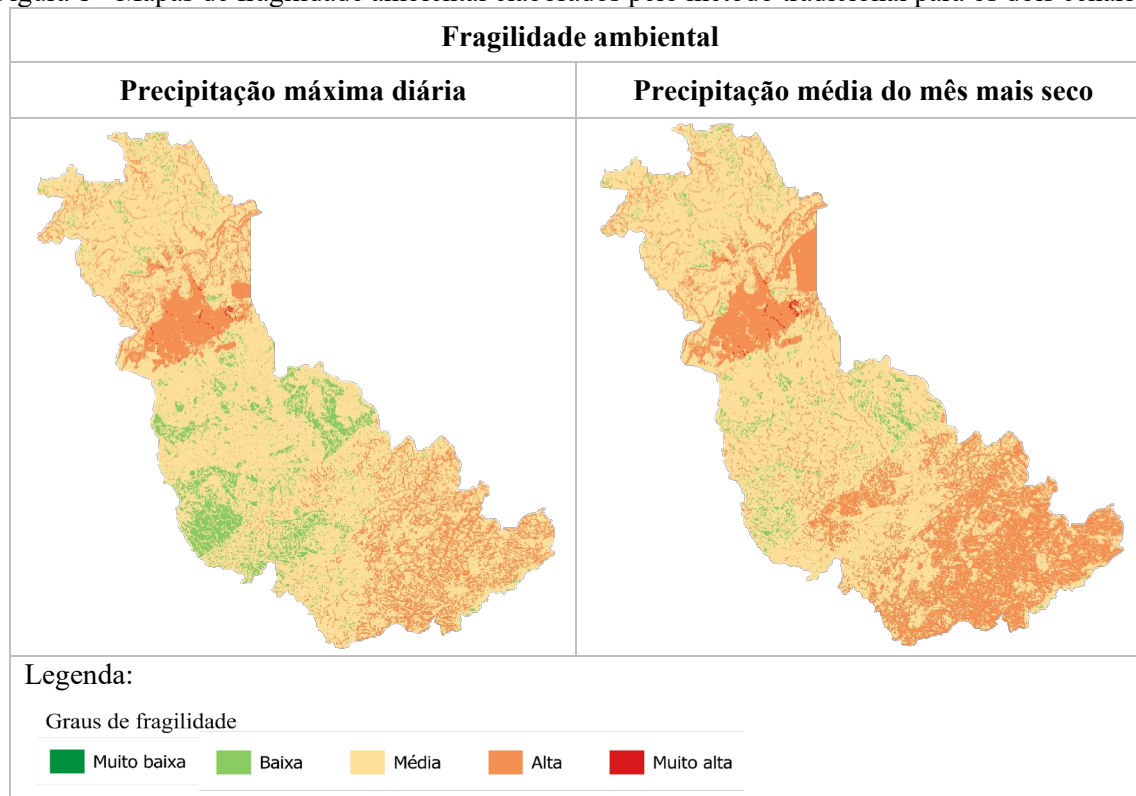


Tabela 1 – Quadro de áreas do mapa de fragilidade ambiental e hídrica pelo elaborado método tradicional para os dois cenários.

Graus de fragilidade	Precipitação máxima diária		Precipitação média mês do mais seco	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Baixa	3.809,23	9,23	1.280,00	3,10
Média	30.154,30	73,06	27.116,78	65,71
Alta	7.281,44	17,64	12.825,33	31,08
Muito alta	30,78	0,07	47,25	0,11
Total	41.275,75	100,00	41.269,36	100,00

Análise:

Com base no quadro de áreas (Tabela 1), a distribuição das áreas nos cinco graus de fragilidade aponta uma maior fragilidade (mais áreas em graus de fragilidade mais altos) no cenário de precipitação média do mês mais seco. Assim, o cenário de precipitação média do

mês mais seco é mais crítico para a fragilidade ambiental em comparação com o cenário de precipitação máxima diária. Logo, apoiado no princípio da precaução, o cenário mais crítico foi escolhido (precipitação média do mês mais seco).

APÊNDICE D – Memória de cálculo da matriz AHP

Matriz de avaliação par a par dos temas ambientais realizado pelos especialistas

Questão orientadora para os avaliadores: “Qual a importância relativa dos temas ambientais para avaliar sua influência na conservação dos recursos hídricos?”

Tabela 1 – Matriz de avaliação do especialista 1.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	3	1/3	1/3	3
Declividade	1/3	1	1/7	1/5	1/5
Uso do solo	3	7	1	3	5
Tipo de solo	3	5	1/3	1	3
Pluviometria	1/3	5	1/5	1/3	1

Tabela 2 – Matriz de avaliação do especialista 2.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	5	1/3	5	7
Declividade	1/5	1	1/7	1/3	3
Uso do solo	3	7	1	5	9
Tipo de solo	1/5	3	1/5	1	5
Pluviometria	1/7	1/3	1/9	1/5	1

Tabela 3 – Matriz de avaliação do especialista 3.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	5	3	1	1/3
Declividade	1/5	1	1/5	1/5	1/5
Uso do solo	1/3	5	1	1/3	1/3
Tipo de solo	1	5	3	1	1/3
Pluviometria	3	5	3	3	1

Tabela 4 – Matriz de avaliação do especialista 4.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	5	3	7	3
Declividade	1/5	1	1/5	3	1/5
Uso do solo	1/3	5	1	7	3
Tipo de solo	1/7	1/3	1/7	1	1/7
Pluviometria	1/3	5	1/3	7	1

Tabela 5 – Matriz de avaliação do especialista 5.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	5	3	7	1
Declividade	1/5	1	3	3	1/3
Uso do solo	1/3	1/3	1	5	1/3
Tipo de solo	1/7	1/3	1/5	1	1/5
Pluviometria	1	3	3	5	1

Tabela 6 – Matriz de avaliação do especialista 6.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	3	9	3	9
Declividade	1/3	1	3	1/3	3
Uso do solo	1/9	1/3	1	1/3	1/3
Tipo de solo	1/3	3	3	1	5
Pluviometria	1/9	1/3	3	1/5	1

Tabela 7 – Matriz de avaliação do especialista 7.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	5	3	5	5
Declividade	1/5	1	1/3	1/3	3
Uso do solo	1/3	3	1	3	3
Tipo de solo	1/5	3	1/3	1	3
Pluviometria	1/5	1/3	1/3	1/3	1

Tabela 8 – Matriz de avaliação do especialista 8.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	3	3	5	7
Declividade	1/3	1	1/3	3	5
Uso do solo	1/3	3	1	5	7
Tipo de solo	1/5	1/3	1/5	1	3
Pluviometria	1/7	1/5	1/7	1/3	1

Tabela 9 – Matriz de avaliação do especialista 9.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1	1/9	1/7	1/5	1/3
Declividade	9	1	5	5	5
Uso do solo	7	1/5	1	3	3
Tipo de solo	5	1/5	1/3	1	3
Pluviometria	3	1/5	1/3	1/3	1

Tabela 10 - Média geométrica da matriz e soma dos valores dos temas.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria
APP	1,0000	2,7627	1,4831	2,2036	2,3523
Declividade	0,3620	1,0000	0,5427	0,8363	1,0675
Uso do solo	0,6743	1,8427	1,0000	2,3983	1,8949
Tipo de solo	0,4538	1,1958	0,4170	1,0000	1,3893
Pluviometria	0,4251	0,9368	0,5277	0,7198	1,0000
Soma	2,9152	7,7380	3,9705	7,1579	7,7040

Tabela 11 – Matriz normalizada e valores do vetor de prioridade de cada tema ambiental.

	APP	Declividade	Uso do solo	Tipo de solo	Pluviometria	Vetor de prioridade (Pj)
APP	0,3430	0,3570	0,3735	0,3079	0,3053	0,337
Declividade	0,1242	0,1292	0,1367	0,1168	0,1386	0,1291
Uso do solo	0,2313	0,2381	0,2519	0,3351	0,2460	0,2605
Tipo de solo	0,1557	0,1545	0,1050	0,1397	0,1803	0,1471
Pluviometria	0,1458	0,1211	0,1329	0,1006	0,1298	0,1260

Cálculo da consistência do vetor de prioridade w (prioridade relativa)

$$\lambda_{max} = \sum_{j=1}^n Tj \cdot Pj$$

Onde:

λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamento;

Tj é o somatório da coluna j da matriz de julgamento;

Pj é a prioridade calculada para o critério localizado na linha j .

Tj		Pj
1,70		0,337
0,65		0,1291
1,32	=	0,2605
0,74		0,1471
0,63		0,1260

$$\lambda_{max} = 5,04$$

Índice de Consistência (IC)

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Onde:

IC é o Índice de Consistência;

λ_{max} é o maior autovalor da matriz de julgamento;

n é o número de critérios avaliados

$$IC = \frac{5,04 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = 0,01$$

Índice de razão (IR)

$$IR = 1,12$$

Tabela - Valores de IR para matrizes quadradas de ordem n .

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: Saaty, 1991.

Razão de Consistência (RC)

$$RC = \frac{IC}{IR}$$

Onde:

RC é a Razão de Consistência;

IC é o Índice de Consistência;

IR é o Índice Randômico.

$$RC = \frac{0,01}{1,12}$$

$$RC = 0,00893 < 0,01$$