

**UNIVERSIDADE DE SOROCABA  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PROCESSOS TECNOLÓGICOS E  
AMBIENTAIS**

**Gabriela dos Santos Luchetti Vieira**

**PROPOSTA DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA REGIÃO  
METROPOLITANA DE SOROCABA-SP: SOBREPOSIÇÃO DE CENÁRIOS COMO  
FERRAMENTA DE GESTÃO PÚBLICA**

**Sorocaba/SP  
2026**

**Gabriela dos Santos Luchetti Vieira**

**PROPOSTA DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA REGIÃO  
METROPOLITANA DE SOROCABA-SP: SOBREPOSIÇÃO DE CENÁRIOS COMO  
FERRAMENTA DE GESTÃO PÚBLICA**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Orientadora: Profª. Dra. Valquíria Miwa Hanai  
Yoshida

Coorientador: Prof. Dr. Roberto Wagner  
Lourenço

O presente trabalho foi realizado com apoio Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Chamada CNPq Nº 69/2022 - Processo:440869/2022-6.

**Sorocaba/SP  
2026**

### Ficha Catalográfica

V715p Vieira, Gabriela dos Santos Luchetti  
Proposta de zoneamento ecológico-econômico da região metropolitana de Sorocaba-SP : sobreposição de cenários como ferramenta de gestão pública / Gabriela dos Santos Luchetti Vieira. – 2026.  
88 f. : il.

Orientadora: Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida  
Coorientador: Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço  
Dissertação (Mestrado em Processos Tecnológicos e Ambientais) –  
Universidade de Sorocaba, Sorocaba, SP, 2026.

1. Zoneamento econômico – Sorocaba, Região Metropolitana de (SP). 2. Política ambiental - Sorocaba, Região Metropolitana de (SP). 3. Recursos naturais – Política governamental. 4. Áreas de conservação de recursos naturais - Sorocaba, Região Metropolitana de (SP). 5. Desenvolvimento sustentável. I. Yoshida, Valquíria Miwa Hanai, orient. II. Lourenço, Roberto Wagner, coorient. III. Universidade de Sorocaba. VI. Título.

**Gabriela dos Santos Luchetti Vieira**  
<https://orcid.org/0009-0000-6152-7680>

**PROPOSTA DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA REGIÃO  
METROPOLITANA DE SOROCABA-SP: SOBREPOSIÇÃO DE CENÁRIOS  
COMO FERRAMENTA DE GESTÃO PÚBLICA**

Dissertação apresentada à Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Universidade de Sorocaba, como exigência parcial para obtenção do título de Mestre em Processos Tecnológicos e Ambientais.

Aprovado em: 23/03/2026

**BANCA EXAMINADORA:**

Documento assinado digitalmente



**VALQUIRIA MIWA HANAI YOSHIDA**  
Data: 22/04/2026 08:32:20-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. \_\_\_\_\_

<https://orcid.org/0000-0003-2022-4485>

Universidade de Sorocaba

Documento assinado digitalmente



**NORBERTO ARANHA**  
Data: 23/04/2026 10:59:32-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Norberto Aranha  
<https://orcid.org/0000-0003-1954-377X>

Universidade de Sorocaba

Documento assinado digitalmente



**JOSE CARLOS DE SOUZA**  
Data: 22/04/2026 17:15:09-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Carlos de Souza  
<https://orcid.org/0000-0001-9760-6559>

Universidade Estadual de Goiás - Unidade Universitária de Anápolis

Dedico esta dissertação às minhas avós, Dirce e Aparecida, base da minha ancestralidade. Às mulheres que, direta e indiretamente, lutaram pelo meu direito de ocupar a universidade e todos os outros espaços.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me conduzido ao longo desta caminhada, concedendo força, serenidade e perseverança para enfrentar os desafios e alcançar mais esta etapa da minha formação.

Aos meus pais, por todo o amor, apoio e incentivo ao longo da vida. Sou profundamente grata por todo o esforço realizado para que eu tivesse acesso à educação e pudesse trilhar meu próprio caminho com autonomia e dignidade. Ao meu companheiro que está sempre ao meu lado me incentivado, apoiando e valorizando minhas conquistas. Aos meus irmãos e familiares, pelo carinho, pela compreensão e pelo apoio constante em todos os momentos. Aos meus amigos, que estiveram presentes durante esta jornada, compartilhando experiências, oferecendo apoio e tornando o percurso mais leve.

À Profa. Dra. Valquíria Miwa Hanai Yoshida, minha orientadora que se tornou uma de minhas referências dentro da academia. Obrigada pela orientação, confiança e pelas contribuições fundamentais ao desenvolvimento deste trabalho. Agradeço pelos ensinamentos, pelas reflexões e pelo apoio ao longo desta trajetória acadêmica.

A rede de colaboração entre o Programa de Pós-graduação em Processos Tecnológicos e Ambientais da Uniso, e o Prof. Dr. Roberto Wagner Lourenço, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) Campus de Sorocaba.

Aos professores, Prof. Dr. Thiago Simon Marques, Prof. Dr. Norberto Aranha e Prof. Dr. José Carlos de Souza, que gentilmente aceitaram compor a banca examinadora, pelas leituras atentas, pelas valiosas contribuições e pelas sugestões que certamente enriqueceram esta pesquisa.

À Universidade de Sorocaba (UNISO), bem como a todos os docentes e colaboradores da instituição, pelo compromisso com a formação acadêmica e pelo suporte oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro concedido por meio da bolsa de pesquisa, fundamental para o desenvolvimento deste trabalho e para a viabilização das atividades acadêmicas e científicas ao longo deste período. Ressalto a importância do investimento público em ciência, tecnologia e inovação, que possibilita a formação de pesquisadores, o avanço do conhecimento científico e a produção de estudos voltados à compreensão e à solução de desafios socioambientais.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta etapa da minha vida acadêmica. Meu sincero agradecimento.

“Crimes ambientais, racismo, guerras e políticas extrativistas têm expulsado povos originários e populações vulneráveis de seus territórios, impondo mudanças abruptas e traumáticas.”

(Texto de Núcleo: Territórios, Migrações e Fronteiras.  
Exposição Histórias da Ecologia, MASP, 2025).

## RESUMO

O Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) é essencial para o planejamento territorial voltado à conservação dos recursos naturais e ao desenvolvimento sustentável. No entanto, sua implementação carece de uma metodologia padronizada e reconhecida. Diante desse desafio, o projeto objetiva equacionar estrategicamente demandas socioeconômicas e ambientais para um planejamento territorial sustentável, definindo-se o ZEE da Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), utilizando o método de Análise Hierárquico de Processos (AHP) e a Aprendizagem de Máquina através de uma Rede Neural Artificial (RNA). O banco de dados foi construído e organizado em um ambiente de Sistema de Informações Geográficas (GIS, *Geographic Information System*) com base em informações disponibilizadas por diversas instituições de pesquisa e órgãos governamentais nacionais e internacionais. A elaboração dos produtos cartográficos e o processamento dos dados foram realizados utilizando softwares como ArcGIS 10.6, Google Earth Pro e TerrSet. A partir disso, foi realizado o processamento de todas as variáveis que incluem: Uso da Terra, Declividade, Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), Índice de Responsabilidade Paulista (IPRS), Índice de Umidade por Diferença Normalizada (NDMI), Áreas de Preservação Permanente (APP), Unidade de Conservação (UC) e mapas de proximidades. Adicionalmente, foram definidas as zonas de manejo com base nas diretrizes do Decreto Estadual Nº 67.430/2022 e no conhecimento socioeconômico da região. O mapa de ZEE da RMS obtido por meio do processamento da RNA-SOM mostrou que mais da metade da região foi classificada como zona rural, refletindo sua economia, enquanto menos de 1% corresponde à zona de preservação, valor abaixo do esperado. Os municípios de Ibiúna e Tapiraí destacam-se nas zonas de preservação, conservação e recuperação, e Sorocaba na zona urbana, evidenciando padrões coerentes com o uso da terra e características dos municípios. O uso de metodologias associando sensoriamento remoto e redes neurais artificiais se mostrou promissora para o planejamento territorial. Este estudo é altamente relevante para a RMS, pois emprega tecnologias e metodologias avançadas para oferecer uma abordagem específica e contextualizada às demandas regionais. Espera-se que os resultados forneçam embasamento científico para a tomada de decisões municipais, contribuindo para a criação de recursos legais e projetos que promovam a preservação ambiental e a melhoria da qualidade de vida da população, alinhados ao desenvolvimento sustentável.

**Palavras-chave:** processo analítico hierárquico; redes neurais artificiais; áreas protegidas; planejamento territorial.

## ABSTRACT

The Ecological-Economic Zoning (EEZ) is essential for territorial planning aimed at the conservation of natural resources and sustainable development. However, its implementation lacks a standardized and widely recognized methodology. In response to this challenge, this study aims to strategically reconcile socioeconomic and environmental demands for sustainable territorial planning by defining the EEZ for Sorocaba Metropolitan Region (RMS), using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Self-Organizing Maps (SOM) artificial neural networks. A database was built and organized within a Geographic Information System (GIS) environment, based on data provided by various research institutions and national and international government agencies. Cartographic products and data processing were carried out using software such as ArcGIS 10.6, Google Earth Pro, and TerrSet. All variables were processed, including Land Use, Slope, Universal Soil Loss Equation (USLE), São Paulo Social Responsibility Index (IPRS), Normalized Difference Moisture Index (NDMI), Permanent Preservation Areas (PPAs), Conservation Units (CUs), and proximity maps. Additionally, management zones were defined based on State Decree 67.430/2022 and the region's socioeconomic characteristics. The resulting EEZ map of RMS generated through SOM processing showed that over half of the region was classified as a rural zone, reflecting its economic profile, while less than 1% was classified as a preservation zone, a value below expectations. Ibiúna and Tapiraí stand out in preservation, conservation, and recovery zones, while Sorocaba predominates in the urban zone, reflecting patterns consistent with municipal characteristics. Integrating remote sensing and artificial neural networks proved promising for territorial planning. This study holds high relevance for RMS, as it employs advanced technologies to provide a specific approach tailored to regional demands. The results establish a scientific foundation for municipal decision-making, contributing to developing legal frameworks that promote environmental preservation alongside improved quality of life, aligned with sustainable development.

**Keywords:** analytical hierarchical process; artificial neural networks; protected areas; land use planning.

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP	<i>Analytical Hierarchical Process</i> (traduzido para a língua portuguesa como Análise Hierárquico de Processos)
ANN	<i>Artificial Neural Networks</i> (traduzido para a língua portuguesa como Redes Neurais Artificiais)
APA	Área de Preservação Ambiental
APP	Área de Preservação Permanente
BOA	<i>Base of Atmosphere reflectance</i> (traduzido para a língua portuguesa como Reflectância na Base da Atmosfera)
CI	<i>Consistency Index</i> (traduzido para a língua portuguesa como Índice de Consistência)
CP	Fator de uso e manejo
CR	<i>Consistency Ratio</i> (traduzido para a língua portuguesa como Razão de Consistência)
DSG	Departamento de Serviços Geográficos do Exército
RUSLE	Equação Universal de Perda de Solo Revisada
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTS	Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba
IDEA	Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo
IGG	Instituto Geográfico e Geológico
IPA	Instituto de Pesquisas Ambientais
K	Fator de erodibilidade do solo
LABGEMM	Laboratório de Geoprocessamento e Modelagem Matemática Ambiental
Landsat	<i>Land Remote Sensing Satellite</i>
LS	Fator topográfico
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MDE	Modelo Digital de Elevação
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MMP	Macrometropole Paulista
NDMI	<i>Normalized Difference Moisture Index</i> (traduzido para a língua portuguesa como Índice De Umidade De Diferença Normalizada)
NIR	Infravermelho próximo

PDUI	Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado
PE	Parque Estadual
PIB	Produto Interno Bruto
PMMA	Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica
PNMA	Política Nacional do Meio Ambiente
R	Fator de erosividade da chuva
Red	Vermelho
RI	<i>Random-Like Matrix</i> (traduzido para a língua portuguesa como Matriz Aleatória)
RM	Região Metropolitana
RMS	Região Metropolitana de Sorocaba
RNA	Redes Neurais Artificiais
RPPN	Reserva Particular do Patrimônio Natural
SAVI	<i>Soil Adjusted Vegetation Index</i> (traduzido para a língua portuguesa como Índice de Vegetação Ajustado ao Solo)
SEADE	Sistema Estadual de Análise de Dados
SEMA	Secretaria Estadual do Meio Ambiente
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SNUC	Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza
SOM	<i>Self-Organizing Maps</i> (traduzido para a língua portuguesa como Mapas Auto-organizáveis)
TOA	<i>Top of Atmosphere reflectance</i> (traduzido para a língua portuguesa como Reflectância no topo da atmosfera)
UC	Unidades de Conservação
USGS	<i>United States Geological Survey</i> (traduzido para a língua portuguesa como Serviços Geológicos dos Estados Unidos da América)
ZEE	Zoneamento Ecológico-Econômico

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Mapa de localização da Região Metropolitana de Sorocaba .....	28
Figura 2. Fluxograma da metodologia adotada na revisão de escopo, incluindo o processo de seleção dos estudos mais aderentes ao tema.....	31
Figura 3. Fluxograma geral da metodologia para obtenção do ZEE a partir da RNA-SOM ...	32
Figura 4. Escala relativa para comparação pareada da importância entre critérios.....	42
Figura 5. Fluxograma quantitativo das etapas de triagem da seleção de publicações.....	48
Figura 6. Nuvem de palavras associadas aos artigos selecionados .....	50
Figura 7. Relação da quantidade de publicações por ano.....	51
Figura 8. Frequência das instituições associadas a produção dos artigos selecionados.....	52
Figura 9. Porcentagem de uso dos softwares utilizados nos artigos selecionados .....	53
Figura 10. Mapa de Uso da terra da RMS para o ano de 2023.....	55
Figura 11. Porcentagem de uso da terra .....	56
Figura 12. Mapa de declividade da RMS .....	59
Figura 13. Mapa de proximidade de centros urbanos, malha viária, hidrografia e unidades de conservação .....	60
Figura 14. Mapa de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente (APP) .....	62
Figura 15. Mapa das Unidade de Conservação e outras áreas protegidas.....	63
Figura 16. Mapas dos fatores para o cálculo da RUSLE.....	66
Figura 17. Mapa da Perda de Solo obtido através do cálculo da RUSLE.....	68
Figura 18. Mapa do Índice Paulista de Responsabilidade Social .....	70
Figura 19. Mapa do NDMI para RMS.....	72
Tabela 1. Classificação do índice Kappa.....	36
Tabela 2. Classificação da taxa de perda de solo da RUSLE.....	38
Tabela 3. Valor do fato K referente a cada tipo de solo .....	40
Tabela 4. Valores de RI por número de critérios.....	42
Tabela 5. Relação de áreas protegidas da RMS, incluindo as unidades de conservação .....	64
Tabela 6. Matriz de comparação entre os fatores da RUSLE para o cálculo do peso para AHP .....	68
Tabela 7. Área por zona de manejo da RMS.....	75
Tabela 8. Área por zona de manejo por município.....	77
Quadro 1. Relação das principais Unidades de Conservação da Região Metropolitana de Sorocaba .....	30
Quadro 2. Base de dados utilizado para o levantamento e sistematização dos parâmetros. ....	33
Quadro 3. Informações técnicas a respeito das imagens de satélite utilizadas neste estudo ....	34
Quadro 4. Classes de uso da terra e exemplares de composição falsa cor .....	35
Quadro 5. Classificação do relevo conforme declividade em porcentagem.....	37
Quadro 6. Critérios para definição da APP de acordo com o Código Florestal (Lei N° 12.651/2012).....	38
Quadro 7. Descrição das zonas de manejo adotadas neste estudo.....	46
Quadro 8. Artigos selecionados na análise bibliométrica .....	49

## **Impacto potencial da pesquisa**

**Título da dissertação:** PROPOSTA DO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DA REGIÃO METROPOLITANA DE SOROCABA-SP: SOBREPOSIÇÃO DE CENÁRIOS COMO FERRAMENTA DE GESTÃO PÚBLICA

### **Impacto social/científico:**

O trabalho contribui diretamente ao avanço científico ao: (i) Integrar AHP, sensoriamento remoto e redes neurais (RNA-SOM) no ZEE — combinação rara e inovadora na literatura brasileira. (ii) Fortalecer metodologias replicáveis para planejamento territorial. (iii) Gerar bases geoespaciais organizadas e padronizadas, essenciais para pesquisas futuras. (iv) O estudo preenche uma lacuna identificada na literatura — baixa produção científica em ZEE com integração de dados socioeconômicos. (v) Contribui com evidências empíricas para o uso de IA espacial na gestão ambiental. Ainda, o estudo apoia a Política Nacional de Meio Ambiente, o Plano Nacional de Mudanças Climáticas e o avanço de pesquisas sobre Mata Atlântica, impactos climáticos, gestão territorial e conservação.

Em se tratando de impactos sociais, os achados podem (i) dar suporte às políticas públicas locais e regionais, por meio de subsídios diretos ao PDUI da RMS, identificação de áreas críticas (erosão, umidade, vulnerabilidade social) e base técnica para decisões municipais em urbanização, habitação, saneamento e preservação; (ii) identificar municípios mais vulneráveis e apoiar ações de redução de desigualdades; (iii) o ZEE gerado fornece identificação de áreas de risco (erosão, APP degradadas, baixa umidade); suporte a ações de prevenção a enchentes e escassez hídrica; e instrumentos para proteção dos mananciais da RMS (Ituparanga e Alto Sorocaba).

### **Declaração de uso de inteligência artificial**

Declara-se que ferramentas de Inteligência Artificial (IA) foram utilizadas exclusivamente como apoio técnico na revisão gramatical, formatação do texto e organização das referências bibliográficas. Ressalta-se que a IA não foi empregada na elaboração conceitual, análise ou interpretação dos resultados, sendo todo o conteúdo científico de autoria dos autores. O uso ocorreu em conformidade com o Manual de Normalização vigente e os princípios da integridade científica, garantindo transparência e confiabilidade. A produção intelectual aqui apresentada é inteiramente original, resultante exclusivamente de minhas leituras, reflexões, análises e escrita. Estou ciente de que a omissão ou declaração incorreta sobre o uso de IA constitui violação dos princípios de integridade científica e das normas institucionais vigentes.

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO NARRATIVA DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Legislação e políticas públicas</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Importância do zoneamento ecológico-econômico</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>27</b>
<b>3.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	<b>27</b>
<b>3.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2</b>	<b>Revisão de escopo</b> .....	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Levantamento e sistematização de banco de dados</b> .....	<b>32</b>
<b>4.4</b>	<b>Mapeamento do uso da terra</b> .....	<b>33</b>
<b>4.5</b>	<b>Declividade</b> .....	<b>36</b>
<b>4.6</b>	<b>Mapas de proximidade</b> .....	<b>37</b>
<b>4.7</b>	<b>Áreas de preservação permanente</b> .....	<b>37</b>
<b>4.8</b>	<b>Equação universal de perda de solo revisada</b> .....	<b>38</b>
4.8.1	Fator de erosividade da chuva .....	39
4.8.2	Fator de erodibilidade do solo .....	39
4.8.3	Fator topográfico .....	40
4.8.4	Fator de uso e manejo.....	40
4.8.5	Geração do mapa perda de solo .....	41
<b>4.9</b>	<b>Índice paulista de responsabilidade social</b> .....	<b>43</b>
4.9.1	Riqueza .....	43
4.9.2	Longevidade .....	44
4.9.3	Escolaridade.....	44
<b>4.10</b>	<b>Índice de umidade de diferença normalizada</b> .....	<b>44</b>
<b>4.11</b>	<b>Definições de zonas de manejo</b> .....	<b>45</b>
<b>4.12</b>	<b>Redes neurais artificiais</b> .....	<b>46</b>
4.12.1	Pré-processamento.....	46
4.12.2	Arquitetura da RNA-SOM .....	47

<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
<b>5.1</b>	<b>Revisão de escopo .....</b>	<b>48</b>
<b>5.2</b>	<b>Mapeamento do uso da terra .....</b>	<b>54</b>
<b>5.3</b>	<b>Declividade .....</b>	<b>58</b>
<b>5.4</b>	<b>Mapas de proximidade.....</b>	<b>60</b>
<b>5.5</b>	<b>Áreas de preservação e conservação protegidas.....</b>	<b>62</b>
<b>5.6</b>	<b>Equação universal de perda de solo revisada .....</b>	<b>66</b>
<b>5.7</b>	<b>Índice paulista de responsabilidade social .....</b>	<b>69</b>
<b>5.8</b>	<b>Índice de diferença normalizada de umidade .....</b>	<b>71</b>
<b>5.9</b>	<b>Zoneamento ecológico-econômico .....</b>	<b>73</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>80</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço das dinâmicas urbanas no Brasil, especialmente a partir da década de 1970, gerou um processo de concentração populacional em grandes centros urbanos, intensificando a complexidade do ordenamento territorial e expondo deficiências nos critérios de criação de regiões metropolitanas (Barreto, 2012). Paralelamente, a crescente pressão sobre os recursos naturais e os desafios socioambientais levaram à formulação de instrumentos de gestão capazes de orientar o desenvolvimento territorial de forma sustentável. A partir de 2015, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu tornar cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, evidenciando a urgência por estratégias de planejamento que aliem crescimento urbano e conservação ambiental como um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (UN, 2015).

Neste cenário, o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) se destaca como um instrumento jurídico, técnico e político de apoio ao planejamento territorial, ao promover a organização do uso do solo com base em critérios ambientais e socioeconômicos (Favareto; Razera, 2023). Representando uma das principais ferramentas de gestão pública, por permitir a articulação entre a conservação ambiental e o desenvolvimento econômico regional (Pereira, Ferreira, Boas, de Oliveira, *et al.*, 2011). Sua aplicação é ainda mais relevante em regiões de elevado valor ambiental e socioeconômico, onde os conflitos de uso do território, a exclusão de zonas estratégicas e a ausência de políticas integradas comprometem a efetividade das ações de ordenamento (Ferreira; Trindade Junior, 2023).

A importância do ZEE é amplamente reconhecida, sobretudo pela sua capacidade de integrar aspectos físicos, bióticos e socioeconômicos, fornecendo bases para uma ocupação territorial mais equilibrada e adaptada às especificidades regionais (Lopes *et al.*, 2020), especialmente em contextos de expansão urbana e pressões sobre os recursos naturais (Ferreira; Trindade Junior, 2023). Apesar disso, a integração entre todas as esferas e os dados disponíveis se torna um grande desafio.

Um dos principais obstáculos ao avanço do ZEE diz respeito à ausência de metodologias padronizadas. Embora o Ministério do Meio Ambiente (MMA) tenha publicado diretrizes metodológicas em 2006, o documento apresenta caráter predominantemente filosófico e qualitativo, sem fornecer procedimentos técnicos claros quanto à seleção de variáveis, escalas de análise ou métodos de integração multicritério (Pereira *et al.*, 2011).

Em consequência, os estudos existentes adotam metodologias diversas e de difícil comparação entre si, enquanto o tempo de elaboração dos ZEEs varia expressivamente, sem

correlação direta com a abrangência territorial (Favareto; Razera, 2023). Esse cenário reforça a necessidade de metodologias que tornem o processo de elaboração mais ágil, reprodutível e tecnicamente fundamentado.

Os métodos e técnicas de geoprocessamento e sensoriamento remoto estão sendo amplamente utilizados no planejamento ambiental e gestão territorial. Considerada uma ferramenta de captação de dados sem o contato direto com o objeto de estudo, usada principalmente para monitoramentos a distância, além de permitir a avaliação de fatores ambientais e outras atividades antrópicas (Shimabukuro *et al.*, 2009). Mais da metade dos trabalhos sobre ZEE encontrados na literatura, utiliza sistemas de informação geográfica como suporte metodológico, com destaque para o ArcGIS, seguido por plataformas de código aberto. Paralelamente, observa-se crescente inserção de técnicas de aprendizado de máquina nos processos de elaboração do ZEE, refletindo a incorporação das inovações em inteligência artificial ao campo do planejamento territorial (Duan; Edwards; Dwivedi, 2019).

Entre as abordagens metodológicas que têm sido empregadas para superar as limitações da elaboração convencional do ZEE, destacam-se a Análise Hierárquica de Processos (AHP) e as Redes Neurais Artificiais do tipo *Self-Organizing Maps* (RNA-SOM). A AHP, desenvolvida por Saaty (1977), permite a integração de múltiplos critérios por meio de comparações pareadas, fornecendo pesos relativos de forma consistente e auditável. Já as redes neurais do tipo SOM possibilitam a organização e estratificação de dados multivariados em grades bidimensionais, identificando padrões espaciais sem a necessidade de supervisão explícita (Kohonen, 2001). A combinação dessas técnicas ao sensoriamento remoto representa uma abordagem metodológica inovadora e com elevado potencial para a elaboração do ZEE de forma mais eficiente, reduzindo o tempo de processamento e conferindo maior objetividade à definição das zonas de manejo.

Nesse contexto, o presente estudo tem como propósito integrar tecnologias avançadas de sensoriamento remoto e redes neurais artificiais para contribuir com a elaboração do ZEE da RMS. De forma que o planejamento e gestão das regiões, mas principalmente dos municípios, sejam realizadas de forma mais ágil, eficiente e integrada, considerando simultaneamente os fatores ambientais, sociais, culturais e econômicos que influenciam a dinâmica territorial.

## 2 REVISÃO NARRATIVA DE LITERATURA

### 2.1 Legislação e políticas públicas

A Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), institucionalizada pela Lei Federal N°6.938, de 31 de agosto de 1981, representou um marco na proteção ambiental no Brasil. Seu principal objetivo é estabelecer a preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental, promovendo também o desenvolvimento socioeconômico no âmbito nacional. Um dos princípios dessa legislação é o controle e o zoneamento das atividades potencialmente ou efetivamente poluidoras. Dentre os diversos mecanismos da PNMA, o denominado zoneamento ambiental foi estabelecido como o principal instrumento para execução de atividades e planejamento ambiental (BRASIL, 1981).

Posteriormente, foram promulgadas outras legislações para fortalecer o zoneamento ambiental, destacando-se o Decreto Federal N° 99.193, de 27 de março de 1990 e revogado pelo Decreto Federal N° 10.087, de 5 de novembro de 2019, que regula as atividades relacionadas ao ZEE e estabelece outras medidas, como a criação do Programa de Zoneamento Ecológico-Econômico e da Comissão Coordenadora do Zoneamento Ecológico-Econômico (BRASIL, 2019). Já em 1999, a responsabilidade do ZEE e planejamento territorial passou para o Ministério do Meio Ambiente (MMA), conforme medida provisória N°1.911-8 (Barros; Fernandes, 2016; Pereira et al., 2011b).

A concretização do ZEE, como se conhece atualmente, originou-se de uma longa evolução de políticas públicas ambientais, a qual foram baseadas no crescimento territorial e no desenvolvimento sustentável. O ZEE é composto por diversas legislações que visam regulamentar o uso da terra, avaliar o crescimento territorial segregado por regiões e definir áreas de crescimento, protegidas ou restritas (Meneguzzo & Albuquerque, 2009; Silva et al., 2013).

Apesar de o termo "Zoneamento Ecológico-Econômico" ter aparecido oficialmente pela primeira vez no relatório voltado à discussão de políticas florestais para a Amazônia Brasileira instituído pelo Decreto N° 83.518/1979 (BRASIL, 1979), já havia indícios dessa ideia sendo abordada em leis e decretos desde o Estatuto da Terra (Lei N° 4.504/1964) (BRASIL, 1964). No entanto, foi apenas com a crescente preocupação com os impactos ambientais no início da década de 1980 que o ZEE começou a ganhar espaço e relevância, tornando-se ainda mais urgente em 1996, após a divulgação da maior taxa anual de desmatamento da Amazônia Legal pelo INPE (Favareto; Razera, 2023).

Conforme Lopes *et al.* (2021) observou, mesmo estando presente na legislação, até 2001 o zoneamento carecia de conceitos bem definidos a respeito de sua execução e outras orientações. Embora a política ambiental tenha adotado o zoneamento como instrumento, faltavam legislações que apresentassem de maneira clara e consistente os objetivos, metodologias e importância do zoneamento, o que resultava em interpretações diversas que não contribuíam para o desenvolvimento sustentável no planejamento territorial.

Somente em 2002 por meio do Decreto Nº 4.297, de 10 de julho de 2002, o zoneamento ambiental passou a ser denominado como Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE), e obteve clareza na sua implementação e monitoramento. Além de definir como objetivo organizar e embasar as tomadas de decisões de agentes públicos e privados que utilizam recursos naturais de forma direta ou indireta, garantindo o desenvolvimento econômico e os serviços ecossistêmicos (BRASIL, 2022).

A importância do ZEE foi reforçada em 2012 por meio do Código Florestal Brasileiro, estipulado pela Lei 12.651, de 25 de maio de 2012, a qual dispõe da proteção da vegetação nativa e dá outras providências. A lei supracitada reafirma a importância do ordenamento territorial, principalmente as áreas relacionadas com a vegetação, por exemplo a definição de áreas de reservas legais, Áreas de Preservação Permanente (APP), outras unidades de conservação (UC) e zonas costeiras (BRASIL, 2012). Para o ZEE Brasil, o Código Florestal Brasileiro foi um marco importante, pois ela estabelece que sejam adotadas metodologias unificadas para elaboração e aprovação de ZEEs estaduais, a fim de reformar e complementar os decretos estabelecidos 2002 (Favareto; Razera, 2023).

O ZEE do Estado de São Paulo, instituído pelo Decreto Estadual Nº 67.430 de 30 de dezembro de 2022, configura-se como um instrumento central da Política Estadual do Meio Ambiente e do Ordenamento Territorial, conforme previsto na Lei Federal Nº 6.938/1981. Esta ferramenta legal, tem como objetivo primordial promover o desenvolvimento sustentável em todo o território paulista. Para tal, o ZEE estabelece diretrizes e critérios para a organização espacial das atividades econômicas e sociais, visando conciliar o crescimento socioeconômico com a proteção ambiental, a conservação dos recursos naturais e a manutenção da qualidade de vida da população. O decreto estrutura o zoneamento a partir da divisão do estado em Unidades de Gestão, definindo Zoneamentos Específicos e Indicadores de Sustentabilidade, com o propósito explícito de orientar e integrar as políticas públicas setoriais, o licenciamento ambiental e o planejamento municipal, buscando evitar conflitos de uso e garantir a perenidade dos ecossistemas (SÃO PAULO, 2022).

O ZEE é amplamente aplicado em diferentes recortes político-administrativos, sendo mais comum em escalas municipais, bacias hidrográficas e unidades de conservação. No entanto, as regiões metropolitanas também se configuram como territórios que demandam a implementação desse instrumento de planejamento. Nessas áreas, o ZEE pode contribuir para a organização e o ordenamento territorial não apenas em nível municipal, mas também em escala regional, promovendo maior integração, cooperação e desenvolvimento conjunto entre os municípios vizinhos.

De acordo com Barreto (2012), a criação das primeiras regiões metropolitanas tinha como principal objetivo promover a integração do território brasileiro, com foco na intensificação das inter-relações entre essas unidades político-administrativas. Esse processo foi impulsionado pela crescente urbanização no início da década de 1970, período em que a sociedade brasileira já demonstrava uma tendência significativa de concentração nos grandes centros urbanos. Desde que as institucionalizações das regiões metropolitanas se tornaram mais populares, existiu uma discussão em relação aos critérios utilizados para a criação dessas unidades político-administrativas. Dando enfoque aquelas Regiões Metropolitanas que ainda não tinham um contingente populacional significativo que justifique sua criação.

A RMS foi criada oficialmente pela Lei Complementar Nº 1.241, de 08 de maio de 2014 (SÃO PAULO, 2014), a qual tem como objetivo o planejamento regional visando a qualidade de vida, o desenvolvimento socioeconômico, a redução da desigualdade, o uso dos recursos naturais, culturais e proteção ao meio ambiente com o manejo racional e adequado do território. O Conselho de desenvolvimento, responsável por deliberar fundos ao programa, deve atuar nos campos de planejamento e uso do solo; transporte e sistema viário; habitação; saneamento ambiental; meio ambiente; desenvolvimento econômico; atendimento social; turismo; e esporte, lazer e cultura.

Segundo a Lei supracitada a RMS é constituída por 27 municípios agrupados em três sub-regiões, tendo como sede os municípios mais populosos, a saber:

- a) Sub-região 1 - Tatuí: Alambari, Boituva, Capela do Alto, Cerquilha, Cesário Lange, Jumirim, Sarapuí, Tatuí, Tietê e Itapetininga, município este incorporado à região após a sua institucionalização;
- b) Sub-região 2 - Itu: Alumínio, Araçariguama, Ibiúna, Itu, Mairinque, Porto Feliz, Salto e São Roque; e,
- c) Sub-região 3 - Sorocaba: Araçoiaba da Serra, Iperó, Piedade, Pilar do Sul, Salto de Pirapora, São Miguel Arcanjo, Tapiraí e Votorantim.

O Estatuto da Metrópole, concebido como o principal marco legal das regiões metropolitanas e aglomerações urbanas criadas pelos Estados, foi instituído pela Lei Federal Nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (BRASIL, 2015). Conforme definido no artigo 1º, tem como principal instrumento de política pública de planejamento o Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado (PDUI), bem como outros instrumentos de governança no campo do desenvolvimento territorial para regiões metropolitanas (RM) brasileiras.

Nesse contexto, o ordenamento territorial e a gestão ambiental no Brasil são estruturados por diferentes instrumentos legais que atuam de forma complementar em distintas escalas administrativas. Enquanto o ZEE orienta o planejamento e a organização do uso do território em escalas regionais e estaduais, outras políticas e legislações ambientais estabelecem mecanismos específicos voltados à proteção de biomas e ecossistemas estratégicos, apresentando instrumentos extremamente importantes quando trata-se da preservação dos recursos naturais. Esses instrumentos são fundamentais para a preservação dos recursos naturais e para a promoção de práticas de uso sustentável do território. Considerando o contexto territorial e o bioma em que a área de estudo está inserida, destacam-se os instrumentos voltados à conservação da Mata Atlântica, que atribuem aos municípios um papel relevante na implementação de ações de proteção, recuperação e gestão sustentável da vegetação nativa.

A Lei da Mata Atlântica (BRASIL, 2006), regulamentada pelo Decreto Nº 6.660/2008, atribui aos municípios um papel estratégico na proteção dos remanescentes desse bioma por meio de instrumentos de gestão territorial e ambiental. Dentre esses instrumentos, destaca-se o Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica (PMMA), que tem como objetivo identificar áreas prioritárias e propor ações voltadas à conservação, manejo, fiscalização e recuperação da vegetação nativa. Dessa forma, o PMMA representa uma ferramenta essencial para integrar a proteção da Mata Atlântica ao planejamento local e às políticas públicas ambientais (EMPLASA, 2017).

## **2.2 Importância do zoneamento ecológico-econômico**

O planejamento territorial possui uma grande relevância para gestão pública, por isso é crucial que as normativas que regem o ZEE visem a conservação dos recursos naturais e o desenvolvimento sustentável. O amadurecimento do ZEE, causados pelas discussões a respeito do planejamento ambiental, mostra ser um instrumento de gestão pública eficaz na promoção entre o desenvolvimento e conservação (Lopes et al., 2020).

Apesar da importância do ZEE para o ordenamento territorial, estudo e publicações sobre o tema ainda são escassos e com baixa adesão científica, principalmente aqueles que integram parâmetros socioeconômicos (Lopes et al., 2020). Não existe um número significativo de artigos sobre ZEE no Brasil, o que indica que este campo de estudo oferece oportunidades significativas e enfrenta desafios que merecem uma investigação mais aprofundada. Isso sugere que o ZEE não possui uma representação expressiva em publicações de alto impacto nas universidades ou nos periódicos. Diante disso, os autores enxergam que futuros trabalhos poderão ser desenvolvidos para ampliar o conhecimento sobre essa temática, tendo uma abordagem mais abrangente, sugerindo novas discussões e aprofundando as análises (Arantes; Silva; Lourenço, 2023).

O ZEE é um instrumento jurídico e de diagnóstico que serve para diversos fins, incluindo a promoção de debates públicos sobre o uso da terra e a capacitação de equipes para gerar e avaliar informações a respeito dos diversos aspectos dos territórios, como recursos naturais, população, usos e modos de vida (Favareto; Razera, 2023).

O ZEE é um instrumento crucial para o planejamento e a gestão territorial, integrando variáveis ambientais e dinâmicas socioeconômicas de diferentes regiões. Sua elaboração estabelece zonas de manejo que respeitam as características locais, fornecendo suporte aos órgãos gestores na formulação de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável. A eficácia do ZEE depende de uma metodologia que considere aspectos ambientais, sociais e econômicos, facilitando a análise integrada e contribuindo para uma ocupação territorial mais adequada (Arantes; Silva; Lourenço, 2023).

Também pode ser definido como um instrumento indicativo e dinâmico para a tomada de decisões e formulação de políticas. O apoio contínuo às decisões relacionadas às políticas de desenvolvimento e ao ordenamento territorial evidencia seu caráter como instrumento de gestão pública e social. Sua aplicação pode ser ajustada à realidade ecológica e econômica de cada local, conforme a disponibilidade de dados existente (Pereira et al., 2012; Steinberger & Romero, 2000).

A elaboração de um ZEE mostra ser um processo complexo e que demanda tempo, Favareto e Razera (2023) relata que para a Amazônia Legal o tempo de execução variou de 2 a 12 anos, sem considerar as interrupções. Também foi constatado que o tempo de elaboração não possui correlação direta com a escala (1:250.000 e 1:1.000.000) ou abrangência territorial. Os estados utilizam diferentes arranjos institucionais e recursos para aplicação do ZEE, com destaque para a participação de equipes técnicas estaduais e consultorias. Apesar da grande variação nos custos de elaboração, não há correlação clara entre esses custos e os resultados

obtidos, sugerindo a necessidade de uma melhor compreensão dos impactos dos diferentes arranjos na implementação do ZEE.

Os instrumentos de ordenamento territorial no Bioma Amazônico têm o potencial de promover avanços no bioma, principalmente pelo valor reconhecido por sua biodiversidade, peso econômico e serviços ecossistêmicos. No entanto, isso exige uma decisão política que equilibre crescimento econômico, conservação ambiental e qualidade de vida. Sem essa ação, o ZEE pode se limitar a atender interesses particulares, agravando conflitos e desafios da região, enquanto o crescimento populacional intensificará demandas, reforçando a necessidade urgente de implementar políticas de planejamento territorial (Ferreira; Trindade Júnior, 2023).

O estudo realizado por Palacios-Veiga *et al.* (2021) analisou os padrões espaciais de perda de florestas em áreas destinadas à conservação e recuperação ecológica em Alto Amazonas, no Peru, durante o período de 2012-2019. Os resultados mostram que a ausência do ZEE na gestão territorial, contribuiu para o desmatamento, especialmente em áreas destinadas à recuperação por conflitos de uso. As perdas de floresta concentram-se no Sul e próximo a estradas, enquanto áreas remotas apresentam menor impacto. Acredita-se que a implementação de diretrizes voltadas para o ZEE irá trazer grandes benefícios do ponto de vista socioambiental e econômico. Além de realizar estudos geoespaciais detalhados e desenvolver sistemas de inteligência territorial para melhorar o planejamento estratégico e a gestão sustentável do território.

Outro trabalho salientou as adversidades do ordenamento territorial no estado do Maranhão, com foco no Bioma Amazônico, destacando dificuldades e dilemas relacionados à sua implementação de forma alinhada à realidade socioespacial da Amazônia maranhense. Existem diferentes abordagens sobre o ordenamento territorial e o ZEE, incluindo os aspectos teóricos, práticos e metodológicos em diferentes contextos. Mostrando que estes esforços destacam a relevância do tema e a necessidade de identificar os acertos, os desafios e os entraves que dificultam a implementação do ZEE no Brasil (Ferreira; Trindade Júnior, 2023).

Existem diversos problemas na execução do ZEE, podendo destacar o desconhecimento desses instrumentos pela população, prejudicando sua efetividade. Exclusão de áreas que são essenciais devido à relevância dos recursos e conservação, como faixas marítimas. Zonas com maior valor agregado negligenciadas, como territórios quilombolas e assentamentos. Além de outros agravantes, como a desatualização do Código de Meio Ambiente estadual, a baixa implementação de Planos de Manejo e a limitada integração de políticas públicas (Ferreira; Trindade Júnior, 2023).

Um dos principais desafios do ZEE está relacionado ao desenvolvimento de metodologias que permitam uma integração mais rápida e eficiente das variáveis disponíveis. As dificuldades metodológicas iniciam na definição de indicadores, devido à complexidade das dinâmicas socio territoriais envolvidas. A metodologia deve considerar as interações entre os aspectos ambientais e socioeconômicas da área de estudo, de modo a incorporar essas características no processo de elaboração do ZEE (Arantes; Silva; Lourenço, 2023). O estudo realizado por Lopes *et al.* (2021) analisou diversos estudos de zoneamento em bacias hidrográficas entre 1996 e 2014, identificando uma evolução nos parâmetros utilizados, que inicialmente focavam em aspectos físicos-bióticos e, ao longo dos 22 anos, os estudos tiveram mudanças relevantes e passaram a incorporar também dados socioeconômicos. Essa transição resultou em propostas de ZEE mais robustas e adaptadas à dinâmica territorial.

Embora o Ministério do Meio Ambiente tenha publicado diretrizes metodológicas em 2006, o documento é mais voltado para questões qualitativas e históricas, sem fornecer procedimentos metodológicos claros, o que tem levado à criação de novas metodologias ou à adaptação das existentes (BRASIL, 2006; Arantes *et al.*, 2023; Lopes *et al.*, 2020).

Apesar da importância das diretrizes do MMA para orientar a formulação de propostas no contexto do ZEE, elas apresentam uma abordagem mais filosófica do que prática, carecendo de orientações concisas sobre escala, parâmetros, métodos e técnicas de análise. Isso dificulta a elaboração do ZEE, evidenciando a necessidade de estabelecer procedimentos metodológicos mais detalhados e específicos para facilitar o planejamento e a gestão do uso da terra.

Por falta de uma padronização clara e reconhecida é comum que autores que conduzam este tipo de estudo utilizem metodologias de referências anteriores ou que desenvolvam suas próprias abordagens, apesar da existência de diretrizes fornecidas pelo Ministério do Meio Ambiente. A adaptação de diferentes metodologias no ZEE é justificável pela necessidade de atender às características únicas de cada região, tornando inviável um padrão único para todas as condições socioambientais do Brasil. Também não é observado um padrão quanto ao uso de softwares, variáveis ou parâmetros, sendo que cada caso adaptou os métodos às particularidades da área estudada e aos objetivos específicos de cada pesquisa (Arantes; Silva; Lourenço, 2023).

Para Pereira *et al.* (2011) a metodologia não é predefinida, mas é baseada em uma abordagem dinâmica dos sistemas ambientais e das formações socioeconômicas e culturais do local, de forma que estabelece interações entre seus componentes de forma multidisciplinar. Por essa razão, pode-se enfrentar dificuldades metodológicas na busca por variáveis que expressem a relação adequada entre os aspectos sociais e geográficos, dada a complexidade das

dinâmicas territoriais. O desenvolvimento deve ser entendido como um processo abrangente que envolve as interações social, econômica, política, institucional, cultural e ambiental.

Os ZEEs produzem vários resultados, como a criação de unidades de conservação, a redução das exigências de reserva legal em propriedades privadas, a facilitação na obtenção de licenças para obras de infraestrutura, e o fornecimento de um conjunto de referência que legitima o planejamento territorial, evidenciado por sua menção em outros instrumentos normativos, como leis e decretos. Estes resultados dão origem a documentos complexos, base de dados georreferenciados, produtos cartográficos, diagnóstico e identificação de zonas que subsidiam o uso e conservação de recursos naturais (Favareto; Razera, 2023).

Dentre os aspectos positivos destaca-se a abertura à participação pública em nível de tomada de decisão, a partir da identificação de demandas e da formulação de objetivos específicos em colaboração com a sociedade, o que conferiu maior aceitação e legitimidade às proposições apresentadas nos zoneamentos (Santos & Ranieri, 2013).

A gestão social deve fundamentar-se em informações objetivas, a fim de subsidiar a tomada de decisões conscientes e a promoção do desenvolvimento sustentável. Nesse contexto, apresenta elevado potencial de aplicação para gestores de diferentes setores, com possibilidade de replicação em outros territórios. No entanto, sua aplicação ainda enfrenta limitações relacionadas à obtenção de resultados qualitativos, os quais demandam estudos mais aprofundados e a alocação de recursos adicionais.

Além desses resultados, o processo de elaboração do ZEE pode gerar benefícios intangíveis, como o aprimoramento do conhecimento territorial por parte do poder público e privado, e especialmente a capacitação técnica em relação ao uso de bases de dados georreferenciados. No entanto, a natureza desses resultados dificulta sua sistematização. O processo de elaboração também promove a criação de um espaço para debates e deliberações que abrange a comunidade, influenciando as redes de contato dos participantes e sua compreensão das dinâmicas de interesses envolvidos (Favareto; Razera, 2023).

Após sucessivas regulamentações e tratativas entre a gestão pública entre as esferas federal e estadual, a elaboração e responsabilidade do ZEE se encontra em uma situação institucional indefinida, devido ao desmantelamento de algumas estruturas e competências por diretrizes recentes. No entanto, muitos documentos oficiais e a literatura continuam a referir-se aos ZEEs, seja como desdobramentos diretos ou como justificativa e legitimação de certas medidas. Essas ações podem ter efeitos adversos, tanto no fortalecimento da conservação ambiental quanto facilitando a flexibilização de restrições que levam à degradação.

O arranjo institucional da elaboração dos ZEEs possui duas características principais que reforçam esta dinâmica e aplicabilidade. Primeiro, o ZEE é um documento com poder limitado de implementação efetiva. A aplicação das diretrizes nele contidas depende fortemente do envolvimento e compromisso dos atores públicos e privados. Isso significa que, para que as recomendações do ZEE sejam realmente adotadas, é necessário que os órgãos governamentais, empresas e outros grupos interessados estejam dispostos a seguir as orientações e integrá-las em suas práticas. Em segundo lugar, o ZEE enfrenta problemas de coordenação que dificultam sua execução. No nível vertical, há uma autonomia considerável dos estados em relação ao governo federal, o que pode gerar inconsistências entre as políticas estaduais e federais. No nível horizontal, o ZEE precisa articular diretrizes que envolvem diversas áreas do governo, além da ambiental, sem dispor de mecanismos eficazes para resolver os conflitos que podem surgir entre essas diferentes áreas. Isso pode limitar a eficácia do ZEE e sua capacidade de promover uma gestão integrada e sustentável dos territórios (Rodrigues; Gandolfi, 2020).

Em síntese, o ZEE configura-se como um instrumento estratégico para o planejamento e a gestão territorial, ao integrar dimensões ambientais, sociais e econômicas na organização do uso do território. Apesar de seu potencial para subsidiar políticas públicas e promover o desenvolvimento sustentável, sua implementação ainda enfrenta desafios relacionados à ausência de metodologias padronizadas, limitações institucionais, dificuldades de coordenação entre diferentes níveis de governo e baixa produção científica sobre o tema. Nesse contexto, torna-se fundamental ampliar os estudos voltados ao ZEE, especialmente aqueles que incorporem abordagens metodológicas integradas e análises socioeconômicas, de modo a fortalecer sua aplicabilidade e efetividade como instrumento de gestão territorial. O aprimoramento dessas abordagens pode contribuir para uma melhor compreensão das dinâmicas territoriais e para a formulação de estratégias mais eficientes de conservação dos recursos naturais e ordenamento do uso da terra.

### **3 OBJETIVO**

#### **3.1 Objetivo geral**

O objetivo geral deste projeto foi elaborar uma proposta de Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) que possa ser aplicada à Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), como contribuição às políticas públicas de gestão da ocupação do território e de preservação e conservação do meio ambiente.

#### **3.2 Objetivos específicos**

Para viabilizar o alcance do objetivo geral deste trabalho, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

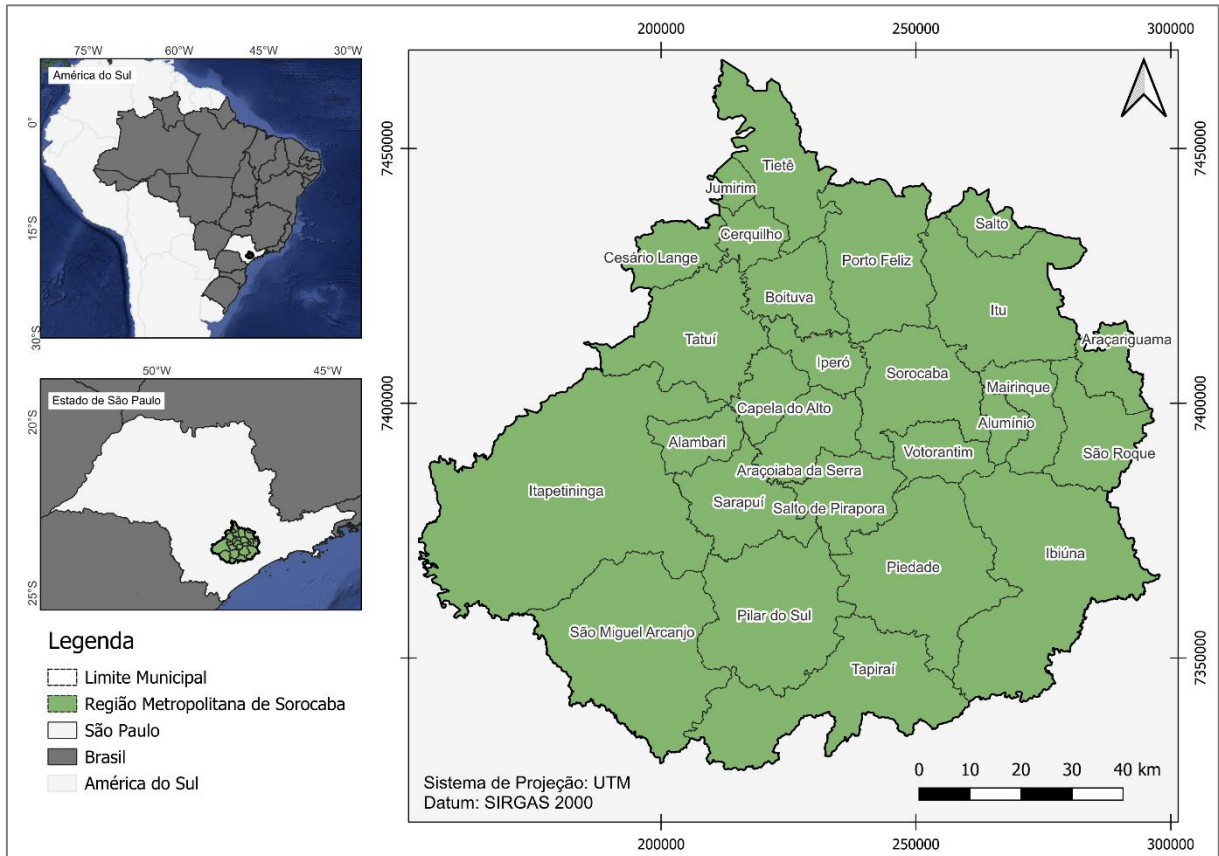
- a. Realizar revisão de escopo e literatura científica, de forma estruturada e sistemática, com o propósito de identificar o panorama atual relacionado ao ZEE bem como os principais métodos, variáveis e abordagens aplicadas ao planejamento e ordenamento territorial;
- b. Levantar, sistematizar e realizar o pré-processamento das variáveis ambientais, sociais e territoriais, por meio da organização e padronização de bases de dados espaciais e não espaciais, garantindo sua consistência e adequação para as etapas subsequentes de análise e modelagem;
- c. Definição das zonas de manejo, a partir da integração e análise das variáveis selecionadas, considerando critérios ambientais, socioeconômicos e territoriais relevantes para o ordenamento e planejamento regional;
- d. Aplicar a AHP em conjunto com técnicas de aprendizado de máquina baseadas em redes neurais artificiais, visando a estratificação e diferenciação espacial das regiões de acordo com seus níveis de aptidão e restrição ao uso do território;
- e. Classificar e validar a rede neural desenvolvida, por meio da análise do desempenho do modelo e da verificação da consistência dos resultados obtidos na estratificação territorial;
- f. Obter e refinar o mapa final de ZEE, com base nos resultados da modelagem e nas etapas de validação, de modo a consolidar um produto cartográfico que subsidie o planejamento territorial e a gestão ambiental.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), localizada na região centro oeste do Estado de São Paulo englobando 27 municípios (Figura 1).

Figura 1. Mapa de localização da Região Metropolitana de Sorocaba



Fonte: Autoria própria.

De acordo com os dados do SEADE, (2023), em 2023 a população da RMS atingiu cerca de 2.194.465 habitantes em uma área territorial de 11.611,48 km<sup>2</sup> com densidade demográfica de 189 hab/km<sup>2</sup>. Em 2020 a população rural da RMS foi 203.342 habitantes enquanto a população urbana era 1.875.465 habitantes, tendo um grau de urbanização geral de 90,2% e 692.585 domicílios particulares ocupados.

O PIB da RMS em 2022 (IBGE, 2024) alcançou R\$ 70,9 bilhões, respondendo por 3,95% do PIB paulista ou 4,8% do PIB da MMP. A RMS possui influência econômica e revela importância no abastecimento de recursos provenientes de atividade industriais e agrícolas, principalmente para MMP (EMPLASA, 2014). As atividades econômicas da RMS se

apresentam de forma diversificada, predominando nos setores metalúrgico, têxtil e do agronegócio.

A infraestrutura na região é abundante, incluindo fornecimento de água, gás natural e energia elétrica. Uma crescente oferta de mão de obra qualificada foi observada, devido à presença de importantes instituições de ensino e centros de formação profissional, como a Universidade Estadual Paulista (Unesp), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Universidade de Sorocaba (Uniso), Faculdade de Engenharia de Sorocaba (Facens), Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (Fatec) e Escola Técnica Estadual (Etec). A localização estratégica com fácil acesso a São Paulo e Campinas por rodovias bem estruturadas atraiu grandes empresas de diversos segmentos e seus fornecedores (EMPLASA, 2017).

Além de suas funções urbanas e regionais, a RMS apresenta muita diversidade, especialização e integração socioeconômica. Essa integração é facilitada por importantes rodovias que conectam os municípios da região à capital e a outras regiões do Estado, como a Rodovia Presidente Castello Branco (SP-280), a Rodovia Raposo Tavares (SP-270), a Rodovia Marechal Rondon (SP-300) e a Rodovia Senador José Ermírio de Moraes (Castelinho – SP-075) (Barreto, 2012; EMPLASA, 2017).

Segundo a classificação climática Köppen-Geiger, a região possui um clima Cwb, caracterizado por ser de clima tropical de altitude, com verão chuvoso e inverno seco. Já a vegetação primária é composta por uma floresta ombrófila densa, em uma zona de transição entre Mata Atlântica e Cerrado (SALLES et al., 2008; Oliveira et al., 2016).

A área apresenta bons índices de cobertura vegetal nativa, com destaque para os municípios de Tapiraí, Ibiúna, São Roque, Piedade e Araçariguama. De acordo com o Cadastro Nacional de Unidades de Conservação do Ministério do Meio Ambiente, a RMS abriga diversas Unidades de Conservação (UC), definido pela Lei n.º 9.985/2000 que também institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza (SNUC). Mantendo, ainda, 157.252,2 hectares de seu território (1.572,2 km<sup>2</sup> ou 13,54% do total) protegido por UC pertencentes à União, Estado ou Municípios. Tendo como as mais relevantes a área de Proteção Ambiental da Represa de Itupararanga; os Parques Estaduais Carlos Botelho e Jurupará; a Floresta Nacional de Ipanema e o Parque Municipal Corredores da Biodiversidade (EMPLASA, 2014; EMPLASA, 2017).

As UC são divididas em categorias de acordo com as suas características específicas, todas com o intuito de proteger e preservar a fauna e flora nativa, através da proteção integral ou proteção com uso sustentável. Neste sentido a RMS abriga as UC, como Área de Proteção

Ambiental (APA), Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN), Parque Estadual (PE) e demais instrumentos descritos no Quadro 1.

Quadro 1. Relação das principais Unidades de Conservação da Região Metropolitana de Sorocaba

<b>Tipo</b>	<b>Domínio</b>	<b>Descrição</b>	<b>Legislação</b>
Proteção Integral	Estadual	Parque Estadual Carlos Botelho	Decreto Estadual n.º 19.499, de 10 de setembro de 1982
		Parque Estadual do Jurupará.	Decreto Estadual n.º 35.703/35.704, de 22 de setembro de 1992
	Municipal	Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade	Compensação ambiental privada
		Parque Natural Municipal de Brigadeiro Tobias	Decreto Municipal Nº 21.618, de 7 de janeiro de 2015
		Estação Ecológica Mário Covas	Lei n.º 6.416, de 27 de maio de 1997
		Estação Ecológica Municipal do Pirajibu	Decreto Municipal Nº 22.023, de 28 de outubro de 2015
Uso sustentável	Federal	Floresta Natural de Ipanema	Decreto Federal Nº 530, de 20 de maio de 1992
	Particular	RPPN - Ibiúna	Não aplicável
		RPPN - Ibiúna	Não aplicável
		RPPN - Ibiúna	Não aplicável
		RPPN - Ibiúna	Não aplicável
		RPPN - Araçoiaba da Serra	Não aplicável
		RPPN - Araçoiaba da Serra	Não aplicável
		RPPN - Tapiraí	Não aplicável
		RPPN - Tapiraí	Não aplicável
		RPPN - Araçariguama	Não aplicável
	Estadual	APA Cabreúva	Lei Estadual n.º 12.289, 2 de março de 2015
		APA Itupararanga	Lei Estadual n.º 11.579, de 2 de dezembro de 2003
		APA Serra do Mar	Decreto Estadual n.º 22.717, de 21 de setembro de 1984
		APA Tietê	Decreto Estadual n.º 20.959, de 8 de junho de 1983

Fonte: Adaptado EMPLASA (2017) e Junior *et al.* (2020)

## 4.2 Revisão de escopo

A revisão de escopo foi realizada a partir de uma análise bibliométrica, conforme proposto por CAIADO *et al.*, (2017) e Arante *et al.* (2023), no intuito de identificar as publicações acerca do tema com maior relevância e impacto na comunidade científica. Dessa forma, foi possível realizar uma análise quantitativa e obter um panorama sobre o assunto, fornecendo uma visão geral sobre pesquisas atuais e tendências de produção científica.

O *software Mendeley Reference Manager* foi utilizado para realizar o gerenciamento das referências obtidas a partir das pesquisas realizadas em banco de dados considerados relevantes, que são: *Web of Science*, Periódico CAPES e Scopus.

Duas abordagens de pesquisa, por abrangência e profundidade, foram adotadas utilizando as palavras-chaves: *analytical hierarchical process*; *artificial neural networks*; *Sorocaba Metropolitan Region*; *ecological economic zoning*. Optou-se por utilizar as palavras-chaves na língua inglesa devido a maior abrangência dos termos, evitando que a pesquisa fique restrita a publicações brasileiras.

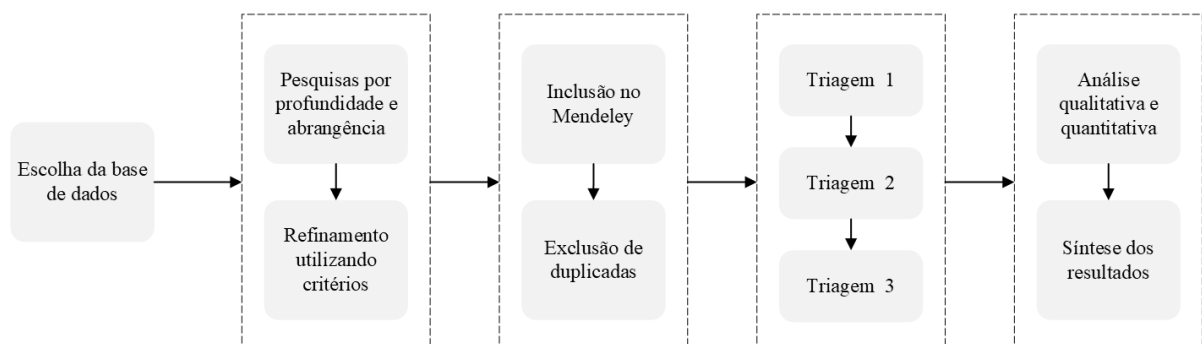
No intuito de direcionar as pesquisas para o assunto de interesse, foram considerados alguns critérios:

- a. Tipo de publicação: Apenas artigos científicos e capítulos de livros;
- b. Idioma: Publicações na língua portuguesa ou inglesa;
- c. Área de conhecimento: Ciências ambientais, estudos urbanos, ciências multidisciplinares, sensoriamento remoto, ciências sociais interdisciplinares, gestão pública e geopolítica;

Após a compilação das publicações encontradas nos bancos de dados as mesmas foram incluídas no gerenciador de referências e excluídas aquelas duplicadas. Os dados obtidos foram organizados com a ajuda do Microsoft Office Excel, para posterior organização e triagem em três etapas: exclusão dos artigos com título fora do contexto, exclusão dos artigos que não possuem elementos relevantes após leitura do resumo e exclusão de artigos que não estão relacionados com o tema após leitura integral.

Dessa forma, foi realizada uma avaliação quantitativa e qualitativa das literaturas obtidas como relevante, possibilitando a apresentação dos resultados e sínteses dos pontos mais importante acerca do tema. A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia aplicada.

Figura 2. Fluxograma da metodologia adotada na revisão de escopo, incluindo o processo de seleção dos estudos mais aderentes ao tema.

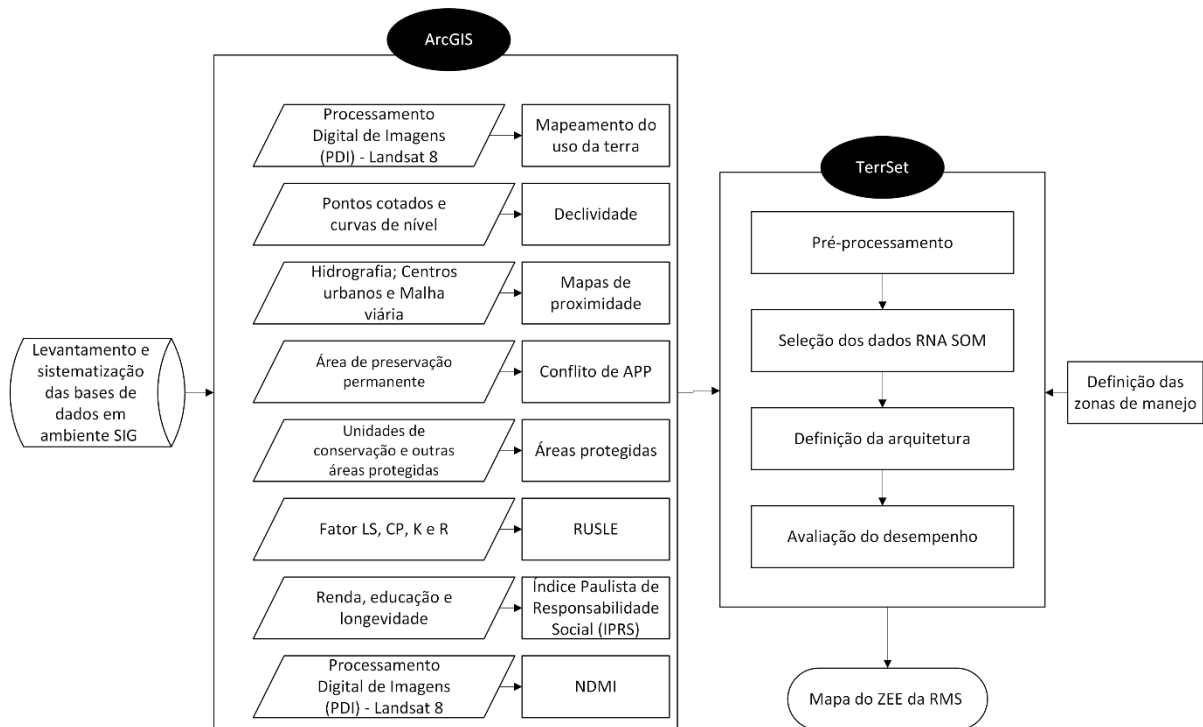


Fonte: Autoria própria

### 4.3 Levantamento e sistematização de banco de dados

A metodologia adotada neste estudo está sintetizada no fluxograma da Figura 3, que apresenta de forma sequencial, as principais etapas do desenvolvimento da pesquisa. O fluxograma organiza desde a aquisição e preparação das bases de dados utilizadas, os procedimentos de análise e integração das variáveis ambientais e socioeconômicas, até a geração dos produtos finais que subsidiam a proposta do ZEE.

Figura 3. Fluxograma geral da metodologia para obtenção do ZEE a partir da RNA-SOM



Fonte: Autoria própria

A cartografia básica de apoio, foi construída a partir da vetorização das informações planialtimétricas contidas nas cartas topográficas em escala de 1:10.000, disponibilizadas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC, 1979). Também foram utilizados dados em formato digital obtidos por meio do catálogo de Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo (IDEA - SP) (DATAGEO, 2022) e imagens de satélite disponibilizadas gratuitamente pela *United States Geological Survey* (USGS). O estudo, contou com o repositório da SEADE para obtenção das bases cartográficas de interesse, além de uma base de dados provida pelo Laboratório de Geoprocessamento e Modelagem Matemática Ambiental (LABGEMM) do Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba (ICTS), composta por informações referentes a estradas, hidrografia, curvas de nível, pontos

cotados e limites, que serviram de base para a obtenção de diversos parâmetros de ordem espacial.

Tendo em vista a tipologia dos dados e objetivo deste estudo a organização da base de dados foi realizada em um ambiente SIG. A elaboração dos produtos cartográficos e operações foram realizadas a partir de diversos *softwares*, como, ArcGIS 10.6; QGIS 3.36.2; Google Earth Pro e TerrSet.

O Quadro 2 apresenta a síntese das etapas realizadas no desenvolvimento metodológico, com sua respectiva base de dados e software.

Quadro 2. Base de dados utilizado para o levantamento e sistematização dos parâmetros.

<b>ETAPAS</b>	<b>Base de dados</b>
Mapa de localização	IBGE
Uso do solo 2023	Landsat 8
Proximidade Rede Hidrográfica	LAB GEOMAT
UC	DATAGEO
Distância de Centros Urbano	IBGE 2019
Distância Malha viária	IBGE 2023
Erodibilidade do Solos	IBGE
Erosividade da Chuva	DATAGEO 2022
Fator topográfico	DATAGEO 2015
Índice Paulista de Responsabilidade Social - IPRS	SEADE
NDMI	Landsat 8

Fonte: Autoria própria

#### 4.4 Mapeamento do uso da terra

O mapeamento do uso da terra foi elaborado utilizando a classificação supervisionada pelo método da Máxima Verossimilhança (MAXVER) conforme realizado por pesquisadores, utilizando o software ArcGIS (Andrade, 2016; Nery et al., 2013; Oliveira et al., 2016a).

Para isso, foram utilizadas as imagens multiespectrais do Landsat 8-9 (sensor OLI/TIRS), disponibilizadas pela USGS. Todas as cenas utilizadas fazem parte da coleção 2 de nível 2, as quais possuem correção geométrica, radiométrica e de reflectância no topo da atmosfera (TOA) (USGS, 2016).

No intuito de eliminar possíveis interferências, foi realizado um pré-processamento para correção da reflectância na base da atmosfera (BOA), trazendo uma melhor representatividade na análise do uso da terra (Aguilar Arias; Mora Zamora; Vargas Bolaños, 2015; Rezende; Marques; Rosa, 2017).

Devido à extensão da área de estudo, foi necessário produzir um mosaico composto por quatro cenas, todas com resolução espacial de 30 metros. A seleção das imagens considerou critérios como qualidade radiométrica, baixa cobertura de nuvens e correspondência ao mesmo período do ano, a fim de garantir maior consistência entre os dados utilizados. Como o estudo começou a ser desenvolvido em 2024, as imagens mais recentes que atendiam simultaneamente a esses critérios correspondiam ao mês de março. Por esse motivo, optou-se por não utilizar imagens mais atualizadas, priorizando a qualidade e a comparabilidade das informações. As demais especificações técnicas dos arquivos *raster* utilizados encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3. Informações técnicas a respeito das imagens de satélite utilizadas neste estudo

Satélite	Ano	Dia/mês	Órbita/ponto
Landsat 8-9 (OLI/TIRS C2 L2)	2023	20/mar	220/76
	2023	20/mar	220/77
	2023	21/mar	219/76
	2023	21/mar	219/77






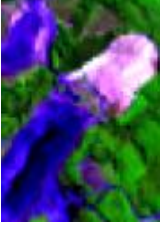

Fonte: Autoria própria

Para aplicar a metodologia MAXVER é necessário realizar a composição colorida RGB para criação de uma imagem multiespectral a partir da combinação das bandas do satélite. Segundo Florenzano (2022), a melhor composição que destaca as classes de corpos hídricos e vegetação em áreas urbanas é a falsa cor, onde são consideradas bandas no comprimento de onda Infravermelho Médio, Infravermelho Próximo e Vermelho, respectivamente. Visto isso, foram utilizadas as bandas 6, 5 e 4 (USGS, 1984) para compor a falsa cor (USGS, 2016). Para composição de cor verdadeira, ou seja, aquela que se assemelha ao que é visto em imagens sem tratamento é feita pela composição das bandas 4, 3 e 2 no Landsat 8-9 (USGS, 2016).

Na classificação supervisionada MAXVER foram selecionadas amostras de treinamento representativas referente a cada classe de interesse do estudo, onde o *clustering*, ou seja, o agrupamento é realizado de forma automática pela ferramenta. Posteriormente é identificado os pixels que manifestam respostas espectrais semelhantes àqueles previamente selecionados e identificados, os *clusters* são classificados considerando a ponderação das distâncias entre as médias dos níveis digitais (Lillesand; Kiefer; Chipman, 2004). Essa técnica é baseada na média e variância das amostras de treinamento para calcular a probabilidade de um pixel pertencer as classes identificadas, com isso este pixel junta-se a classe de maior probabilidade (Liu, 2007).

Na elaboração do mapa de uso da terra foram definidas classes (Quadro 4), a partir do descrito no nível I e II do Manual Técnico de Uso da Terra do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013).

Quadro 4. Classes de uso da terra e exemplares de composição falsa cor

Classe	Descrição	Composição falsa cor
Matas	Áreas de floresta ou campestre de ocorrência natural	
Reflorestamento	Áreas antrópicas agrícolas voltadas a silvicultura e reflorestamento	
Agrícolas	Áreas antrópicas agrícolas incluindo culturas permanentes e pecuária de animais de pequeno, médio ou grande porte	
Lavouras temporárias	Áreas antrópicas agrícolas incluindo culturas temporárias	
Urbanizadas	Áreas antrópicas constituída por aglomerados urbanos e seus componentes, estão abrangidos sistemas viários; vilas; cidades; complexos industriais; e outras áreas urbanizadas	
Mineração	Áreas antrópicas destinadas a mineração de material metálico e não metálico	
Corpos hídricos	Corpos hídricos incluindo continentais ou costeiros	

Fonte: Adaptado IBGE (2013).

A avaliação da acurácia do mapa do uso da terra gerado foi mensurada através do índice Kappa, um coeficiente de concordância que verifica a qualidade do mapeamento Cohen (1960). A técnica multivariada discreta utilizada na análise de precisão é característico deste índice, em que realiza análise entre todos os elementos da matriz de confusão (Nery et al., 2013). O índice Kappa varia de 0 a 1 e segue a classificação definida por Landis & Koch (1977), descrita na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação do índice Kappa.

Concordância	Índice Kappa
<b>Péssima</b>	< 0
<b>Ruim</b>	0,0 – 0,19
<b>Razoável</b>	0,2 – 0,39
<b>Boa</b>	0,4 – 0,59
<b>Muito Boa</b>	0,6 – 0,79
<b>Excelente</b>	0,8 – 1,00

Fonte: Landis e Koch (1997).

#### 4.5 Declividade

A declividade foi extraída do Modelo Digital de Elevação (MDE), por meio da função matemática *Slope*, módulo *Spatial Analyst Tools* disponível no ArcGIS, gerando o Mapa de declividade.

O MDE foi construído a partir da triangulação de Delaunay (Triangular Irregular Network – TIN) utilizando as curvas de nível e pontos cotados, o qual através das características do relevo e da drenagem representa a morfologia da superfície por meio de faces triangulares interligadas (Li *et al.*, 2005; Aggidis; Benzon, 2013; Câmara *et al.*, 1999).

Devido proporção entre o desnível e a distância horizontal a declividade pode ser expressa em graus ou em porcentagem (Valeriano; Albuquerque, 2010). Neste trabalho optou-se por seguir o padrão da Embrapa (2018), o qual definição das classes de declividade em porcentagem, conforme mostra o Quadro 5.

Quadro 5. Classificação do relevo conforme declividade em porcentagem

Classe	Declividade (%)	Descrição
Plano	0 - 3	Superfície de topografia esbatida ou horizontal, onde os desnivelamentos são muito pequenos
Suave ondulado	3 - 8	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives suaves
Ondulado	8 - 20	Superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros, apresentando declives moderados
Forte ondulado	20 - 45	Superfície de topografia movimentada, formada por outeiros e/ou morros e raramente colinas, com declives fortes
Montanhoso	45 - 75	Superfície de topografia vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes e muito fortes
Escarpado	>75	Áreas com predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes e escarpamentos.

Fonte: Adaptado EMBRAPA (2018).

#### 4.6 Mapas de proximidade

O mapeamento da proximidade dos centros urbanos, corpos d'água, da malha viária, APP e UC (proteção integral e uso sustentável) foram realizados por meio do cálculo da distância euclidiana, utilizando a função “*Proximity (distance raster)*” do *software* QGIS, versão 3.36.2.

Essa função gera uma camada *raster* na qual cada célula representa a distância mínima em linha reta entre o ponto correspondente e os elementos analisados, permitindo a identificação de zonas de influência e acessibilidade ao redor dos fragmentos florestais e demais feições.

#### 4.7 Áreas de preservação permanente

De acordo com o Código Florestal (Lei N° 12.651/ 2012) APP são faixas de vegetação que se encontradas ao longo da margem dos cursos d'água, lagos e nascentes, ou em encostas ou topo de morros íngremes, que tem a finalidade de garantir a preservação dos recursos naturais essenciais para o equilíbrio ecológico. Elas são áreas que fornecem importantes serviços ecossistêmicos como a proteção da biodiversidade, regulação do ciclo hidrológico, estabilidade geológica, e controle de processos de sedimentação e poluição.

A delimitação das APP foi realizada utilizando a ferramenta *buffer* do ArcGIS 10.6 (ESRI, 2017), onde o tamanho das faixas foi definido com base no Quadro 6. Com isso, foi utilizada a ferramenta *insert* do ArcGIS 10.6, para identificar as APP adequadas, com

cobertura vegetal e APP inadequada, sem cobertura vegetal. O produto resultante desta etapa foi denominado como Mapa de conflitos de uso da terra nas APP.

Quadro 6. Critérios para definição da APP de acordo com o Código Florestal (Lei Nº 12.651/ 2012)

<b>Tipo</b>	<b>Critério de delimitação</b>	<b>Extensão da APP</b>
<b>Cursos d'água naturais</b>	Largura do rio < 10 m	Largura da faixa marginal 30 m
	Largura do rio < 10 - 50 m	Largura da faixa marginal 50 m
	Largura do rio < 50 - 200 m	Largura da faixa marginal 100 m
	Largura do rio < 200 - 600 m	Largura da faixa marginal 200 m
	Largura do rio < 600 m	Largura da faixa marginal 500 m
<b>Nascentes</b>	Todas	Raio de 50m ao redor da nascente
<b>Lagos e lagoas naturais</b>	Área Rural < 20 ha	Raio de 50 metros
	Área Urbana	Raio de 30 metros
	Área Rural > 20 ha	Raio de 100 metros
<b>Topo de morro e encostas</b>	Declividade > 45°	Área ha

Fonte: Adaptado Código Florestal (Lei Nº 12.651/ 2012) (BRASIL, 2012).

#### 4.8 Equação universal de perda de solo revisada

Utilizou-se a Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE) para estimar a perda média anual de solo, o qual seguirá a classificação adotada pela FAO (1981), conforme Tabela 2.

Tabela 2. Classificação da taxa de perda de solo da RUSLE

<b>Classe</b>	<b>Taxa de perda de solo (tha-1ano-1)</b>
<b>Baixa</b>	< 10
<b>Moderada</b>	10 -50
<b>Alta</b>	50 - 200
<b>Muito Alta</b>	> 200

Fonte: Adaptado FAO (1981).

A RUSLE (Equação 1) é definida pelo produto entre o fator de erosividade da chuva, fator de erodibilidade do solo, fator topográfico, fator de cobertura e manejo do solo e fator de prática conservacionistas (Alves et al., 2022;Lazzari *et al.*, 2015).

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (1)$$

Sendo:

A: perda de solo por unidade de área no tempo;

R: fator de erosividade da chuva;

K: fator de erodibilidade do solo;

LS: fator topográfico que relaciona a declividade e comprimento de rampa;

C: fator de manejo e uso do solo;

P: fator de práticas de ações de conservação do solo.

Os fatores foram determinados da seguinte maneira:

#### 4.8.1 Fator de erosividade da chuva

O fator de erosividade da chuva (R) é fundamental para o uso sustentável do solo, este expressa o potencial da chuva em desencadear erosões no solo. O cálculo do fator R é complexo e lento, sendo obtido a partir de dados pluviométricos (Bertoni & Lombardi, 2017). Por isso, optou-se por utilizar o mapa de Erosividade da Chuva do Estado de São Paulo produzido pelo Instituto de Pesquisas Ambientais – IPA (2022) e disponibilizado pelo DataGEO, onde os índices de erosividade foram calculados a partir de dados pluviométricos e espacializados por meio de interpolações pelo processo de krigagem ordinária em procedimento padrão da análise geoestatística (DataGEO, 2022).

#### 4.8.2 Fator de erodibilidade do solo

O fator de erodibilidade do solo (K), por meio das características específicas dos tipos de solo, expressa a suscetibilidade natural à agentes erosivos. Este fator assume um papel importante do planejamento e uso do solo (Arraes *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2010).

Visto isso utilizou-se o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo com a escala de 1:25000, produzido por Rossi (2017) e disponibilizado pelo DataGEO, para definir o solo da área de estudo. Para a definição do fator K utilizou-se a média dos valores definidos pelos autores Lombardi Neto e Bertoni (1997) e Fiorio (1998), conforme Tabela 3.

Tabela 3. Valor do fato K referente a cada tipo de solo

Tipo de solo	Fator K
<b>Cambissolo Háplicos (CX)</b>	0,0504
<b>Latossolo Vermelho (LV)</b>	0,0170
<b>Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA)</b>	0,0655

Fonte: Adaptado de (Fiorio, 2019; Lombardi Neto; Bertoni, 1975)

#### 4.8.3 Fator topográfico

Para o cálculo do fator topográfico (LS) foi utilizado a função “*r.watershed*” do QGIS 3.36.2. Esta função é baseada na modelagem do fluxo dos corpos hídricos, e por isso, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE) como referência de entrada (GRASS, 2022). Considerando a declividade (S) e o comprimento de encostas (L) os principais influenciadores na perda de solo, tem-se que o fator LS reflete o impacto da topografia no desencadeamento de processos erosivos (Panditharathne et al., 2019).

#### 4.8.4 Fator de uso e manejo

O fator de uso e manejo (CP) foi estimado por meio do Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI) (Arantes (2023), visto que essa abordagem o solo não exerce tanta influência na vegetação quando comparado aos outros índices vegetativos (Huete, 1988).

O SAVI, foi obtido a partir das mesmas imagens do satélite Landsat adquiridas para o Uso da terra. Esse índice é utilizado para corrigir o NDVI para a influência do brilho do solo onde a cobertura vegetal é baixa. O SAVI é calculado a partir da Equação 2, sendo a razão entre os valores das bandas espectrais do vermelho (R) e infravermelho próximo (NIR), neste trabalho foi adotado um fator de correção de brilho do solo (L) igual a 0,5 para acomodar a maioria dos tipos de cobertura da terra, ou seja, com áreas de cobertura vegetal em nível intermediário (USGS, 2024)Dermachi *et al.*, 2011).

$$SAVI = \frac{(1+L)(\rho_{iv}-\rho_v)}{(\rho_{iv}+\rho_v+L)} \quad (2)$$

Sendo:

SAVI: *Soil Adjusted Vegetation Index*;

$\rho_{iv}$ : banda do infravermelho próximo;

$\rho_v$ : banda do vermelho;

L: fator de ajuste do índice SAVI, sendo 0,5

Por meio da Equação 3, foi realizado a normalização linear do SAVI para aproximação do Fator CP, resultando no SAVI<sub>esc</sub>, que varie de 0 a 1. Isto ocorre, pois, a escala dos valores não segue a mesma proporcionalidade, tendo em vista que o SAVI varia de -1,5 a 1,5.

$$SAVI_{esc} = 0,3335 \times SAVI + 0,4998 \quad (3)$$

Sendo:

SAVI<sub>esc</sub>: refere-se ao valor normalizado do SAVI;

SAVI: refere-se ao valor do SAVI.

Para obtenção do fator CP é necessário realizar combinar os fatores C e P em um único plano de informação (Bertoni & Lombardi, 2017), por isso, após o escalonamento criou-se um PI com atribuição de valores entre 0 (urbana, descoberta e água) e 1 (vegetação e agrícola) para cada classe. Com o auxílio da ferramenta “Map Álgebra” do ArcGIS 10.6 foi realizada a multiplicação entre o SAVI<sub>esc</sub> e o PI, obtendo-se o produto do fator CP.

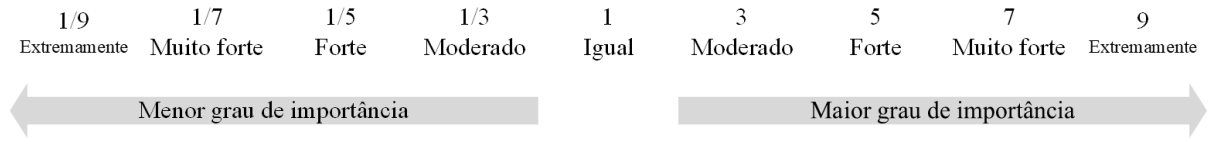
#### 4.8.5 Geração do mapa perda de solo

Após obtenção dos fatores da equação, foi elaborado o Mapa Perda de Solo por meio da aplicação do método AHP. Uma abordagem amplamente reconhecida e utilizada em processos de tomada de decisão complexos, que envolvem múltiplos critérios e alternativas. (Arya; Singh, 2021; Falowo; Ojo, 2023; Nyimbili; Erden; Karaman, 2018; Tudes; Yigiter, 2010; Yilmaz, 2022).

A combinação dos aspectos subjetivos e objetivos desta abordagem, possibilita que os tomadores de decisão avaliem a consistência dos critérios principais e subcritérios de acordo com sua relevância, considerando diferentes parâmetros (Taromideh et al., 2022).

Descrita por Saaty (1977), esta metodologia consiste na comparação e atribuição relativa da importância entre dois elementos, gerando uma matriz de comparação pareada. Para a atribuição de importância a cada variável, adotou-se a escala absoluta de Saaty (1977), que abrange a intensidade de 1 a 9, conforme descrito no Figura 4. Esse procedimento permite o cálculo dos pesos para cada critério e subcritérios, refletindo sua importância relativa.

Figura 4. Escala relativa para comparação pareada da importância entre critérios



Fonte: Saaty (1977),

Ainda, a consistência das atribuições de pesos é avaliada por meio do cálculo do Índice de Consistência (CI) (Equação 4), a Matriz Aleatória (RI) (Tabela 4) e a Razão de Consistência (CR) (Equação 5). A atribuição dos pesos é considerada aceitável quando a CR for inferior a 0,1 (Saaty, 1977).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Sendo:

CI: índice de consistência;

 $\lambda_{max}$ : autovalor máximo;

n: número de critérios.

Tabela 4. Valores de RI por número de critérios

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1977)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (5)$$

Sendo:

CR: Razão de consistência;

CI: Índice de consistência;

RI: Matriz Random-Like.

Utilizou-se o software Excel para construção da matriz de comparação pareada, enquanto a execução da AHP foi efetuada por meio da ferramenta “Map Algebra” e “Weighted Overlay” do software ArcGIS.

## 4.9 Índice paulista de responsabilidade social

Uma das cinco diretrizes estratégicas estabelecidas pelo Decreto Estadual N° 67.430, de 30 de dezembro de 2022, que trata do ZEE do Estado de São Paulo, refere-se à redução das desigualdades regionais. O Índice Paulista de Responsabilidade Social (IPRS) é uma das cinco variáveis associadas a essa diretriz, razão pela qual foi escolhido como indicador para abordar os aspectos sociais no contexto do ZEE.

Desenvolvido em 2000 pelo Sistema Estadual de Análise de Dados (SEADE), o IPRS tem como objetivo fornecer um parâmetro para mensurar o grau de desenvolvimento humano dos municípios paulistas. Baseado no IDH, o IPRS abrange as mesmas três dimensões: renda, escolaridade e longevidade, oferecendo uma ferramenta para avaliar o desempenho econômico e social dos municípios do estado (SEADE, 2022).

Originalmente o IPRS é um indicador relativo, ou seja, sua classificação não é fixa e varia conforme a distribuição dos dados analisados. Nesse formato, os municípios são categorizados em cinco grupos com base nos valores das dimensões, estabelecendo uma comparação relativa entre eles. Este formato de dado não é compatível com o modelo utilizado, por isso foi realizada uma adaptação na metodologia Seade (SEADE, 2022).

Neste estudo, foram utilizados os dados de riqueza, longevidade e escolaridade disponibilizados pela Fundação Seade, e calculada a média dessas dimensões para determinar o IPRS. Posteriormente, aplicou-se a normalização linear (Equação 6), padronizando o índice em uma escala de 0 a 1, onde valores próximos a 1 indicam um IPRS elevado, similar ao grupo dinâmico da metodologia original, enquanto valores próximos a 0 refletem um IPRS inferior, equivalente ao grupo vulnerável. Ressalta-se que este trabalho não adotará as nomenclaturas e divisões de grupo presentes na metodologia original, em razão da natureza relativa da definição destas categorias.

$$IPRS_{norm} = \frac{(IPRS - 46)}{(46 - 64)} \quad (6)$$

### 4.9.1 Riqueza

O indicador de riqueza é composto por quatro variáveis: o consumo anual de energia elétrica por ligações residenciais; o consumo de energia elétrica na agricultura, no comércio e nos serviços; estimativas do Produto Interno Bruto (PIB) per capita dos municípios; e o rendimento de empregados formais, incluindo os setores público e privado, além dos benefícios

do INSS de aposentados e pensionistas. Esses indicadores buscam capturar tanto a riqueza municipal, quanto a renda familiar, essa distinção é crucial para as políticas públicas, pois, enquanto as variáveis de renda familiar refletem resultados de iniciativas passadas, a riqueza municipal está mais associada à capacidade do município de gerar novos esforços para o desenvolvimento local (SEADE, 2022).

#### 4.9.2 Longevidade

O indicador de longevidade é composto pela combinação de quatro taxas de mortalidade, correspondentes a faixas etárias específicas: perinatal (fetos e crianças de zero a seis dias), infantil (zero a um ano), jovens e adultos (15 a 39 anos) e idosos (60 a 69 anos). A mortalidade perinatal está vinculada ao sistema de saúde materno-infantil, enquanto a mortalidade infantil reflete condições de saneamento e escolaridade das mães. A mortalidade de jovens e adultos é associada a causas externas, como acidentes, homicídios e doenças, enquanto a mortalidade entre os idosos é influenciada por fatores como hábitos alimentares inadequados, sedentarismo, tabagismo e deficiências no sistema de saúde. Esses elementos evidenciam a necessidade de políticas públicas direcionadas para a redução da mortalidade no estado de São Paulo (SEADE, 2022).

#### 4.9.3 Escolaridade

A dimensão escolaridade busca mensurar o nível de acesso e a qualidade do sistema educacional nos municípios paulistas. Os indicadores utilizados incluem a taxa de atendimento escolar na faixa etária de 0 a 3 anos, que reflete o esforço municipal para ampliar o acesso à educação infantil, especialmente à creche. Para avaliar a qualidade da educação, adota-se o desempenho dos alunos na Prova Brasil, uma avaliação bienal do Inep/MEC e SEADE, que mensura a proficiência em leitura e matemática de alunos do 5º e 9º anos do ensino fundamental. No ensino médio, o indicador utilizado é a taxa de distorção idade-série, que avalia o atraso escolar dos estudantes (SEADE, 2022)

### 4.10 Índice de umidade de diferença normalizada

Foram utilizadas as imagens do satélite Landsat 8 para obter o Índice de Umidade de Diferença Normalizada (NDMI). Com o intuito de minimizar as interferências sazonais adquiriu-se as imagens em duas épocas do ano (chuvas e secas). O NDMI final foi calculado a

partir da média simples de ambas as épocas. O processamento digital das imagens seguiu a metodologia detalhada no item 4.5 deste estudo, incluindo etapas de correção radiométrica e atmosférica.

O NDMI é calculado por meio da Equação 7 proposta por Hardisky et al. (1983), a qual utiliza a banda de infravermelho próximo e infravermelho de ondas curtas para determinar o conteúdo de água da vegetação. Considerando as especificações técnicas do Landsat 8, utilizou-se as bandas 5 e 6 (USGS, 2016). Assim como demais índices, o NDMI varia de -1 a 1, valores negativos ou próximos de zero indicam áreas com vegetação estressada por falta de água ou sem vegetação. Já os valores positivos indicam vegetação saudável com maior teor de umidade, comum em áreas florestais ou agrícolas bem irrigadas. Quando identifica valores muito altos indicam áreas com vegetação muito úmida, como florestas densas ou áreas alagadas (Gleeson et al., 2012).

$$NDMI = \frac{\rho_{nir} - \rho_{swir}}{\rho_{nir} + \rho_{swir}} \quad (7)$$

Sendo:

$\rho_{nir}$ : banda do infravermelho próximo;

$\rho_{swir}$ : banda do infravermelho de ondas curtas;

Esse índice é amplamente utilizado para avaliar a umidade da vegetação, permitindo detectar variações no conteúdo de água nas folhas. Auxiliando na identificação das mudanças na saúde e vigor das plantas, detectando estresse hídrico ou danos causados por pragas, desmatamento e outros distúrbios, é um índice eficaz para avaliar a extensão dos danos florestais causados por distúrbios naturais ou antropogênicos (Choi et al., 2021; Gleeson et al., 2012).

#### 4.11 Definições de zonas de manejo

O resumo executivo ZEE-SP (SEMIL, 2022) define as diretrizes para zonas ecológico-econômicas, em que neste estudo denominaremos de zonas de manejo. Zonas de manejo são categorias espaciais que agrupam áreas com características semelhantes quanto ao potencial de uso sustentável e à necessidade de proteção ambiental. Cada zona terá recomendações específicas quanto ao tipo de atividades que podem ser desenvolvidas e as limitações impostas para garantir a conservação dos recursos naturais e ao atendimento das necessidades da sociedade.

O ZEE no estado de São Paulo, instituído pelo Decreto Estadual Nº 67.430/2022 estabelece diretrizes e orientações para sua implementação, e atualmente se encontra em processo de elaboração. Por se tratar de uma iniciativa relativamente nova no estado, os estudos detalhados e as audiências públicas, que são etapas essenciais para a criação das zonas de manejo, ainda estão em curso. Normalmente, a delimitação final é feita após as etapas de planejamento, diagnóstico e prognóstico.

Até outubro de 2024, o decreto fornece as diretrizes para a criação das zonas, mas as definições específicas dessas áreas ainda não foram oficialmente publicadas ou consolidadas. Por isso, foram definidas 5 zonas de manejo (Quadro 7) baseadas nas diretrizes do decreto supracitado, no conhecimento socioeconômico da região e em outros estudos, como (Arantes; Silva; Lourenço, 2023; Crivelenti et al., 2016; Lopes, 2018; Sadeck; De Lima; Adami, 2017).

Quadro 7. Descrição das zonas de manejo adotadas neste estudo

Zona de manejo	Descrição
Preservação	Áreas destinadas à proteção e uso restrito dos ecossistemas, incluindo Unidades de Conservação de proteção integral e Áreas de Preservação Permanente (APPs). O foco é manter a biodiversidade e os processos ecológicos, permitindo apenas atividades de baixo impacto ambiental, como pesquisa científica e educação ambiental.
Conservação	Áreas destinadas a conservação ambiental que permitem atividades econômicas de baixo impacto, como agricultura de baixo impacto (silvicultura e extrativismo sustentável) e turismo ecológico, prezando por práticas sustentáveis que não comprometam a integridade ambiental. Essas zonas conciliam o uso dos recursos naturais com o desenvolvimento econômico
Urbana	Áreas urbanas consolidadas, onde o foco é a ocupação ordenada, garantindo infraestrutura adequada e minimizando impactos ambientais. O planejamento urbano deve incorporar soluções sustentáveis, como drenagem urbana sustentável, mobilidade eficiente e adaptação às mudanças climáticas.
Recuperação	Áreas degradadas que necessitam de intervenções para restaurar funções ecológicas. Incluem APPs e outras zonas impactadas, demandando ações como reflorestamento, controle de erosão e recuperação de recursos hídricos, promovendo a resiliência ambiental e social.
Rural	Áreas destinadas à produção agropecuária e reflorestamento, caracterizadas por solo com baixa a moderada vulnerabilidade à erosão. O manejo adequado do solo é essencial para evitar a degradação e erosão do solo.

Fonte: Autoria própria

## 4.12 Redes neurais artificiais

### 4.12.1 Pré-processamento

Devido à sensibilidade intrínseca da RNA-SOM relacionada à dimensionalidade e escala dos dados de entrada (Kohonen, 2001), realizou-se a normalização numérica de todas as variáveis, reescalando valores originais para o mesmo intervalo através da ferramenta “*Raster Calculator*”. Este procedimento é fundamental para mitigar distorções no treinamento

da RNA -SOM, garantindo que variáveis com magnitudes distintas contribuam equitativamente para a formação do mapa (Vesanto e Alhoniemi, 2000).

Paralelamente, atendendo à exigência do TerrSet quanto à homogeneidade geométrica dos dados raster, executou-se a projeção cartográfica para o sistema SIRGAS 2000 em projeção UTM, seguida pela uniformização da resolução das variáveis, onde é necessário que tenham o mesmo número de linhas e colunas. Por fim, conversão final para o formato .rst, padrão nativo do software, garantindo integridade topológica e eficiência computacional na modelagem (Eastman, 2015).

#### 4.12.2 Arquitetura da RNA-SOM

A RNA-SOM é reconhecida por sua capacidade de organizar e representar dados multivariados em uma grade bidimensional, preservando a topologia dos dados de entrada. A arquitetura implementada neste estudo segue o modelo *feedforward*, composta por duas camadas principais. A camada de entrada é definida de acordo com o número de variáveis utilizadas no modelo, totalizando 11 neste trabalho: uso da terra, declividade, mapas de proximidade em relação a centros urbanos, malha viária e hidrografia, conflitos em APP, unidades de conservação de proteção integral, unidades de conservação de uso sustentável, RUSLE, IPRS e NDMI.

A camada de saída foi estruturada como uma grade bidimensional com dimensões de  $15 \times 15$  neurônios, totalizando 225 neurônios, cada um representando um vetor de características. A classificação gerada é do tipo *hard*, ou seja, definitiva, permitindo a visualização do mapa de características e da matriz de confusão. Para a atribuição de classes aos pixels desconhecidos, utilizou-se o algoritmo *Min Mean Distance*. Adicionalmente, a funcionalidade de visualização dinâmica e o histograma de ativação dos neurônios possibilitaram a análise da frequência de ativação, contribuindo de forma significativa para a interpretação dos padrões de agrupamento formados pela rede.

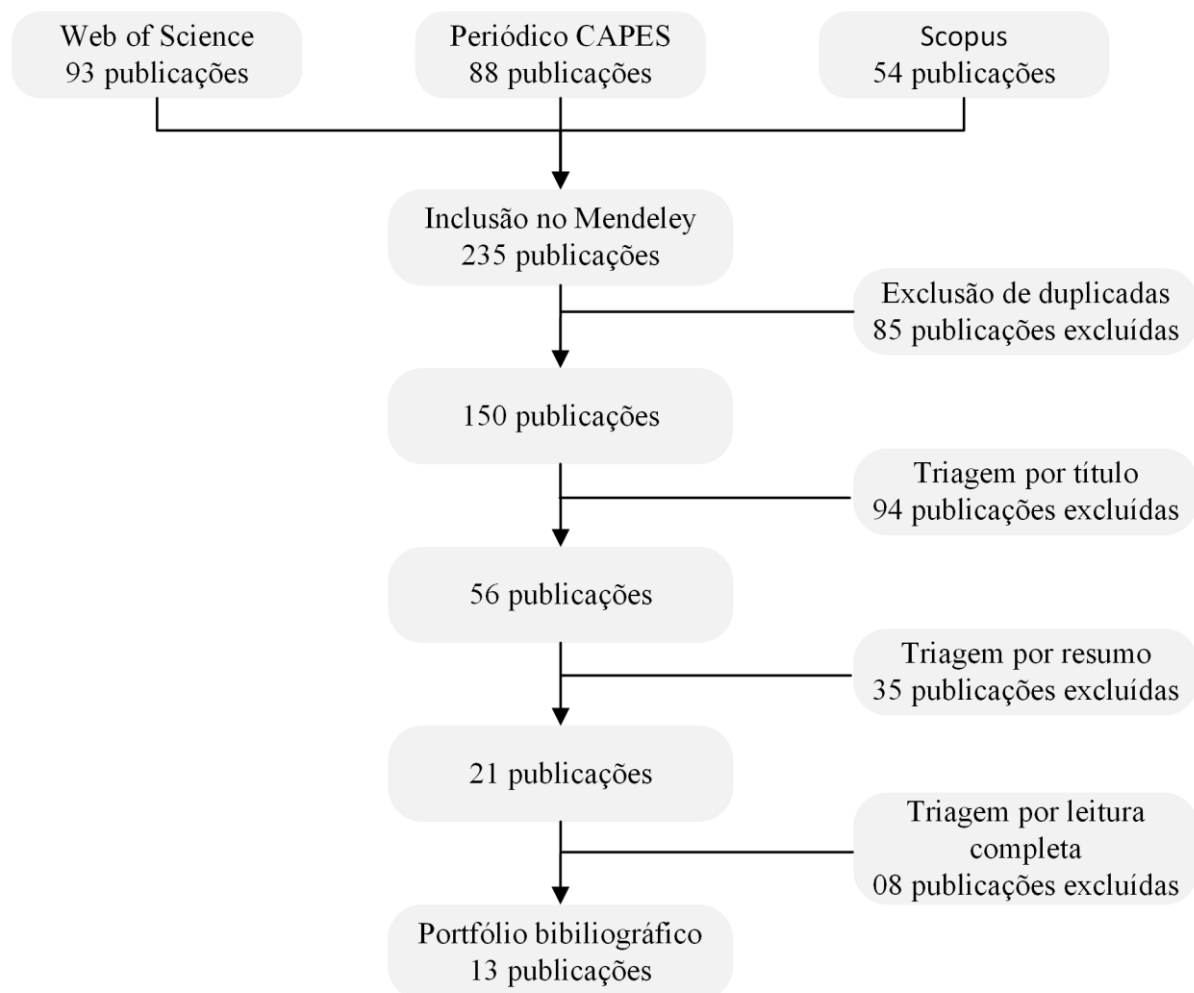
Após a obtenção do mapa com as seis classificações correspondentes às zonas de manejo, foi realizado um processo de refinamento com o objetivo de incorporar as áreas protegidas. Tais áreas, por força da legislação vigente, devem ser preservadas independentemente da classificação gerada exclusivamente pela RNA. Dessa forma, foram incluídas no produto final as unidades de conservação, e outros espaços territoriais especialmente protegidos, garantindo maior aderência do ZEE aos instrumentos normativos de proteção ambiental.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Revisão de escopo

Com base na metodologia proposta, foi obtido um portfólio bibliométrico com 13 publicações acerca do tema proposto neste trabalho. Conforme apresentado na Figura 5, as pesquisas por abrangência e profundidade realizadas nas bases de dados Periódico CAPES, *Web of Science* e *Scopus* retornaram um total 235 publicações. Destas, 85 publicações duplicadas foram excluídas e, após as três etapas de triagem mais 138 publicações foram removidas.

Figura 5. Fluxograma quantitativo das etapas de triagem da seleção de publicações



Fonte: Autoria própria

Foram selecionados trabalhos que abordam o ZEE em associação com o geoprocessamento ou redes neurais artificiais, abrangendo estudos de caso, propostas

metodológicas e revisões bibliográficas. Ao todo, foram selecionados e analisados 13 artigos, conforme apresentados no Quadro 8.

Quadro 8. Artigos selecionados na análise bibliométrica

Artigo	Referência
Uma revisão sistemática sobre as abordagens e métodos utilizados no zoneamento ecológico-econômico no Brasil	(Arantes <i>et al.</i> , 2023)
O surgimento de novas regiões metropolitanas no Brasil: uma discussão a respeito do caso de Sorocaba (SP)	(Berreto, 2012)
Ecological-economic zoning of the city of altinópolis - SP, Brazil	(Crivelenti, 2016)
Ecological-economic zoning in the Legal Amazon in light of the literature on the implementation of public policies and institutional arrangements	(FAVARETO; RAZERA, 2023)
The ecological-economic zoning of the amazon biome as an instrument of territorial organization in maranhão (Brazil)	(FERREIRA; TRINDADE JUNIOR, 2023)
Enviromental similarity of ecologic-economic Zoning proposals in river Basins in Brazil	(LOPES <i>et al.</i> , 2020)
Forest loss in areas of conservation and recovery of the Ecological and Economic Zoning (ZEE) in the province of Alto Amazonas, Loreto, Peru	(PALACIOS-VEGA <i>et al.</i> , 2021)
Social management of the territories of citizenship: ecological and economic zoning as a management tool for the northwest territory of Minas Gerais	(PEREIRA <i>et al.</i> , 2011)
Ecological economic zoning as a tool for integrated and sustainable territorial management in the Municipality of Rio de Janeiro	(RUFFATO-FERREIRA <i>et al.</i> , 2018)
Artificial neural network for ecological-economic zoning as a tool for spatial planning	(SADECK <i>et al.</i> , 2017)
Criteria for analyzing environmental zoning as an instrument in land use and spatial planning	(SANTOS; RANIERI, 2013)
Soil maps, field knowledge, forest inventory and ecological-economic zoning as a basis for agricultural suitability of lands in Minas Gerais elaborated in GIS	(SILVA <i>et al.</i> , 2013)
Increasing overall agricultural productivity in the Yellow River Delta Eco-economic Zone in China	(SU <i>et al.</i> , 2024)

Fonte: Autoria própria

A Figura 6 apresenta uma nuvem de palavras gerada a partir das palavras-chave dos artigos selecionados, evidenciando uma grande variedade de termos correlacionados ao ZEE. O tamanho das palavras é diretamente proporcional à frequência de ocorrência, o que evidencia que o termo mais utilizado foi "planejamento territorial", o qual está diretamente relacionado com o ZEE. No entanto, "ordenamento territorial", "sistema de informação geográfica" e "zoneamento ecológico-econômico" também foram muito frequentes. Vale ressaltar que todas as palavras-chave deste estudo estão incluídas nesta nuvem de palavras.

Figura 6. Nuvem de palavras associadas aos artigos selecionados



Fonte: Autoria própria

A análise das palavras-chave evidenciou uma diversidade temática que ultrapassa os limites conceituais do ZEE enquanto instrumento técnico-jurídico específico. Termos associados ao planejamento territorial, à gestão ambiental e ao ordenamento urbano permeiam a produção científica levantada, sinalizando que o ZEE é compreendido, na literatura, como um componente inserido em um sistema mais amplo de instrumentos de gestão do território.

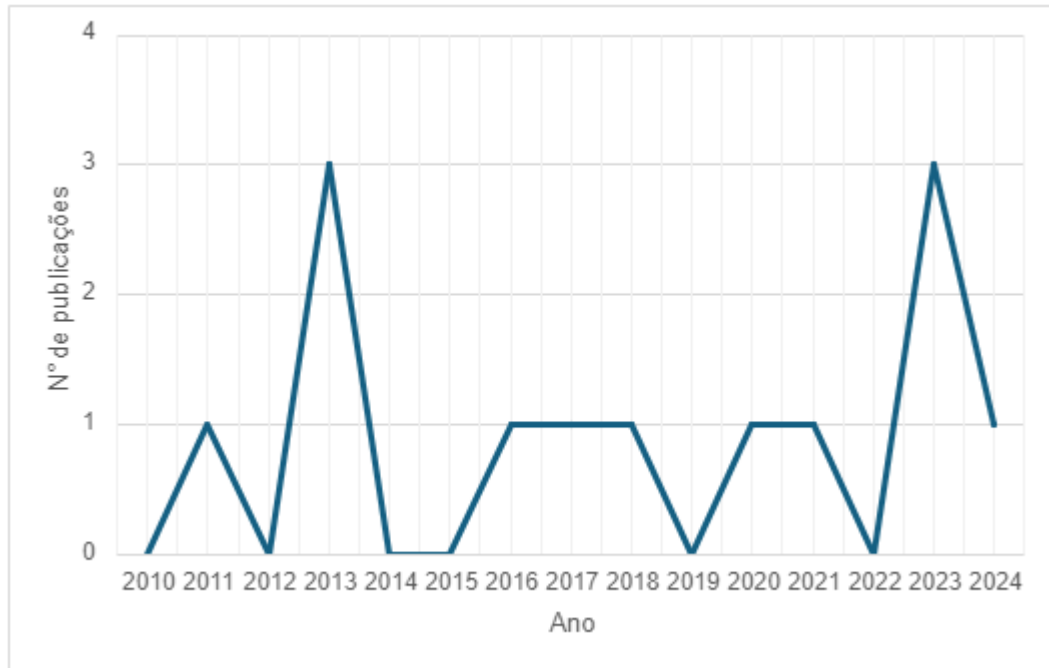
Os dados obtidos nesta revisão são relevantes porque evidencia uma sobreposição metodológica entre o ZEE e outros instrumentos de planejamento e ordenamento territorial. Essa sobreposição é especialmente relevante no contexto das regiões metropolitanas, onde a gestão territorial exige necessariamente a integração entre instrumentos de escala municipal e regional.

A escassez de estudos que abordem essa articulação, aponta para uma lacuna tanto científica quanto prática, reforçando a pertinência de trabalhos que proponham metodologias integradas, como a desenvolvida neste estudo.

Adicionalmente, o gráfico da Figura 7 ilustra a frequência de publicações por ano, revelando que quase 50% das publicações ocorreram nos últimos cinco anos e que cerca de 90% dos artigos selecionados foram publicados na última década. Isto indica que as pesquisas

e estudos relacionados ao tema são relativamente novos, em que se faz importante a contribuição para o crescimento da produção científica desta temática.

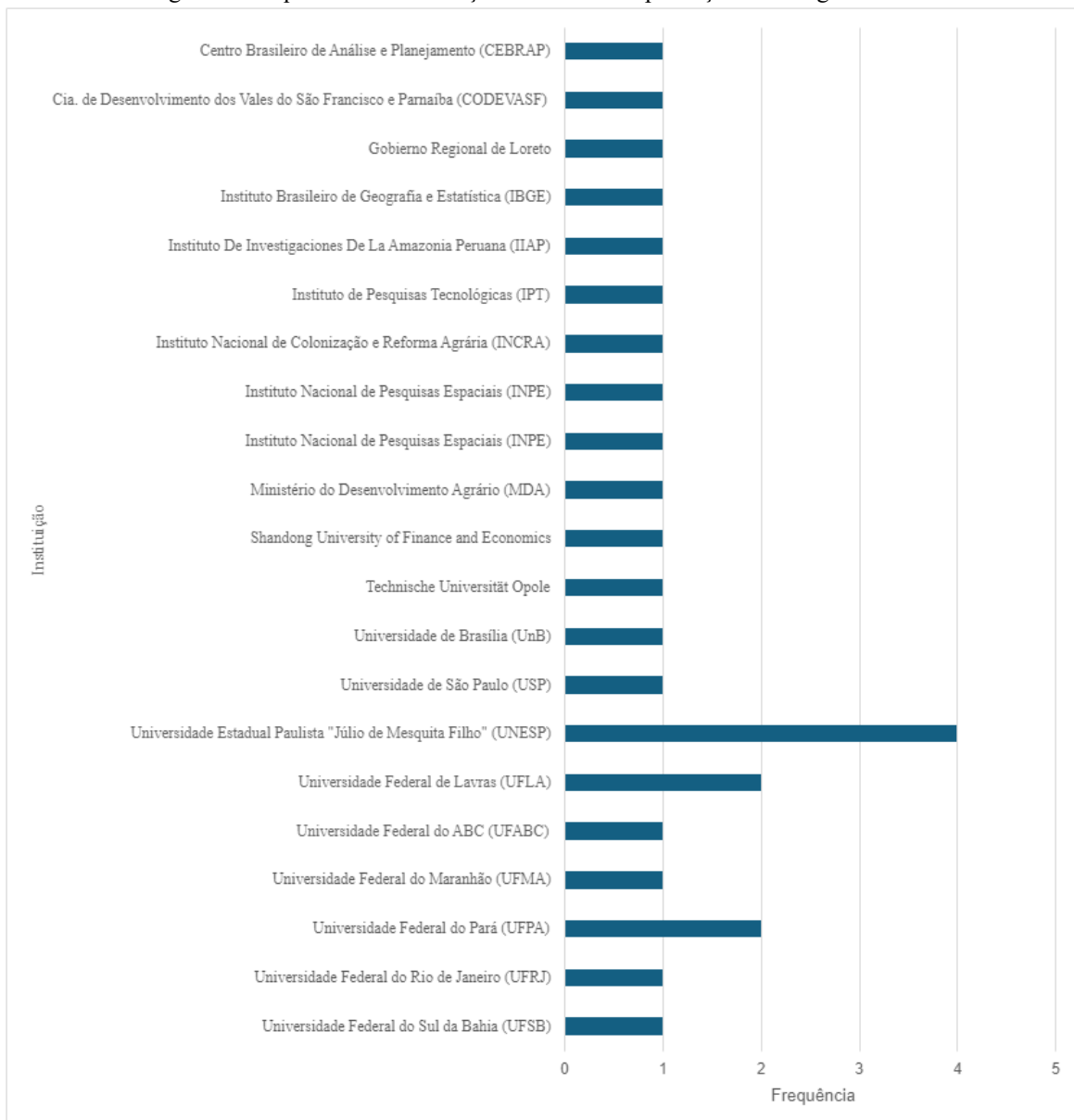
Figura 7. Relação da quantidade de publicações por ano



Fonte: Autoria própria

Dos artigos selecionados, mais de 85% (11) são produções brasileiras em todo território nacional, mas principal relacionado a Amazônia, enquanto 15% são provenientes do Peru (1) ou da China (1). A Figura 8 também apresenta a distribuição das instituições associadas às publicações selecionadas de todos os autores, totalizando 21 instituições envolvidas na produção dos 13 artigos, com cerca de 50% delas sendo universidades públicas. A Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (UNESP) foi a instituição que mais apareceu dentre os artigos selecionados, seguida pela Universidade Federal de Lavras (UFLA) e pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

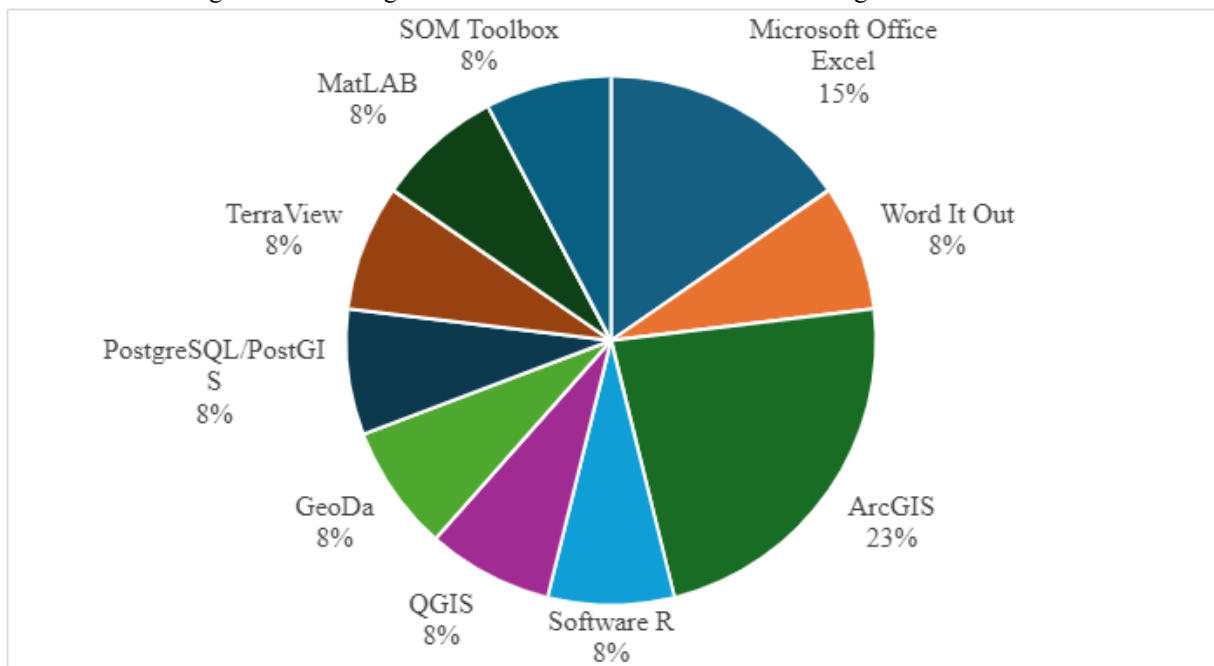
Figura 8. Frequência das instituições associadas a produção dos artigos selecionados



Fonte: Autoria própria

Por fim, aproximadamente 50% dos artigos selecionados utilizaram *softwares* em suas metodologias. A Figura 9 mostra a porcentagem de uso de cada software. Observa-se que mais da metade dos *softwares* utilizados são do tipo Sistema de Informação Geográfica (SIG), sendo o ArcGIS o mais empregado, com 23% de uso, seguido por versões de código aberto, ou seja, de acesso gratuito, como GeoDa, TerraView, QGIS e PostGIS. Esse perfil de uso de software é coerente, pois esta análise bibliométrica está focada em associar o ZEE com o geoprocessamento ou redes neurais artificiais.

Figura 9. Porcentagem de uso dos softwares utilizados nos artigos selecionados



Fonte: Autoria própria

Conforme as técnicas de IA ganham espaço nos processos de tomada de decisão, especialmente aplicadas ao aprendizado de máquina (Duan *et al.*, 2019), observa-se uma menor quantidade de softwares que suportam o uso de redes neurais artificiais, como o SOM Toolbox. Além disso, o uso dos *softwares* R e MATLAB também oferece uma interface para a manipulação de dados e interação com redes neurais artificiais.

A revisão de escopo e a análise integrada desenvolvidas neste estudo evidenciam um conjunto de lacunas científicas que ainda limitam a consolidação do Zoneamento Ecológico Econômico (ZEE) como instrumento técnico científico de referência no Brasil, em especial quando aplicado a regiões metropolitanas. Essas lacunas envolvem dimensões metodológicas, conceituais, institucionais e aplicadas, e abrem frentes claras para investigações futuras. A seguir, sintetizam-se as principais lacunas identificadas.

Apesar de sua relevância normativa, não foi encontrado um protocolo técnico padronizado e amplamente reconhecido para a elaboração do ZEE; as diretrizes existentes apresentam caráter predominantemente qualitativo, o que leva à proliferação de arranjos metodológicos *ad hoc*, dificulta a comparabilidade entre estudos e compromete a reprodutibilidade dos resultados. Tal quadro também reduz a possibilidade de avaliações meta-analíticas e de validações cruzadas inter-regionais.

A análise bibliométrica recuperou um portfólio reduzido de estudos aderentes ao tema (13 publicações dentre 235 registros iniciais), evidenciando escassez de literatura especializada sobre ZEE em escala nacional e, sobretudo, aplicada a regiões metropolitanas. Essa limitação

de massa crítica científica fragiliza o debate metodológico e a consolidação de referenciais comuns, além de restringir a avaliação longitudinal de impactos.

Predomina, na literatura e nas práticas correntes, um viés biofísico na seleção de variáveis (uso da terra, relevo, solo, clima), enquanto indicadores socioeconômicos tendem a ser incorporados de modo incompleto ou pouco operacionalizado. Embora este trabalho avance ao integrar o Índice Paulista de Responsabilidade Social (IPRS) ao modelo, persiste a lacuna quanto a *frameworks* quantitativos que articulem, de forma robusta, desigualdades, infraestrutura, demografia e vulnerabilidade social com a aptidão e restrição ao uso do território.

Mesmo quando tecnicamente consistente, o ZEE frequentemente enfrenta barreiras institucionais à sua implementação, decorrentes de baixa articulação vertical (União–Estado–municípios), conflitos horizontais entre setores (ambiental, agrícola, desenvolvimento econômico) e poder normativo limitado para induzir mudanças efetivas no uso da terra. A literatura carece de avaliações empíricas sobre efetividade de implementação e impactos territoriais do ZEE após sua adoção.

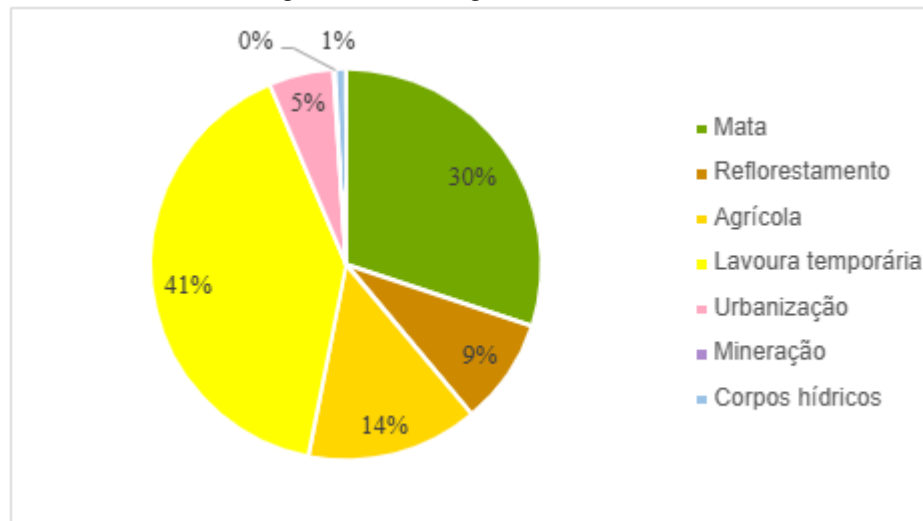
Não há consenso quanto ao conjunto mínimo de variáveis que deve compor o ZEE, nem sobre escalas espaciais adequadas ou pesos relativos para integração multicritério, o que acentua a heterogeneidade de métodos e produtos cartográficos entre estudos e jurisdições. Tal cenário reforça a necessidade de diretrizes técnicas que padronizem insumos e procedimentos de modelagem, sem prejuízo das adaptações contextuais.

## **5.2 Mapeamento do uso da terra**

A Figura 10 apresenta o Mapa de Uso da terra da RMS para o ano de 2023, o qual apresentou concordância excelente de acordo com o cálculo da acurácia realizado a partir do índice Kappa, que foi o equivalente a 0,868.



Figura 11. Porcentagem de uso da terra



Fonte: Autoria própria

Com base na análise dos dados é possível observar que a atividade agrícola e lavoura temporária está presente em praticamente toda a extensão da RMS, ocupando cerca de 54,73% da área total. A participação do setor agropecuário na RMS é inferior em relação ao Brasil, mas supera em 37,5% em relação ao estado de São Paulo. Comparada ao Vale do Paraíba e Campinas, a participação é significativamente maior, mesmo apresentando grandes atividades agropecuária. As lavouras temporárias ocupam 40,51% da RMS, atividade responsável pela produção de hortaliças, que corresponde a 20% do abastecimento de estado paulista e 22% do valor bruto da produção. Embora concentre grandes empresas e muitas propriedades agrícolas, há predominância de produção familiar, o que limita a geração de empregos formais e que há a necessidade de investimentos para o desenvolvimento tecnológico e econômico (Ribeiro et al., 2018).

A classe Mata é a segunda maior classe identificada na RMS, cobrindo 30,10% da área total. Os municípios que mais apresentam cobertura de mata são Ibiúna, Tapiraí, Piedade, São Miguel do Arcanjo e Pilar do Sul. Esta classe é predominantemente localizada ao sul, especialmente devido à presença da APA Serra do Mar e dos Parques Estaduais Carlos Botelho e Jurupará, todos classificados como unidades de conservação de proteção integral.

A APA Serra do Mar visa proteger a extensa Mata Atlântica da serra, uma das áreas mais preservadas da região Centro-Sul do Brasil. Já o Parque Estadual Carlos Botelho visa proteger integralmente flora, fauna e belezas naturais, servindo para fins educacionais, recreativos e científicos. O Parque Estadual do Jurupará, situado em uma antiga reserva extrativista, é um importante corredor ecológico, preservando ecossistemas de grande

relevância para pesquisa e educação ambiental e protegendo a bacia hidrográfica do Alto Juquiá (Junior & Lourenço, 2020; Ribeiro et al., 2018)

As Áreas de Proteção Ambiental (APAs) de Itupararanga, Tietê-Jumirim e Cabreúva desempenham um papel fundamental na conservação da vegetação da Região Metropolitana de Sorocaba (RMS), apesar de apresentarem baixa cobertura vegetal. Essa condição se deve ao fato de serem unidades de conservação de uso sustentável, o que as torna mais suscetíveis à antropização.

O Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Ibiúna, por exemplo, aponta que a APA de Itupararanga enfrenta pressões devido ao avanço de loteamentos e ao intenso uso agrícola em áreas com alta fragilidade ambiental (SEMA, 2018), na qual é classificada como "Muito Forte", com áreas de remanescentes florestais vulneráveis a impactos negativos das atividades humanas, o que compromete sua resiliência (Junior & Lourenço, 2020). Embora tenha um plano de manejo, ele não é adequadamente implementado pelos municípios, comprometendo o uso sustentável dos recursos naturais (Sousa, 2021). Em 2017, a expansão significativa de outras classes de uso da terra, associada à rápida antropização, aumentou os riscos e a degradação das florestas locais (Simonetti; Silva; Rosa, 2019).

Ademais, próximo aos municípios de Iperó, Capela do Alto e Araçoiaba da Serra encontra-se a Floresta Natural de Ipanema, uma das maiores parcelas de floresta cercada por atividades urbanas e agrícolas. Administrada pelo ICMBio, sua missão é proteger e restaurar a vegetação nativa da Mata Atlântica e se tornar referência em pesquisas e educação ambiental (ICMBio, 2024).

As áreas urbanizadas, apesar de possuir um tamanho expressivo representam apenas 5,37% do uso da terra da RMS, é possível observar pontos de concentração espalhados na parte norte, centro-oeste e nordeste do mapa, estes pontos são justamente os centros urbanos dos municípios, o maior deles é pertencente a cidade de Sorocaba e Votorantim localizadas na região centro-oeste da RMS, mas também é possível observar centros urbanos menores como Salto, Itu e Itapetininga.

A classe mineração representa uma parcela muito pequena da RMS, cerca de 0,13%, uma vez que essa não é a principal atividade econômica da região. Apesar disso, alguns municípios possuem forte influência do setor de mineração, como Alumínio, Salto de Pirapora e Itu, que, juntos, correspondem a 91% da cobertura desta classe.

O principal recurso mineral extraído na região é o calcário, representando 12,1% das reservas medidas do estado e que se encontra principalmente em Salto de Pirapora, o

equivalente a 88% das reservas da região. Além disso, a região também se destaca na exploração de argila, correspondendo a 12,1% das reservas estaduais (EMPLASA, 2017).

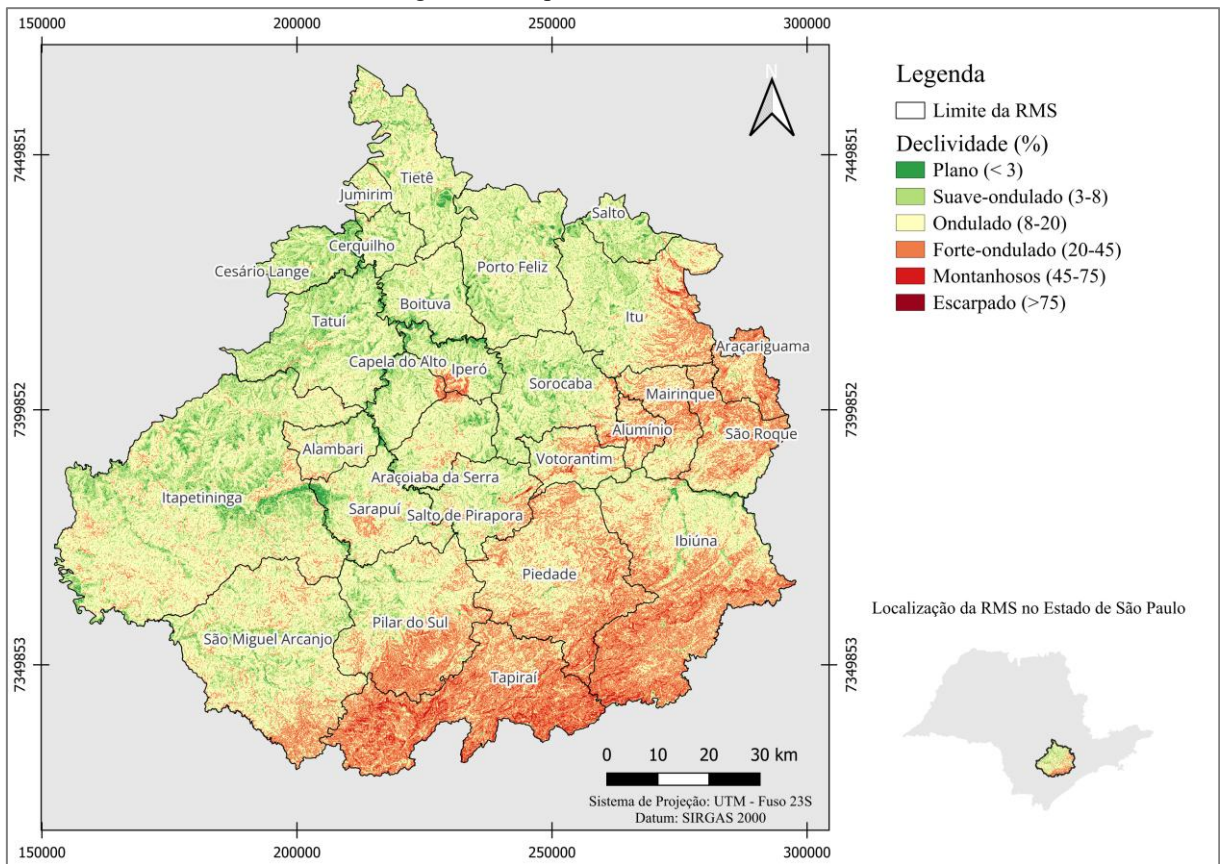
Como o esperado os corpos hídricos possuem uma pequena participação, cerca de 0,9%, mas de extrema importância e relevância. O maior corpo hídrico identificado foi a represa de Itupararanga, a qual é abastecida pelos rios Sorocaba, Sorocamirim e Sorocabuçu. A represa é protegida pela APA em que está inserida, e que juntos desempenham um importante papel para região, fornecendo diversos serviços ecossistêmicos. Entre eles, destaca-se a manutenção da qualidade hídrica, responsável pelo abastecimento de mais 1 milhão de habitantes diariamente, além da geração de energia e do suporte às atividades agropecuárias, como irrigação e dessentetação animal (Amorim et al., 2019; Arantes; Silva; Lourenço, 2023; FUNDAÇÃO FLORESTAL, 2010).

### **5.3 Declividade**

A variável declividade é importante pois age na mitigação de possíveis conflitos de uso do solo (Oliveira et al., 2024), além de afetar diretamente a conversão da energia potencial das águas pluviais em energia cinética, influenciando a intensidade da erosão, infiltração e a ocorrência de inundações (Crepani et al., 2001). Sendo amplamente utilizada na elaboração de ZEE pois orienta atividades agrícolas e restrições para áreas críticas, como APP (Lopes; Filho; Lourenço, 2020).

O Mapa de declividade (Figura 12) apresenta a distribuição espacial desta variável na RMS. A partir das análises dos dados obtidos, é possível identificar que a declividade teve uma ampla variação, indo do relevo plano (<3%) até o escarpado (>75%), isto porque a área de estudo é muito extensa e abrange diversas regiões, como a Serra no Mar que possui uma altitude elevada e o Vale do Rio Sorocaba que apresenta baixa altitude.

Figura 12. Mapa de declividade da RMS



Fonte: Autoria própria

A RMS apresenta predominância de relevo ondulado, localizado principalmente nas porções norte, noroeste e centro-oeste da região. Essas áreas possuem declividades suaves (inferior a 20%), e são consideradas adequadas à mecanização (Morandi et al., 2020), favorecendo as atividades agropecuárias (Oliveira et al., 2024). Essas áreas representam 79% do território, o que é coerente quando se destaca a influência agropecuária da RMS, sendo a maior produtora agrícola entre as regiões metropolitanas do estado de São Paulo (PDUI, 2021).

Além disso a dinâmica do escoamento superficial das águas pluviais nestas condições contribui para o cultivo agrícola, uma vez que o processo de infiltração de águas pluviais é maior e o processo erosivo tem um menor potencial em declividades menores (Batista et al., 2021).

Apesar disso, observa-se uma expressiva parcela montanhosa ao sul da região, onde se encontra extensas unidades de conservação, como também é o caso da Floresta Nacional de Ipanema, uma parcela menor ao centro da RMS. Isto acontece, pois, regiões montanhosas são mais suscetíveis aos processos erosivos, uma vez que terrenos com uma topografia mais íngreme possuem um maior potencial de escoamento superficial rápido (Batista et al., 2021).

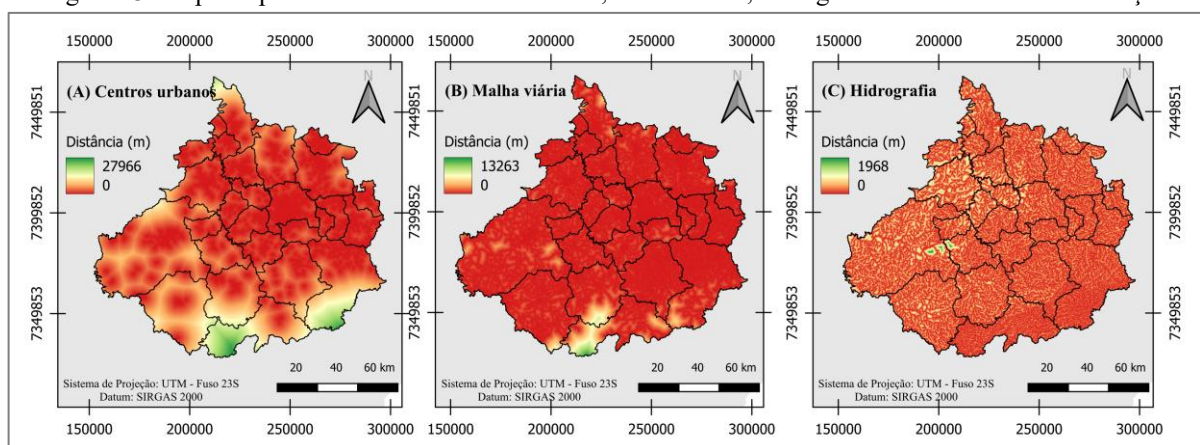
As áreas com declividades entre 20% e 45%, classificadas de médio conflito, representam 19,46% do território da RMS. Já as áreas com declividade superior a 45%, consideradas Áreas de Preservação Permanente (APP) de acordo com o Código Florestal, correspondem a 1,54% da região. Estas áreas não são adequadas à mecanização e, por isso, apresentam baixa atratividade para o desenvolvimento agrícola e pecuário, uma vez que impõem desafios significativos aos produtores rurais (Oliveira et al., 2024).

O entendimento da variável declividade é essencial para elaboração do ZEE, uma vez que se torna um pré-requisito para definição das limitações de uso e manejo da terra, direcionado a proteção do ecossistema, mitigação dos processos erosivos, redução do arraste de defensivos agrícolas e contribuindo para qualidade dos recursos hídricos (Bertoni & Lombardi, 2017; E. R. D. Lopes et al., 2020; Valle et al., 2016).

#### 5.4 Mapas de proximidade

A Figura 13 apresenta os mapas de proximidade em relação aos centros urbanos, à malha viária e à hidrografia. Optou-se por utilizar mapas de proximidade (distância euclidiana) por proporcionarem uma abordagem mais abrangente. Diferentemente das variáveis categóricas, que indicam apenas a presença ou ausência de determinado elemento em um ponto específico, os mapas de proximidade indicam a distância euclidiana entre os pontos da paisagem e as variáveis consideradas. Dessa forma, a análise torna-se mais detalhada, pois permite uma caracterização espacial mais detalhada da área de estudo. As regiões mais próximas das variáveis analisadas são representadas em tonalidades vermelhas, enquanto as mais distantes aparecem em tonalidades verdes.

Figura 13. Mapa de proximidade de centros urbanos, malha viária, hidrografia e unidades de conservação



Fonte: Autoria própria

Observa-se que, na região sul da RMS, onde se concentram as maiores unidades de conservação, há ausência de aglomerados urbanos, o que se justifica pela predominância de áreas verdes compostas por formações florestais. Em contrapartida, na região centro-oeste, verifica-se uma maior concentração de aglomerados urbanos, especialmente na área onde se localiza o município de Sorocaba, indicando tratar-se do principal núcleo urbano da RMS.

Também é possível constatar, por meio do mapa (B), que RMS apresenta elevada conectividade entre ruas e rodovias, de modo que praticamente todo o seu território possui alguma via de transporte nas proximidades. Essa característica se mantém mesmo em áreas com maior declividade ou inseridas em unidades de conservação, como é o caso da Serra do Mar. Tal configuração se justifica pelo fato de a RMS constituir um importante polo econômico do Estado de São Paulo, conectando duas grandes regiões metropolitanas: São Paulo, a maior do Brasil, e Campinas. Nesse contexto, torna-se coerente a existência de uma malha viária densa e complexa, que se distribui de forma abrangente por todo o território metropolitano.

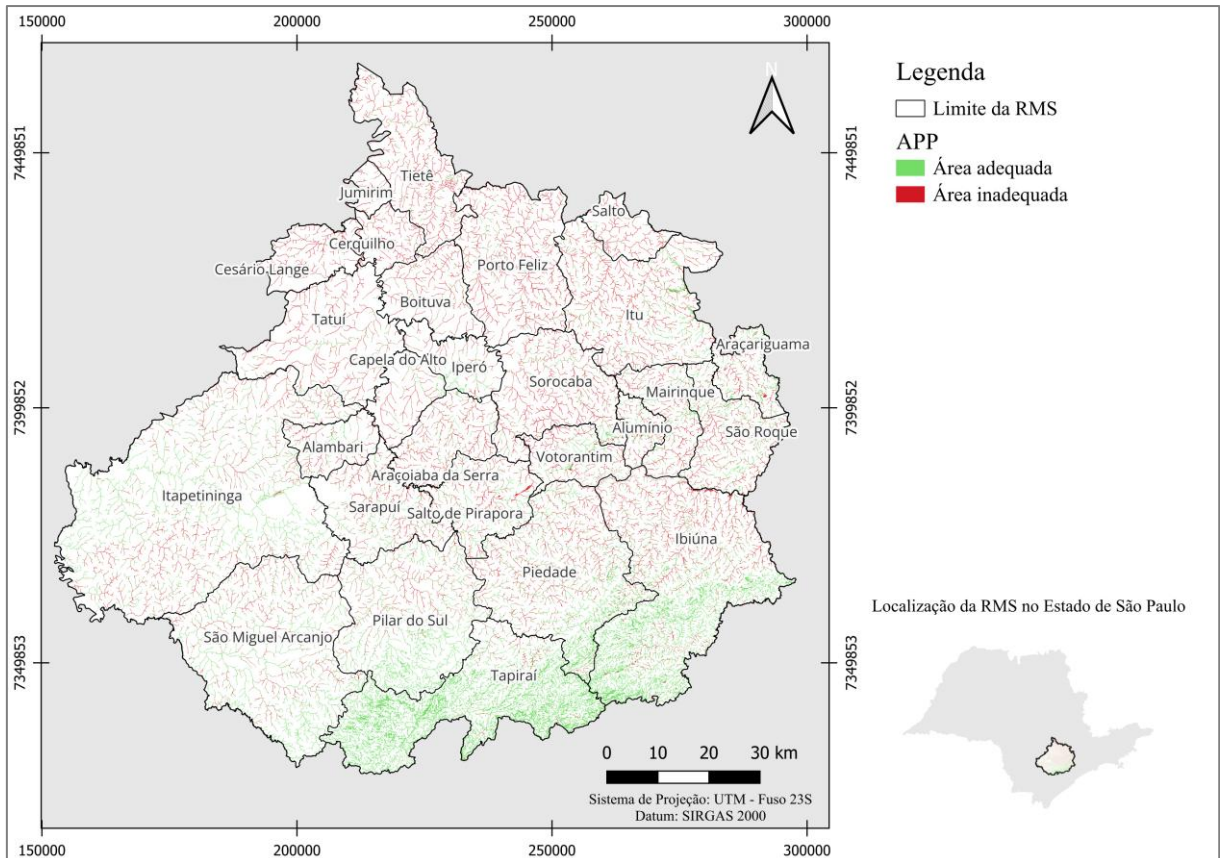
A RMS abrange uma área extensa e está inserida em quatro bacias hidrográficas distintas, o que evidencia a complexidade de sua rede hidrográfica. A maior parte de seu território pertence às bacias do rio Sorocaba/Médio Tietê e do Alto Paranapanema. Além dessas, pequenas porções da RMS estão inseridas na bacia do Litoral Sul e, em menor escala, na bacia do rio Piracicaba. A expressiva presença de corpos hídricos na região pode ser observada no mapa (C), em que grande parte da área apresenta tonalidade vermelha, indicando proximidade com recursos hídricos.

Essas três variáveis foram incorporadas ao modelo por fornecerem informações relevantes acerca da dinâmica socioambiental da RMS. A variável "centros urbanos" permite a identificação das áreas com maior densidade populacional e infraestrutura consolidada, refletindo diretamente na pressão antrópica sobre os recursos naturais. A "malha viária" revela o grau de conectividade territorial, essencial para compreender os padrões de mobilidade e acessibilidade, os quais influenciam diretamente os processos de ocupação e expansão urbana. Já a variável "hidrografia" é fundamental para a caracterização ambiental, considerando a importância dos corpos hídricos na manutenção dos ecossistemas, no abastecimento público e na definição de áreas de preservação. A combinação dessas variáveis, portanto, contribui significativamente para a análise integrada conforme proposto pelo ZEE.

## 5.5 Áreas de preservação e conservação protegidas

A Figura 14 apresenta o mapa de conflito de uso da terra em Áreas de Preservação Permanente (APP), permitindo a identificação do grau de conformidade dessas áreas com sua função ambiental. Os dados indicam que uma pequena parcela das APP da RMS está coberta por formações florestais, o que demonstra conformidade com sua principal finalidade: a proteção dos recursos naturais e a manutenção dos serviços ecossistêmicos. Em contrapartida, a maior parte encontra-se ocupados predominantemente por atividades agrícolas ou inseridos em áreas urbanizadas, o que caracteriza situações de conflito de uso da terra.

Figura 14. Mapa de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente (APP)



Fonte: Autoria própria

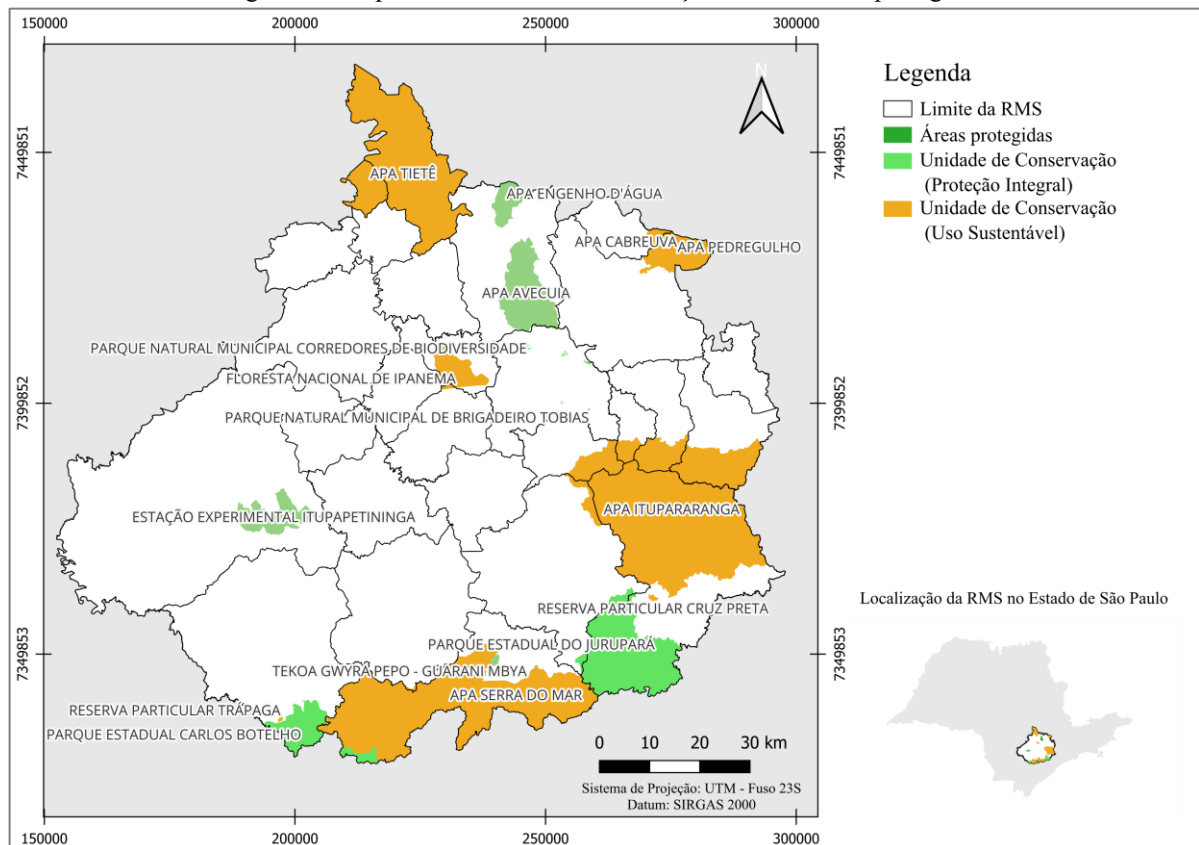
As APP, instituídas pelo Código Florestal (Lei N° 12.651/2012, Art. 4°), possuem funções ecossistêmicas fundamentais na regulação do ciclo hidrológico e na mitigação de impactos ambientais, especialmente no assoreamento e inundações. A mata ciliar presente nessas áreas atua como uma barreira natural contra a perda de solo, mas principalmente contribui para a infiltração, reduzindo o escoamento superficial e prevenindo o acúmulo de água

em áreas urbanas. A degradação ou supressão de APP compromete diretamente a segurança hídrica e intensifica eventos extremos, como alagamentos (Rodrigues; Gandolfi, 2020).

Observa-se que a maior concentração de APP em conformidade está localizada na região sul da RMS, onde se situam as principais e mais extensas unidades de conservação. Muitas dessas áreas são classificadas como unidades de conservação de proteção integral, as quais, conforme estabelecido pelo Código Florestal, não podem ser objeto de exploração econômica, devendo ser mantidas com cobertura vegetal nativa e protegidas contra qualquer tipo de degradação. Além da proteção pelo mecanismo legal, a própria topográfica local também se torna um fator limitante para ocupações irregulares, se formando uma barreira que contribui para a preservação destas áreas.

As UCs exercem um papel essencial na preservação da biodiversidade, contribuindo significativamente para a proteção dos ecossistemas, da fauna e da flora nativas, além de atuarem na manutenção dos serviços ambientais fundamentais, como a regulação do clima, a conservação do solo e dos recursos hídricos (Rodrigues; Gandolfi, 2020). A Figura 15 apresenta a distribuição espacial de todas as Unidades de Conservação (UC) e demais áreas protegidas localizadas na RMS, as mesmas descritas na Tabela 4.

Figura 15. Mapa das Unidade de Conservação e outras áreas protegidas



Fonte: Autoria própria

Foram identificados cerca de 263806,56 ha na RMS distribuída entre 19 unidades de conservação e outras áreas protegidas, conforme descrito na Tabela 5, parece uma área extensa, mas equivale apenas a 22% da área total da RMS. Além disso, essas áreas são estratégicas para conter o avanço da ocupação urbana e agrícola, funcionando como barreiras à expansão urbana em regiões ambientalmente sensíveis. As UCs também promovem oportunidades para o desenvolvimento de atividades sustentáveis, como o ecoturismo e a educação ambiental, reforçando a importância da conservação integrada ao desenvolvimento territorial.

Tabela 5. Relação de áreas protegidas da RMS, incluindo as unidades de conservação

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Área (ha)</b>
<b>Unidade de conservação de proteção integral</b>	Parque Estadual Carlos Botelho	8200,85
	Parque Estadual do Jurupará	26221,18
	Parque Natural Municipal Corredores de Biodiversidade	68,71
	Parque Natural Municipal de Brigadeiro Tobias	11,86
	Estação Ecológica Estadual Mário Covas	52,67
	Estação Ecológica Municipal do Pirajibu	46,79
<b>Unidade de conservação de uso sustentável</b>	Floresta Natural Federal de Ipanema	5389,99
	Reserva Particular do Patrimônio Natural - Cruz Pretta	157,31
	Reserva Particular do Patrimônio Natural - Trápaga	70,28
	APA Capreuva - Estadual	7796,31
	APA Itupararanga - Estadual	82297,98
	APA Serra do Mar - Estadual	56364,54
	APA Tietê - Estadual	45899,44
<b>Outras áreas protegidas</b>	Reserva Indígena Federal Tekoa Gwyrá Pepo - Guarani Mbya	330,30
	Estação Experimental Estadual de Itupapetiniga	6787,97
	APA Pedregulho - Municipal	7355,36
	Estação Ecológica Municipal Bráulio Guedes da Silva	9,38
	APA do Engenho d'água - Municipal	3507,46
	APA Avecuia - Municipal	13238,19

Fonte: Autoria própria

A APA da Serra do Mar tem como objetivo conservar a extensa cobertura de Mata Atlântica presente na serra, considerada uma das áreas mais preservadas da região Centro-Sul do Brasil. O Parque Estadual Carlos Botelho visa à proteção integral da flora, fauna e paisagens naturais, com finalidades educacionais, recreativas e científicas. O Parque Estadual do Jurupará, por sua vez, localizado em uma antiga reserva extrativista, atua como corredor ecológico, promovendo a conservação de ecossistemas relevantes, a proteção da bacia hidrográfica do Alto Juquiá e o fomento à pesquisa e à educação ambiental (Junior et al., 2020; Ribeiro et al., 2018).

O Plano Municipal de Conservação e Recuperação da Mata Atlântica de Ibiúna destaca que a APA de Itupararanga sofre intensas pressões devido à expansão de loteamentos e ao uso agrícola em áreas ambientalmente frágeis (SEMA, 2018). Classificada como de fragilidade "Muito Forte", essa unidade abriga remanescentes florestais vulneráveis aos danos ambientais das atividades humanas, o que compromete sua resiliência (Júnior & Lourenço, 2020). Embora exista um plano de manejo, sua aplicação pelos municípios é limitada, comprometendo a sustentabilidade dos recursos naturais (Sousa, 2021). A expansão acelerada do uso da terra e a crescente antropização observadas em 2017 agravaram a degradação das florestas locais (Simonetti; Silva; Rosa, 2019)

A Floresta Natural de Ipanema é uma das maiores áreas contínuas de vegetação nativa inseridas em um contexto de intensa urbanização e uso agrícola. Sob gestão do ICMBio, sua missão é conservar e restaurar a Mata Atlântica, promovendo também atividades de pesquisa e educação ambiental (ICMBio, 2024).

Além dos parques, florestas, APAs e demais área protegidas, optou-se por incluir também as áreas indígenas e quilombolas, por se tratar de territórios fundamentais para a preservação dos biomas (Bonanomi et al., 2019; Posey, 1985; Santos, 2024). No entanto, não foram identificadas áreas quilombolas na RMS, e apenas uma reserva indígena foi registrada: a Tekoa Gwyrá Pepo, pertencente ao povo Guarani Mbya. Localizada no município de Tapiraí, trata-se de uma área de domínio federal reconhecida pelo Parecer Técnico n.º 01/CGID/2016. Segundo a Comissão Pró-Índio de São Paulo (CPI-SP, 2023), a aldeia abriga uma população de 119 pessoas.

A presença do povo Guarani Mbya na região da Serra do Mar está profundamente vinculada à Mata Atlântica, tanto no sentido simbólico quanto prático. Apesar das intensas pressões exercidas pela sociedade, como a construção de rodovias e a perda irreversível de territórios, os Guarani mantiveram aldeias em pontos estratégicos que garantem sua permanência e identidade territorial junto à floresta (Ladeira e Azanha, 1987). No entanto, a fragmentação dos territórios, imposta por limites artificiais decorrentes de ocupações e infraestruturas urbanas e rurais, compromete a integridade das aldeias, que devem conter recursos naturais preservados e assegurar a privacidade e a subsistência do povo Guarani (Ladeira, 2001).

A relação dos Guarani Mbya com a Mata Atlântica está ancorada em culturais e religiosos, que orientam a escolha dos locais para a fundação de suas aldeias. Elementos da fauna, da flora, formações geológicas e até mesmo ruínas são interpretados como sinais de lugares sagrados, fundamentais para a manutenção de sua cultura e modos de vida (Ladeira,

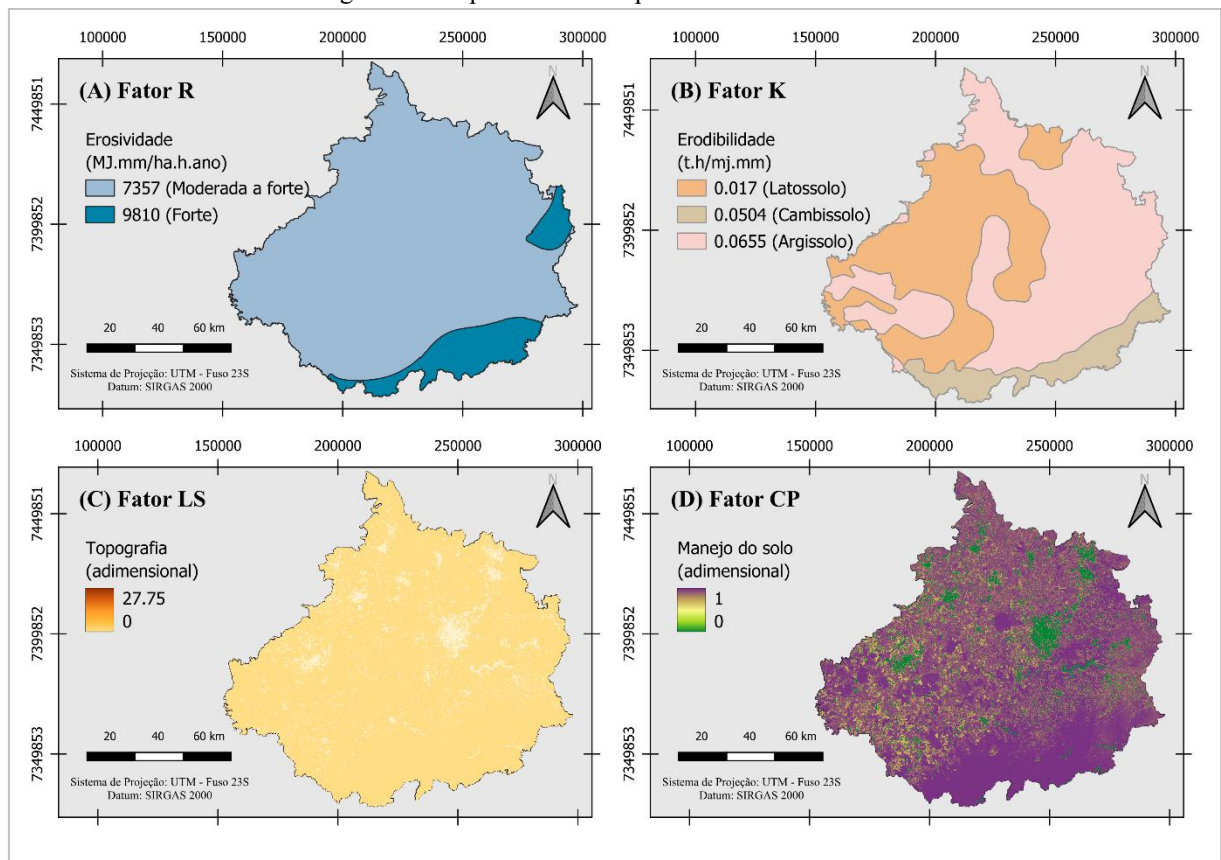
1992; ISA, 2025). Nesse contexto, a preservação da vegetação nativa não é apenas uma questão ecológica, mas também cultural, sendo essencial para a continuidade física e espiritual do povo Guarani Mbya.

Na RMS, destacam-se tanto as Unidades de Conservação de Proteção Integral, cujo uso é restrito à pesquisa científica e à visitação controlada, quanto aquelas de Uso Sustentável, que permitem o aproveitamento racional dos recursos naturais ou outras áreas protegidas é crucial para o equilíbrio socioambiental da região e deve ser considerada no processo de ZEE.

## 5.6 Equação universal de perda de solo revisada

Os mapas base para obtenção do Mapa de perda de solo da RMS, são apresentados na Figura 16, sendo eles: mapa de erosividade da chuva (R), mapa de erodibilidade (R), mapa topográfico (LS) e mapa de uso e manejo do solo (CP). Esses elementos são essenciais para a estimativa espacial da perda potencial de solo na região.

Figura 16. Mapas dos fatores para o cálculo da RUSLE



Fonte: Autoria própria

A erosividade (fator R) na RMS, apresentada na Figura 15 – A, varia entre as classes “moderada a forte” ( $7.357 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ano}$ ) e “forte” ( $9.810 \text{ MJ}\cdot\text{mm}/\text{ha}\cdot\text{h}\cdot\text{ano}$ ). Esses valores indicam uma elevada energia cinética das chuvas incidentes na região, o que potencializa a capacidade das precipitações em desagregar as partículas do solo e promover seu transporte superficial (Bertoni & Lombardi, 2017). Isto revela que a RMS está sujeita a eventos pluviométricos intensos, que, quando associados a declividades acentuadas, solos frágeis ou uso inadequado do solo, aumentam significativamente o risco de processos erosivos. Essa característica reforça a necessidade de práticas de manejo e conservação do solo adequadas, especialmente em áreas agrícolas e regiões com pouca cobertura vegetal.

Já o mapa de erodibilidade (fator K), apresentado na Figura 15 – B, expressa a suscetibilidade dos solos à erosão hídrica, refletindo suas propriedades físicas e químicas, como textura, estrutura, teor de matéria orgânica e permeabilidade. Os valores do fator K são inerentes às características intrínsecas dos diferentes tipos de solo presentes na região. Considerando a extensão territorial da RMS, identificam-se três classes de solos, com predominância do Argissolo Vermelho-Amarelo (PVA) e do Latossolo Vermelho (LV). O PVA, caracterizado por sua textura média a argilosa e por apresentar horizontes Bt com acúmulo de argila, é mais suscetível à erosão, especialmente em áreas declivosas e com cobertura vegetal reduzida. Por outro lado, o LV apresenta boa estrutura e alta estabilidade de agregados, o que confere maior resistência à erosão, embora essa capacidade possa ser reduzida em áreas submetidas a práticas inadequadas de uso e manejo do solo (Lombardi Neto; Bertoni, 1975).

O mapa da Figura 15 – C apresenta o fator LS, o qual corresponde aos principais fatores que influenciam diretamente a perda de solo (Panditharathne et al., 2019). Na área da RMS, observa-se uma variação relativamente baixa deste fator, com ligeira redução em áreas urbanizadas, possivelmente devido à presença de superfícies mais planas e à alteração da topografia natural pelo processo de urbanização.

Por fim, o fator CP, apresentado na Figura 15 – D, corresponde ao uso e manejo do solo, sendo determinante para estimar a eficiência das práticas conservacionistas e a cobertura da superfície. Valores mais elevados estão associados às áreas com densa cobertura vegetal natural, como florestas, que promovem maior proteção do solo. Em contraste, valores próximos de zero ocorrem nas áreas urbanas, onde existe a impermeabilização do solo. Já os valores intermediários distribuem-se nas áreas de atividade agropecuária, refletindo o grau variável de impacto e manejo do uso da terra nessas regiões.

Assim, segundo a escala absoluta de Saaty (1977), e considerando pesquisa bibliográfica em artigos científicos recentes e o conhecimento específico sobre a área de estudo, foi elaborado os pesos e a matriz de comparação, conforme a Tabela 6.

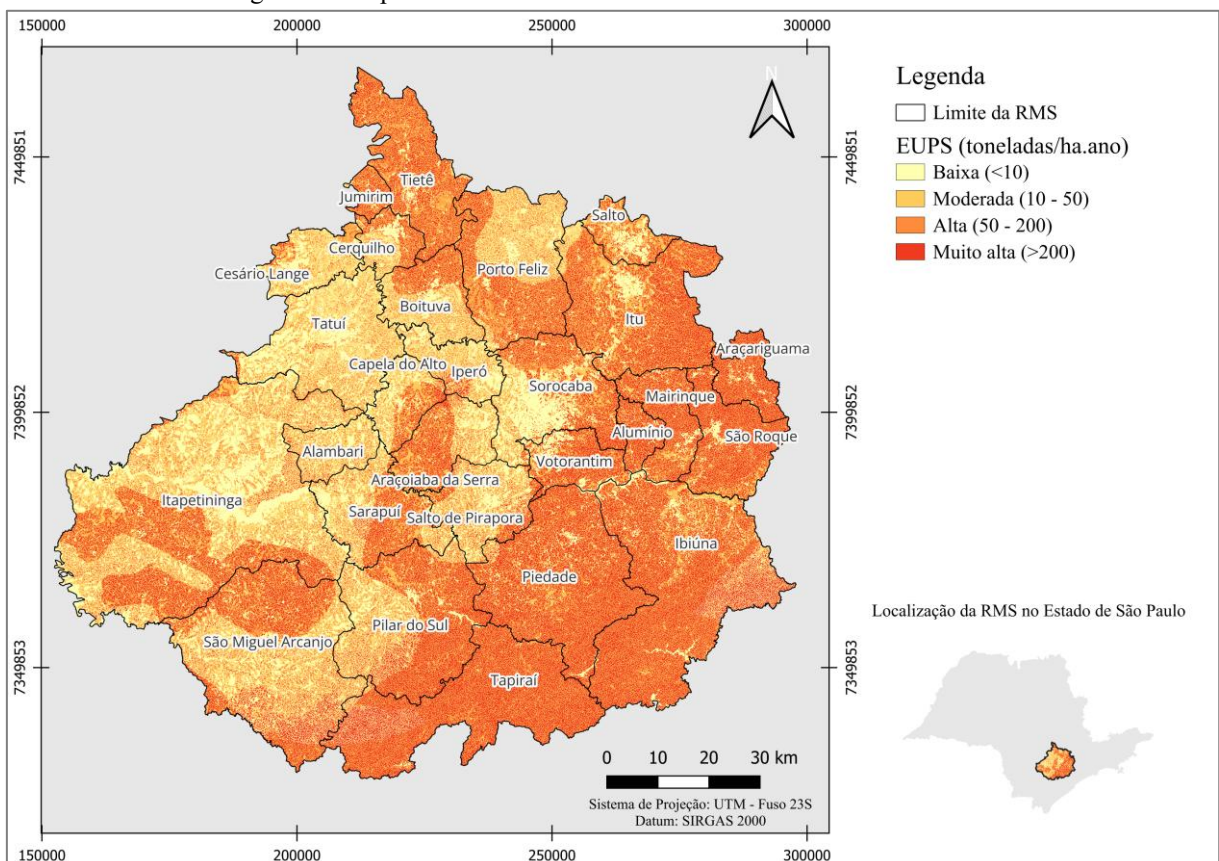
Tabela 6. Matriz de comparação entre os fatores da RUSLE para o cálculo do peso para AHP

Fator	CP	LS	K	R	Peso (W)
CP	1	3	5	5	0,465
LS	1/3	1	5	5	0,376
K	1/5	1/5	1	1	0,080
R	1/5	1/5	1	1	0,080

Fonte: Autoria própria

Finalmente, foi realizado o cálculo da perda de solo, o qual permitiu obter o Mapa da Perda de Solo (Figura 17). Observa-se que os valores estimados de perda de solo variam consideravelmente ao longo do território, com destaque para áreas classificadas como “alta” (50–200 t/ha ano) e “muito alta” (>200 t/ha ano), que predominam principalmente na porção sul e sudeste da RMS.

Figura 17. Mapa da Perda de Solo obtido através do cálculo da RUSLE



Fonte: Autoria própria

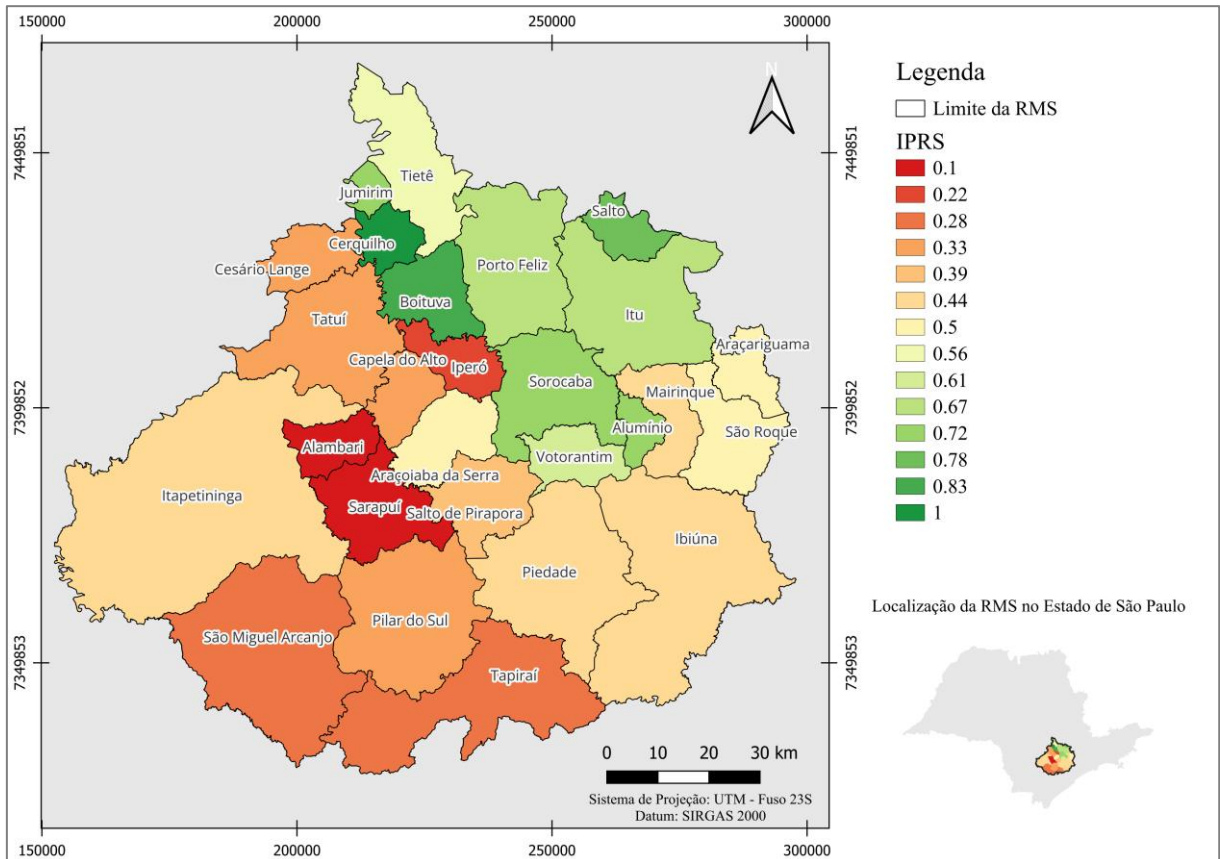
Observa-se que o tipo de solo, especialmente o Latossolo Vermelho (LV), exerceu forte influência nos valores do RUSLE, sendo possível identificar uma divisão clara que acompanha os limites de ocorrência desse solo na RMS. Além disso, destaca-se a presença de diferentes valores nas áreas centrais da RMS, com alternância entre classes de perda de solo, o que pode estar relacionado ao uso agrícola intensivo em áreas com relevo mais acidentado ou mal manejado.

Por fim, esse padrão indica que a interação entre uso da terra, práticas agrícolas e declividade exerce papel relevante na amplificação dos processos erosivos. A distribuição espacial do RUSLE ressalta a importância do planejamento ambiental e da gestão integrada do solo e das práticas de uso sustentável, principalmente nas regiões mais críticas.

### **5.7 Índice paulista de responsabilidade social**

A Figura 18 apresenta o mapa do IPRS, que avalia o grau de equidade social e qualidade de vida nos municípios paulistas. Nesse mapa, quanto maior o valor do índice, mais equitativo é o município, sendo esses representados em tonalidades de verde. Observa-se que aproximadamente 37% dos municípios da RMS apresentam um IPRS superior a 0,6, o que indica que menos da metade dos municípios possui níveis satisfatórios de equidade socioeconômica, conforme os parâmetros do índice.

Figura 18. Mapa do Índice Paulista de Responsabilidade Social



Fonte: Autoria própria

O município de Cerquilho destaca-se por apresentar o maior valor de IPRS, configurando-se como o mais equitativo da RMS. Em contrapartida, os municípios de Alambari e Sarapuá apresentam os menores valores, evidenciando maiores níveis de desigualdade social.

Estudos baseados no Índice de Moran demonstram que indicadores de desenvolvimento tendem a apresentar dependência espacial, formando agrupamentos de municípios com características semelhantes, conhecidos como clusters (Vieira *et al.*, 2024). Nesse sentido, a concentração de municípios com altos valores de IPRS na porção norte da RMS sugere a formação de um cluster de maior equidade social, no qual municípios vizinhos compartilham condições socioeconômicas mais favoráveis. Por outro lado, a presença de municípios com baixos valores de IPRS em outras áreas da região indica a existência de agrupamentos com menor desempenho social, refletindo a persistência de desigualdades territoriais. Esse comportamento espacial reforça que os níveis de desenvolvimento e equidade social não se distribuem de forma aleatória no território, mas tendem a se concentrar regionalmente em função de fatores socioeconômicos, estruturais e de políticas públicas locais

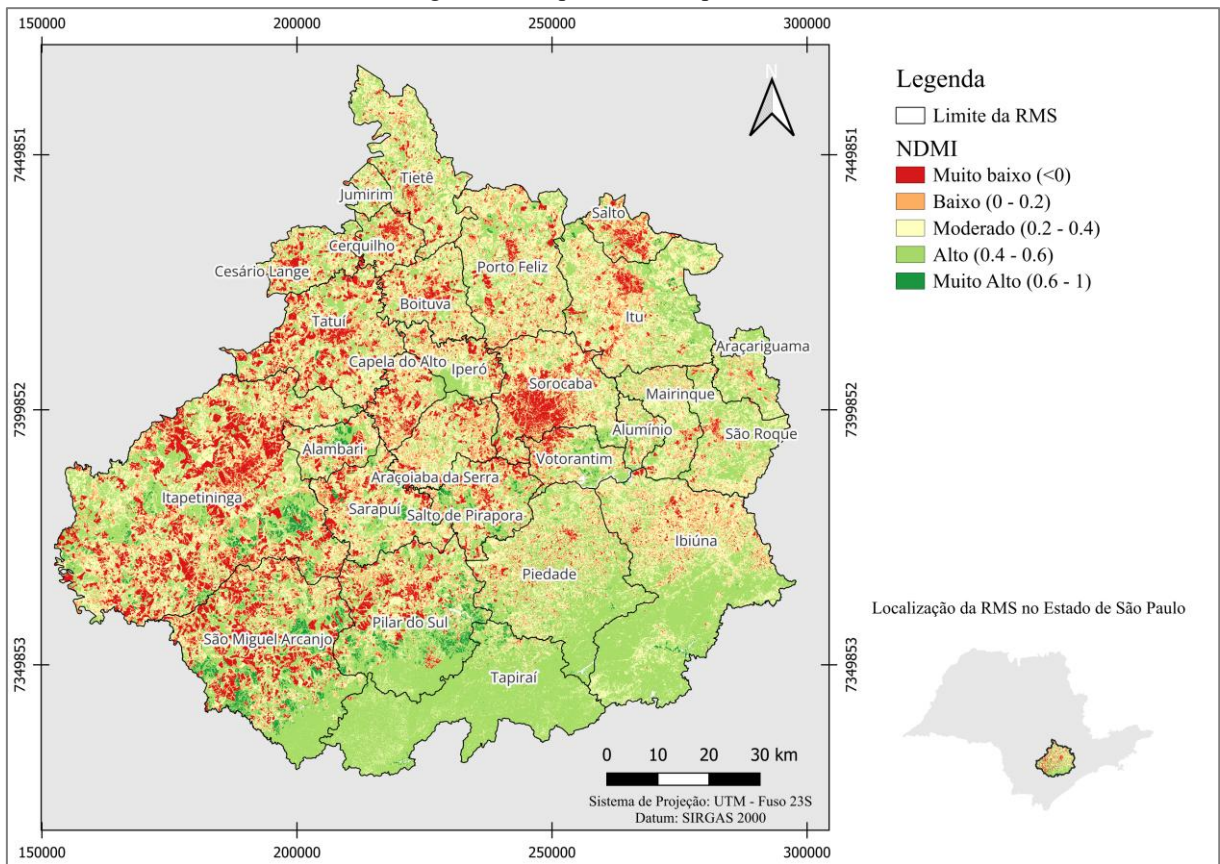
Essa variável foi incorporada ao modelo com o objetivo de representar os aspectos sociais do território, uma vez que engloba indicadores relacionados à longevidade, riqueza e escolaridade. Tais dimensões são essenciais para a compreensão das desigualdades sociais e da qualidade de vida da população, permitindo uma análise mais abrangente da realidade regional.

A inclusão dos aspectos sociais são fundamentais para o ZEE, pois garante uma abordagem integrada entre a dinâmica do território. Além de estar alinhada com as diretrizes do Decreto Estadual Nº 67.430/2022, que estabelece a necessidade de considerar os aspectos socioeconômicos na elaboração do ZEE, reforçando o compromisso com o planejamento territorial sustentável.

## **5.8 Índice de diferença normalizada de umidade**

O NDMI é amplamente utilizado para mensurar o nível de estresse hídrico na vegetação, sendo que valores altos ou muito altos indicam vegetação saudável e com boa disponibilidade hídrica. A Figura 19 apresenta o NDMI para a RMS, evidenciando que as áreas em vermelho (valores nulos) correspondem, em sua maioria, a zonas urbanas e a áreas rurais possivelmente em pousio ou desprovidas de sistemas de irrigação. Por outro lado, as áreas representadas em tons de verde, coincidem com regiões de floresta, predominantemente localizadas no setor sul da RMS, área que concentra o maior número de unidades de conservação e, conseqüentemente, a maior cobertura florestal.

Figura 19. Mapa do NDMI para RMS



Fonte: Autoria própria

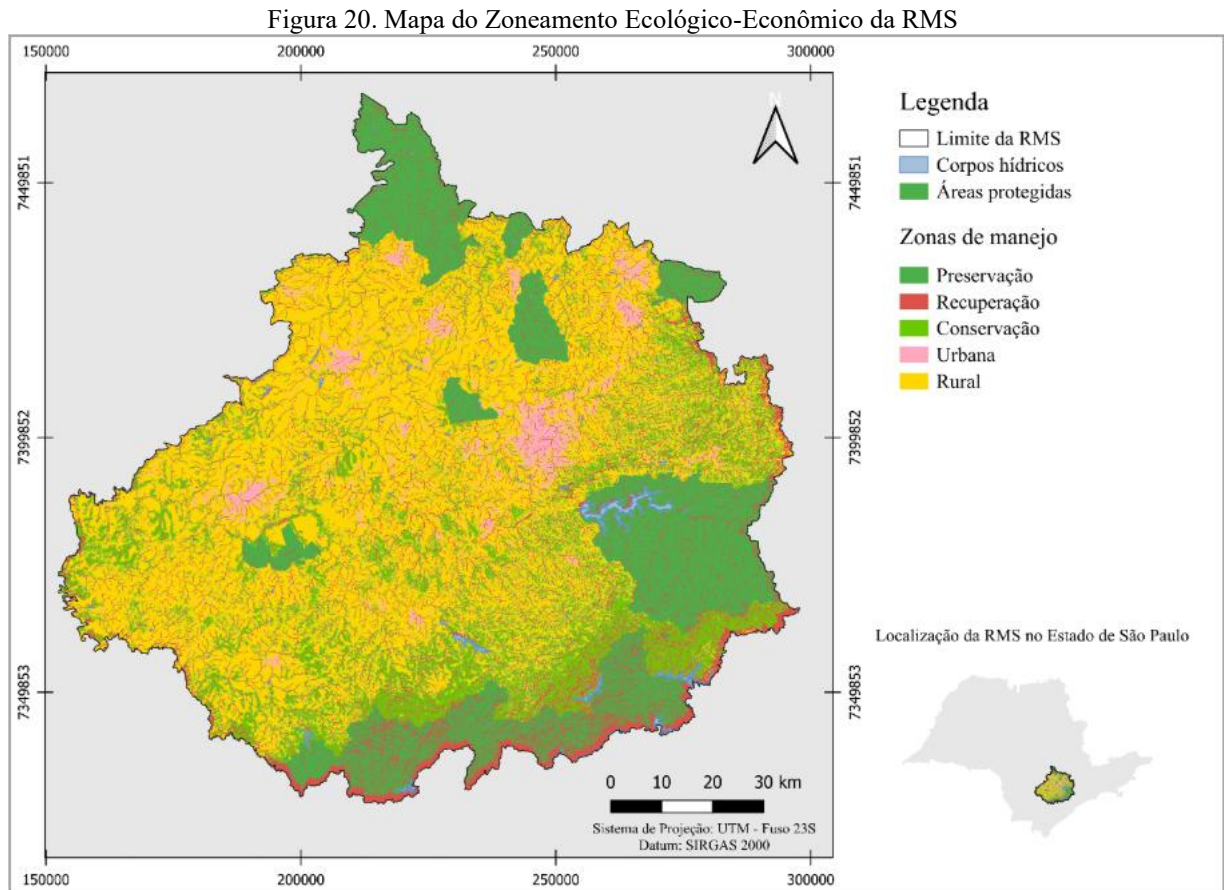
O aumento dos valores de NDMI está associado a melhores condições para a recuperação da vegetação natural (Justino et al., 2024). Na RMS, observa-se uma divisão espacial nítida, na qual as áreas com maior estresse hídrico se destacam. Mesmo nessas regiões de baixa umidade, identifica-se um ponto com comportamento e aparência similares à região sul. Trata-se da Floresta Nacional de Ipanema, cuja vegetação, embora fortemente pressionada por atividades antrópicas em seu entorno, mantém-se preservada. Esse cenário evidencia o papel fundamental da unidade de conservação na regulação da umidade local, demonstrando que a floresta ainda resiste hidricamente, mesmo sob intensa pressão antrópica.

O índice de umidade é considerado uma das variáveis mais relevantes na previsão do rendimento produtivo de culturas agrícolas (Watson-Hernández; Gómez-Calderón; Da Silva, 2022). Nesse sentido, chama atenção a presença de pontos isolados em verde escuro (0.6 - 1), localizados próximos a áreas com evidente estresse hídrico. Tal padrão é atípico, sobretudo quando comparado às áreas de florestas, que apresentam comportamento uniforme e índices altos (0.4 - 0.6). A ocorrência desses valores extremos e isolados está associada à presença de áreas agrícolas com sistemas de irrigação individualizados, cuja produtividade independe diretamente da precipitação natural.

O NDMI também é um importante indicador da resiliência dos ecossistemas aquáticos e terrestres, pois a redução da umidade pode comprometer a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos, como a regulação hídrica e o fornecimento de habitat (Schwerdtfeger et al., 2015). Suas oscilações refletem as interações entre mudanças climáticas e práticas de manejo. Enquanto o aumento da umidade pode indicar recuperação hidrológica, a redução acentuada sugere estresse hídrico severo, potencialmente agravado por secas e variabilidade climática (Teixeira et al., 2015). Além disso, a conversão de áreas naturais em pastagens e áreas agrícolas reduz significativamente as zonas úmidas, evidenciando a urgência de estratégias de manejo sustentável (Justino et al., 2024). Assim, o NDMI torna-se uma variável-chave para este modelo, pois leva em consideração a adaptabilidade climática dos municípios e identifica tanto regiões sob elevado estresse hídrico quanto áreas com potencial de regeneração vegetativa.

## **5.9 Zoneamento ecológico-econômico**

A Figura 20 apresenta o produto final deste trabalho: o mapa de ZEE da RMS, elaborado por meio da aplicação da RNA-SOM. Esse mapa representa a síntese espacial dos padrões identificados a partir da análise conjunta de variáveis ambientais, sociais e territoriais, possibilitando a delimitação de zonas de manejo. Levando em consideração que a classificação foi realizada de forma não supervisionada, permitiu-se que a RNA agrupasse áreas com características semelhantes, resultando em uma representação coerente com a dinâmica da RMS.



Fonte: Autoria própria

No extremo sul da RMS, observa-se uma faixa classificada como zona de recuperação. Contudo, essa classificação provavelmente decorre de interferência do fundo no modelo utilizado, uma vez que, conforme o mapa de uso da terra, essa área é predominantemente composta por florestas. Assim, não atende aos critérios para ser considerada uma zona de recuperação, que envolve áreas de unidades de conservação ou APPs com uso da terra divergente de floresta. Diante disso, conclui-se que essa faixa deveria ser classificada como zona de preservação.

Para evitar esse tipo de inconsistência, o ideal seria estabelecer previamente um buffer de no mínimo 90 metros, idealmente de 2 km da área de estudo. Esse limite seria então utilizado para o processamento de todas as variáveis e para a execução do modelo de rede neural. Somente após a obtenção dos resultados pela RNA-SOM, seria realizado o recorte final correspondente à área de interesse, neste caso, a RMS.

A Tabela 7 apresenta a área e o percentual correspondente a cada zona de manejo delimitada. Observa-se que mais da metade da RMS foi classificada como zona rural, o que é coerente com o mapa de uso da terra, já que grande parte do território é composta por áreas destinadas à atividade agropecuária, refletindo a base econômica predominante dos municípios

que integram a região. Em contrapartida, menos de 1% foi classificado como zona de preservação, resultado que não corresponde ao esperado, considerando a presença de diversas unidades de conservação de proteção integral que, teoricamente, deveriam compor essa categoria. As demais zonas apresentaram resultados compatíveis com o esperado.

Tabela 7. Área por zona de manejo da RMS

Zona de manejo	Área (ha)	Área (%)
<b>Preservação</b>	659,1427	0,06
<b>Recuperação</b>	137.082,9535	11,81
<b>Conservação</b>	329.265,1787	28,36
<b>Urbana</b>	31.776,0652	2,74
<b>Rural</b>	662.096,2778	57,03
<b>Total</b>	1160879,618	100

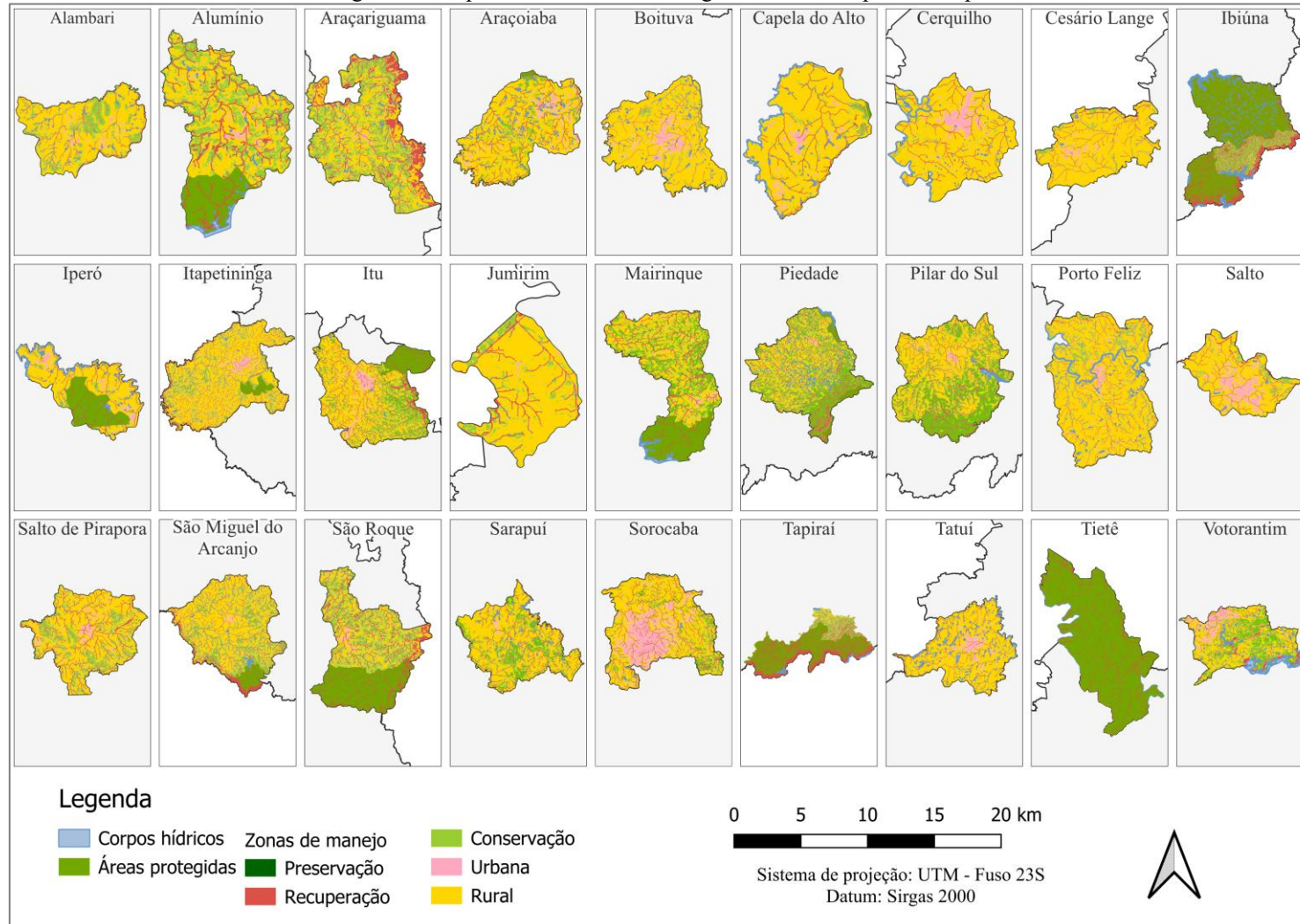
Fonte: Autoria própria

A Figura 21 apresenta o mapa de ZEE para cada município, sintetizando a classificação das diferentes zonas de manejo a partir da análise integrada das variáveis consideradas no modelo. Complementarmente, a Tabela 8 apresenta os valores absolutos (em hectares) e relativos (em porcentagem) das zonas de manejo por município, facilitando a comparação e a interpretação quantitativa dos resultados obtidos.

A distribuição espacial das zonas de manejo evidenciou a ocorrência expressiva de feições lineares classificadas como Zona de Recuperação. Esse padrão está relacionado as APPs, em que são caracterizadas por áreas lineares que acompanham o traçado da drenagem superficial, rios, represas e demais corpos hídricos. Quando associadas a trechos com cobertura vegetal ausente ou degradada foram identificados pelo modelo como áreas prioritárias para recuperação. Esse resultado é metodologicamente coerente, uma vez que a Zona de Recuperação foi definida, neste estudo, como categoria destinada a áreas que apresentam uso conflitante com sua função ecológica ou restrição legal, e que demandam intervenção ativa para restabelecimento da cobertura vegetal.

Do ponto de vista da gestão ambiental, a espacialização dessas feições lineares de recuperação representa uma contribuição relevante para o planejamento territorial da RMS. Permitindo identificar e orientar ações de restauração ecológica prioritárias e subsidiando a implementação do Programa de Regularização Ambiental (PRA), previsto no próprio Código Florestal. A sobreposição dessas feições com o mapa de uso da terra indica que grande parte das APPs em conflito está associada a áreas agrícolas e de lavoura temporária, reforçando a necessidade de mecanismos de compensação e adequação ambiental no setor rural da região.

Figura 21. Mapa do Zoneamento Ecológico-Econômico por município



Fonte: Autoria própria

Tabela 8. Área por zona de manejo por município

Município	Preservação		Recuperação		Conservação		Urbana		Rural	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Alambari	0,13	0,00	1220,28	7,67	3321,33	20,87	302,79	1,90	11067,47	69,55
Alumínio	4,67	0,06	1005,01	11,96	2691,30	32,03	122,07	1,45	4579,81	54,50
Araçariguama	0,00	0,00	3045,68	20,91	5073,80	34,84	88,86	0,61	6355,82	43,64
Araçoiaba da Serra	0,82	0,00	2182,05	8,54	2598,48	10,17	1139,98	4,46	19622,40	76,82
Boituva	0,41	0,00	1558,97	6,27	1829,37	7,36	1577,10	6,35	19888,13	80,02
Capela do Alto	0,61	0,00	1087,73	6,88	135,70	0,86	677,20	4,29	13900,35	87,97
Cerquillo	0,93	0,01	976,73	7,66	692,98	5,43	960,74	7,53	10125,38	79,37
Cesário Lange	0,62	0,00	157,49	0,89	1260,82	7,13	491,59	2,78	15765,36	89,19
Ibiúna	420,76	0,40	21214,21	20,07	51151,38	48,40	470,92	0,45	32417,96	30,68
Iperó	1,39	0,01	123,09	0,77	2653,83	16,68	577,97	3,63	12557,73	78,91
Itapetininga	0,98	0,00	14237,48	7,96	38443,22	21,50	3760,80	2,10	122364,61	68,43
Itu	0,63	0,00	6819,99	10,66	14390,47	22,49	2271,56	3,55	40508,39	63,30
Jumirim	0,00	0,00	455,97	8,06	720,53	12,74	28,91	0,51	4448,76	78,68
Mairinque	0,07	0,00	2100,40	9,98	7312,54	34,76	293,86	1,40	11332,69	53,86
Piedade	31,64	0,04	8868,96	11,88	32467,93	43,47	233,64	0,31	33081,46	44,30
Pilar do Sul	17,22	0,03	6696,73	9,82	26938,60	39,51	699,56	1,03	33827,68	49,62
Porto Feliz	5,47	0,01	4802,16	8,75	7016,68	12,79	88,53	0,16	42942,84	78,28
Salto	0,08	0,00	122,75	1,01	1066,15	8,75	1806,83	14,82	9193,95	75,42
Salto de Pirapora	31,26	0,11	2688,92	9,60	6084,32	21,73	876,23	3,13	18316,86	65,42
São Miguel Arcanjo	11,34	0,01	9734,68	10,46	31788,81	34,15	408,59	0,44	51150,78	54,95
São Roque	0,00	0,00	4222,34	13,76	12581,74	41,00	309,28	1,01	13576,16	44,24
Sarapuí	0,65	0,00	2960,88	8,39	7726,30	21,89	272,29	0,77	24343,14	68,95
Sorocaba	0,24	0,00	3928,63	9,56	434,70	1,06	8904,46	21,66	27840,03	67,72
Tapiraí	56,04	0,07	23334,08	30,94	47197,53	62,59	0,73	0,00	4818,53	6,39
Tatuí	32,23	0,06	3385,80	6,46	3716,07	7,09	2839,50	5,42	42403,08	80,96
Tietê	26,16	0,06	3905,08	9,65	9346,59	23,10	595,71	1,47	26595,21	65,72
Votorantim	14,81	0,08	2616,85	14,24	5490,41	29,88	1179,62	6,42	9071,69	49,37
Total	659,14	0,06	133452,94	11,59	324131,58	28,15	30979,32	2,69	662096,28	57,51

A análise da distribuição das zonas de manejo por município, revelou heterogeneidade espacial significativa no interior da RMS, refletindo a diversidade de perfis territoriais, ambientais e socioeconômicos que caracterizam os 27 municípios que compõem a região. Em termos agregados, a Zona Rural foi a categoria predominante, abrangendo mais de 50% da área total da RMS, resultado coerente com o mapeamento do uso da terra, no qual as atividades agropecuárias e de lavoura temporária ocupam aproximadamente 54,73% do território. A Zona de Conservação correspondeu a quase 30% da área, seguida pela Zona de Recuperação, com aproximadamente 11%, pela Zona Urbana, com cerca de 3%, e pela Zona de Preservação, com menos de 1%, resultado abaixo do esperado considerando a expressiva presença de unidades de conservação de proteção integral na região.

No âmbito municipal, observou-se um primeiro grupo de municípios com perfil predominantemente conservacionista, caracterizado pela maior participação relativa das zonas de preservação e conservação. Ibiúna, Tapiraí, Piedade e Iperó destacam-se, sendo os municípios que concentram extensas áreas de remanescentes florestais de Mata Atlântica, importantes corpos hídricos e expressivas unidades de conservação, como a APA da Serra do Mar e o PE Carlos Botelho. Esse perfil é reforçado pela baixa densidade demográfica e pela menor pressão de expansão urbana observada nesses municípios em comparação ao eixo central da RMS.

São Roque e Araçariguama destacaram-se pela maior participação relativa da Zona de Recuperação, o que indica a presença de áreas com potencial para projetos de restauração ecológica e reflorestamento. Ambos os municípios estão inseridos em contexto de transição entre o eixo urbano-industrial da grande São Paulo e a região serrana sul da RMS, submetidos a pressões de expansão imobiliária e uso agropecuário sobre remanescentes florestais. A classificação dessas áreas como Zona de Recuperação pelo modelo é, portanto, metodologicamente consistente e ambientalmente relevante, sinalizando territórios para a implementação de programas de pagamento por serviços ambientais e restauração da conectividade ecológica.

Já os municípios Capela do Alto, Cesário Lange, Porto Feliz e São Miguel do Arcajo, apresentou predominância das zonas rural, evidenciando um perfil territorial voltado à atividade agropecuária. Nesses municípios, a extensão das áreas classificadas é expressiva, compatível com as atividades econômicas proveniente das lavouras temporárias e da pecuária identificadas no mapeamento do uso da terra.

Como o esperado Sorocaba, Salto e Votorantim compõe o grupo de municípios com maior participação relativa da Zona Urbana. Sorocaba, como polo regional e maior município

da RMS em extensão territorial e população, apresentou a maior área urbana absoluta, reflexo do seu grau de industrialização, densidade de infraestrutura viária e dinamismo econômico. Votorantim, também fortemente industrializada, apresentou perfil semelhante, com alta concentração de atividade econômica e infraestrutura urbana consolidada. Salto, por sua vez, integra o eixo de urbanização ao norte da região, com características que o posiciona como um dos municípios mais urbanizados da sub-região de Itu.

A distribuição das zonas de manejo por município, quando analisada em conjunto com o perfil territorial de cada unidade administrativa, demonstra a pertinência da abordagem metodológica adotada neste estudo. Ao integrar variáveis ambientais, socioeconômicas e territoriais por meio da RNA-SOM, foi possível obter um ZEE que reflete, com coerência, as especificidades de cada porção da RMS, oferecendo subsídios diferenciados para o planejamento e a gestão territorial em escala municipal e regional.

## 6 CONCLUSÕES

Com base no exposto, conclui-se que, de maneira geral, as tecnologias de sensoriamento remoto e redes neurais artificiais empregadas na metodologia mostraram-se eficientes na identificação das zonas de manejo e na geração do mapa de ZEE da RMS, em conformidade com os critérios legais, técnicos e científicos. No entanto, observou-se uma limitação na identificação da Zona de Preservação, especialmente no que se refere às APP que, embora adequadas, não foram corretamente classificadas. Tais áreas deveriam compor prioritariamente a Zona de Preservação, dada sua importância na manutenção da integridade do bioma.

Além disso, verificou-se que muitas APP foram alocadas na Zona de Recuperação, o que indica seu potencial para projetos de reflorestamento e restauração ecológica. Outro fator limitante observado foi a interferência do “fundo” da imagem durante o processamento, que afetou a definição precisa da Zona de Recuperação. Diante disso, recomenda-se que, em estudos futuros, seja adotado um recorte espacial mais amplo do que a área de interesse, de modo a minimizar a influência das bordas e melhorar o desempenho do modelo.

O pré-processamento das variáveis constitui uma etapa crítica e determinante na metodologia adotada, sendo essencial para garantir a qualidade e a confiabilidade dos resultados obtidos. A precisão na obtenção, no processamento e na conversão dos arquivos influencia diretamente o resultado do mapa final de ZEE, exigindo, portanto, rigor técnico e atenção em todas as fases desse processo.

As Unidades de Conservação de Proteção Integral demonstraram exercer um papel estratégico na preservação da vegetação nativa e na mitigação de pressões antrópicas, especialmente em áreas com densa cobertura vegetal e presença de APP. Essas unidades mostram-se de extrema importância na proteção de áreas verdes sujeitas a pressões antrópicas, exercendo papel fundamental na proteção do bioma Mata Atlântica.

No contexto do ZEE, é imprescindível que as diretrizes estabelecidas pelas legislações de ZEE do Estado de São Paulo especifiquem com maior clareza as variáveis que devem ser consideradas, bem como as zonas de manejo que devem ser definidas. A padronização da metodologia é essencial para tornar o processo de elaboração do ZEE mais uniforme em todo o estado, especialmente no que se refere à forma como os resultados são apresentados, garantindo a homogeneidade das zonas de manejo e das variáveis adotadas.

Adicionalmente, destaca-se a necessidade de uma integração mais concreta e clara das variáveis socioeconômicas. Observa-se que variáveis econômicas, mas principalmente sociais, como escolaridade, tipo de habitação, renda per capita, entre outras, têm influência significativa

sobre a dinâmica territorial dos municípios e, portanto, devem ser incorporadas de forma sistemática e criteriosa no processo de zoneamento.

Nesse sentido, o presente estudo contribui para o avanço das aplicações de tecnologias de sensoriamento remoto e redes neurais artificiais no processo de elaboração do ZEE, demonstrando o potencial dessas ferramentas para a identificação de zonas de manejo e para a integração de variáveis ambientais no planejamento territorial da Região Metropolitana de Sorocaba.

Espera-se que estudos como este subsidiem a tomada de decisões por parte do poder público acerca do desenvolvimento sustentável das cidades, por meio da revisão, atualização e adequação de legislações, planos de manejo e demais instrumentos de gestão territorial. Ademais, o ZEE também representa uma ferramenta estratégica para o setor privado, possibilitando a identificação de áreas prioritárias e a implementação de projetos socioambientais voltados à recuperação e conservação de regiões ecologicamente relevantes na RMS.

## REFERÊNCIAS

- AGUILAR ARIAS, Heileen; MORA ZAMORA, Rodolfo; VARGAS BOLAÑOS, Christian. Atmospheric correction methodology for aster, rapideye, spot 2 and landsat 8 images with envi flaash module software. **Revista Geográfica de América Central**, v. 2, n. 53, p. 39–59, 1 maio 2015.
- ALVES, Wellmo dos Santos *et al.* USLE modelling of soil loss in a Brazilian cerrado catchment. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 27, p. 100788, ago. 2022.
- AMORIM, Amanda Trindade *et al.* AVALIAÇÃO DA RESPOSTA ESPECTRAL DE UM FRAGMENTO FLORESTAL DO BIOMA MATA ATLÂNTICA. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 267–270, abr. 2019.
- ANDRADE, Fabíola Magalhães. **Mapeamento do uso do solo e cobertura vegetal na bacia hidrográfica do rio una – Ibiúna/SP**. Dissertação (Mestrado)—Sorocaba: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2016.
- ARANTES, Leticia Tondato. **Elaboração de uma metodologia baseada em redes neurais artificiais para o zoneamento ecológico-econômico em bacias hidrográficas**. Doutorado—SOROCABA: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2023.
- ARANTES, Leticia Tondato; SILVA, Darllan Collins da Cunha e; LOURENÇO, Roberto Wagner. Uma revisão sistemática sobre as abordagens e métodos utilizados no zoneamento ecológico-econômico no Brasil. **Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB**, v. 60, n. 3, p. 938, 10 jul. 2023.
- ARYA, Ajay Kumar; SINGH, Ajay Pratap. Multi criteria analysis for flood hazard mapping using GIS techniques: a case study of Ghaghara River basin in Uttar Pradesh, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 14, n. 8, p. 656, 2 abr. 2021.
- BARRETO, Ilson Juliano. O surgimento de novas regiões metropolitanas no Brasil: uma discussão a respeito do caso de Sorocaba (SP). **Espaço e Economia**, n. 1, 31 dez. 2012.
- BARROS, André Corrêa; FERNANDES, Ricardo Lopes. **A DINÂMICA DO EMPREGO NA REGIÃO METROPOLITANA DE SOROCABA: UMA ANÁLISE DE COINTEGRAÇÃO**. São Paulo: [S.n.].
- BATISTA, Reginaldo Antonio Weissenberg *et al.* ESTIMATIVA DO FATOR DE EROSIVIDADE DO SOLO DA REGIÃO DO VALE DO RIBEIRA PAULISTA, BRASIL. **Formação (Online)**, v. 28, n. 53, 10 abr. 2021.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 10. ed. São Paulo: [S.n.].

BONANOMI, Juliana *et al.* Protecting forests at the expense of native grasslands: Land-use policy encourages open-habitat loss in the Brazilian cerrado biome. **Perspectives in Ecology and Conservation**, v. 17, n. 1, p. 26–31, jan. 2019.

BRASIL. **LEI Nº 4.504, DE 30 DE NOVEMBRO DE 1964.** Brasília, 1964.

BRASIL. **Decreto nº 83.518, de 29 de Maio de 1979. Diário Oficial da União - Seção 1 - 30/5/1979, Página 7636 (Publicação Original), 1979.**

BRASIL. **Lei Federal Nº6.938, de 31 de agosto de 1981.** , 1981.

BRASIL. **LEI Nº 11.428, DE 22 DE DEZEMBRO DE 2006.** , 2006.

BRASIL. **LEI Nº 12.651, DE 25 DE MAIO DE 2012.** , 2012.

BRASIL. **Lei Federal nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015.** , 2015.

BRASIL. **DECRETO Nº 10.087, DE 5 DE NOVEMBRO DE 2019.** , 2019.

BRASIL. **DECRETO Nº 4.297, DE 10 DE JULHO DE 2002.** BRASIL, 2022.

CAIADO, Rodrigo Goyannes Gusmão *et al.* Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. **Journal of Cleaner Production**, v. 165, p. 890–904, nov. 2017.

CHOI, Won-IL *et al.* Quantification of One-Year Gypsy Moth Defoliation Extent in Wonju, Korea, Using Landsat Satellite Images. **Forests**, v. 12, n. 5, p. 545, 27 abr. 2021.

COHEN, Jacob. A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, n. 1, p. 37–46, 1 abr. 1960.

CREPANI, Edison *et al.* **SENSORIAMENTO REMOTO E GEOPROCESSAMENTO APLICADOS AO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO E AO ORDENAMENTO TERRITORIAL.** [S.l.: S.n.].

CRIVELENTI, R. C. *et al.* Ecological-economic zoning of the city of altinópolis - SP, Brazil. **Engenharia Agrícola**, v. 36, n. 6, p. 1218–1228, 2016.

DATAGEO. **Infraestrutura de Dados Espaciais Ambientais do Estado de São Paulo - IDEA-SP.** Disponível em: <<https://datageo.ambiente.sp.gov.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

EMPLASA. **Plano de Ação da Macrometrópole Paulista, 2013:2040.** [S.l.: S.n.].

EMPLASA. **Plano de Desenvolvimento Urbano Integrado: Panorama Geral.** [S.l.: S.n.].

FALOWO, O. O.; OJO, O. Multi-criteria groundwater potential zonation using GIS-based fuzzified AHP: Case study of Ondo metropolis Southwestern Nigeria. **SOLID EARTH SCIENCES**, v. 8, n. 4, p. 319–344, 2023.

FAVARETO, A.; RAZERA, A. Ecological-economic zoning in the Legal Amazon in light of the literature on the implementation of public policies and institutional arrangements. **DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE**, v. 62, p. 708–726, 2023.

FERREIRA, Antonio José Araújo; TRINDADE JÚNIOR, Saint-Clair Cordeiro. The ecological-economic zoning of the amazon biome as an instrument of territorial organization in Maranhão (Brazil). **NOVOS CADERNOS NAEA**, v. 26, n. 1, p. 169–193, 2023.

FIORIO, Peterson Ricardo. **Avaliação cronológica do uso da terra e seu impacto no ambiente da microbacia hidrográfica do Córrego do Ceveiro da região de Piracicaba - SP.** Piracicaba: Universidade de São Paulo, 8 nov. 2019.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de satélite para estudos ambientais.** 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FUNDAÇÃO FLORESTAL. Plano de Manejo da APA de Itupararanga. **Secretaria de Estado de Meio Ambiente**, 2010.

GLEESON, Tom *et al.* Water balance of global aquifers revealed by groundwater footprint. **Nature**, v. 488, n. 7410, p. 197–200, 8 ago. 2012.

GRASS, GEOGRAPHIC RESOURCES ANALYSIS SUPPORT SYSTEM. **Geographic Resources Analysis Support System 8.0. Open-Source Geospatial Foundation.**

HARDISKY, M. A.; KLEMAS, V.; SMART, R. M. The influence of soil salinity, growth form, and leaf moisture on the spectral radiance of *Spartina alterniflora* canopies. **Photogramm. Eng. Remote Sens.**, v. 49, p. 77–83, 1983.

IBGE. **Manual Técnico de Uso da Terra.** 3. ed. Rio de Janeiro: Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão, 2013. v. 1

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produto Interno Bruto - PIB.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

ICMBIO. **Floresta Nacional de Ipanema.** Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/flonaipanema/floresta-nacional-de-ipanema.html>>. Acesso em: 12 set. 2024.

IGC, Instituto Geográfico e Cartográfico. **O IGC.**

JUNIOR, Vidal Dias da Mota *et al.* Proteção da biodiversidade, legislação e políticas públicas na região metropolitana de Sorocaba- SP, Brasil, entre 2010 e 2019. **Trayectorias Humanas Trascontinentales**, v. 7, n. 7, 11 maio 2020.

JUSTINO, Sérgio Túlio Pereira *et al.* Monitoring Environmental Degradation and Spatial Changes in Vegetation and Water Resources in the Brazilian Pantanal. **Sustainability**, v. 17, n. 1, p. 51, 25 dez. 2024.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159–74, mar. 1977.

LILLESAND, T. M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. Nova York: John Wiley & Sons, 2004.

LIU, W. T. H. **Aplicações de sensoriamento remoto. Campo Grande**. Campo Grande: UNIDERP, 2007.

LOMBARDI NETO, F.; BERTONI, J. **Tolerância de perdas de terras para solos do Estado de São Paulo**. Campinas: [S.n.].

LOPES. **ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO: DIRETRIZES, PARÂMETROS E TÉCNICAS PARA A GESTÃO AMBIENTAL DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**. Doutorado—Sorocaba: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2018.

LOPES, E. R. D.; FILHO, J. L. A.; LOURENÇO, R. W. Environmental similarity of ecologic-economic Zoning proposals in river Basins in Brazil. **BOLETIM GOIANO DE GEOGRAFIA**, v. 40, n. 1, 2020.

LOPES, E. R. N. *et al.* Ecological-economic zoning as an instrument for the environmental management of hydrographic basins. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 1, p. 106–125, 2021.

MAIA JÚNIOR, L. P.; LOURENÇO, R. W. Impactos das mudanças no uso e cobertura da terra sobre a variabilidade do albedo na bacia hidrográfica do rio Sorocabaçu (Ibiúna - SP). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, n. jul/dez, 2020.

MENEGUZZO, Isonel Sandino; ALBUQUERQUE, Edu Silvestre. A POLÍTICA AMBIENTAL PARA A REGIÃO DOS CAMPOS GERAIS DO PARANÁ. **Editora UFPR**, v. 18, p. 51–58, 2009.

MORANDI, Daniela Torres *et al.* Delimitation of ecological corridors between conservation units in the Brazilian Cerrado using a GIS and AHP approach. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106440, ago. 2020.

NERY, César Vinícius Mendes *et al.* Avaliação das Técnicas de Classificação MAXVER, MAXVER – ICM e Distância Mínima Euclidiana de acordo com Índice Kappa (Evaluation of Classification Techniques MAXVER, MAXVER-ICM and Minimum Euclidean Distance according to Kappa Index). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 2, p. 320–328, 5 set. 2013.

NYIMBILI, P. H.; ERDEN, T.; KARAMAN, H. Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. **NATURAL HAZARDS**, v. 92, n. 3, p. 1523–1546, 2018.

OLIVEIRA, Renan Antrizani de *et al.* Proposição de Corredor Ecológico entre duas Unidades de Conservação na Região Metropolitana de Sorocaba. **Revista do Departamento de Geografia USP**, v. 32, p. 61–71, 2016a.

OLIVEIRA, Renan Antrizani de *et al.* Proposição de Corredor Ecológico entre duas Unidades de Conservação na Região Metropolitana de Sorocaba. **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 32, p. 61, 27 dez. 2016b.

OLIVEIRA, Renan Antrizani de *et al.* METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR AN ECOLOGICAL CORRIDOR AND FINANCIAL COST ESTIMATE: A WAY TO HELP CONSERVE BIODIVERSITY. **Journal for nature conservation**, v. 79, 2024.

PALACIOS-VEGA, J. J. *et al.* Forest loss in areas of conservation and recovery of the Ecological and Economic Zoning (ZEE) in the province of Alto Amazonas, Loreto, Peru. **CIENCIA AMAZONICA**, v. 9, n. 1, p. 1–16, 2021.

PANDITHARATHNE, D. L. D. *et al.* Application of Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle) Model to Assess Soil Erosion in “Kalu Ganga” River Basin in Sri Lanka. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2019, p. 1–15, 1 dez. 2019.

PEREIRA, José Roberto *et al.* Gestão social dos territórios da cidadania: o zoneamento ecológico-econômico como instrumento de gestão do território noroeste de Minas Gerais. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 9, n. 3, p. 724–747, set. 2011.

PEREIRA, Priscilla da Silva *et al.* Avaliação da integridade ecológica de rios em áreas do zoneamento ecológico econômico do complexo hidrográfico Guapiaçu-Macacu, RJ, Brasil. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 7, n. 1, p. 157–168, 30 abr. 2012.

- POSEY, Darrell Addison. Indigenous management of tropical forest ecosystems: the case of the Kayapó Indians of the Brazilian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 3, n. 2, p. 139–158, 1985.
- REZENDE, Patrícia Soares; MARQUES, Daniela Vieira; ROSA, Roberto. Uso de dados do Sentinel-2 para cálculo de NDVI com base nos valores da refletância aparente e de superfície. **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto -SBSR**, 2017.
- RIBEIRO, Francisco Carlos *et al.* Indicadores Comparados da Produção Agrícola da Região Metropolitana de Sorocaba: Emprego, Renda e Capital Humano. *In: Economia Brasileira em Debate: Subsídios ao Desenvolvimento*. São Paulo: Editora Blucher, 2018. p. 33–46.
- SAATY, Thomas L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, jun. 1977.
- SADECK, L. W. R.; DE LIMA, A. M. M.; ADAMI, M. Artificial neural network for ecological-economic zoning as a tool for spatial planning. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 52, n. 11, p. 1050–1062, 2017.
- SALLES, M. H. D. *et al.* Avaliação Simplificada De Impactos Ambientais Na Bacia Do Alto Sorocaba (SP). **REA – Revista de estudos ambientais**, v. 10, p. 6–20, jan. 2008.
- SANTOS, Mariana Rodrigues Ribeiro dos; RANIERI, Victor Eduardo Lima. Criteria for analyzing environmental zoning as an instrument in land use and spatial planning. **Ambiente & sociedade**, v. 16, n. 4, p. 43–62, 2013.
- SANTOS, Tiago Moreira dos. **Terras Indígenas protegem a floresta**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://terrasindigenas.org.br/pt-br/faq/tis-e-meio-ambiente>>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- SÃO PAULO. **Lei Complementar nº 1.241, de 08 de maio de 2014**. , 2014.
- SÃO PAULO. **DECRETO Nº 67.430, DE 30 DE DEZEMBRO DE 2022**. , 2022.
- SCHWERDTFEGGER, Julia *et al.* Coupled Ground- and Space-Based Assessment of Regional Inundation Dynamics to Assess Impact of Local and Upstream Changes on Evaporation in Tropical Wetlands. **Remote Sensing**, v. 7, n. 8, p. 9769–9795, 31 jul. 2015.
- SEADE. **ÍNDICE PAULISTA DE DESENVOLVIMENTO MUNICIPAL – IPDM: Anexo Metodológico**. São Paulo: [S.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.seade.gov.br/dataset/indice-paulista-de-desenvolvimento-municipal-ipdm>>. Acesso em: 16 set. 2024.
- SEADE. **SEADE População**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://populacao.seade.gov.br/>>. Acesso em: 27 ago. 2025.

SEMIL, Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado de São Paulo – ZEE-SP**. Disponível em: <<https://semil.sp.gov.br/sma/portalezee/>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

SILVA, V. A. *et al.* SOIL MAPS, FIELD KNOWLEDGE, FOREST INVENTORY AND ECOLOGICAL-ECONOMIC ZONING AS A BASIS FOR AGRICULTURAL SUITABILITY OF LANDS IN MINAS GERAIS ELABORATED IN GIS. **CIENCIA E AGROTECNOLOGIA**, v. 37, n. 6, p. 538–549, 2013.

SIMONETTI, Vanessa Cezar; SILVA, Darllan Collins da Cunha e; ROSA, André Henrique. Proposta metodológica para identificação de riscos associados ao relevo e antropização em áreas marginais aos recursos hídricos. **Scientia Plena**, v. 15, n. 2, 25 mar. 2019.

SOUSA, Jocy Ana Paixão. **Elaboração de um índice de vulnerabilidade ambiental dos fragmentos florestais da mata atlântica**. Tese (doutorado)—Sorocaba: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2021.

STEINBERGER, Marília; ROMERO, m b. Reflexões preliminares sobre as dimensões demográficas urbanas do zoneamento ecológico-econômico. **Encontro Nacional de Estudos Populacionais da ABEP**, 12, 2000.

TAROMIDEH, Fereshteh *et al.* Urban Flood-Risk Assessment: Integration of Decision-Making and Machine Learning. **Sustainability**, v. 14, n. 8, p. 4483, 9 abr. 2022.

TEIXEIRA, Antônio *et al.* Use of MODIS Images to Quantify the Radiation and Energy Balances in the Brazilian Pantanal. **Remote Sensing**, v. 7, n. 11, p. 14597–14619, 4 nov. 2015.

TUDES, S.; YIGITER, N. D. Preparation of land use planning model using GIS based on AHP: case study Adana-Turkey. **BULLETIN OF ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT**, v. 69, n. 2, p. 235–245, 2010.

USGS. **Landsat 5**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>>. Acesso em: 26 maio. 2024.

USGS. **Landsat 8**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>>. Acesso em: 26 maio. 2024.

USGS, United States Geological Survey. **Landsat Soil Adjusted Vegetation Index**. Disponível em: <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>>. Acesso em: 15 jun. 2025.

VALLE, Ivana Cola; FRANCELINO, Márcio Rocha; PINHEIRO, Helena Saraiva Koenow. Mapeamento da Fragilidade Ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 295–308, 1 abr. 2016.

WATSON-HERNÁNDEZ, Fernando; GÓMEZ-CALDERÓN, Natalia; DA SILVA, Rouverson Pereira. Oil Palm Yield Estimation Based on Vegetation and Humidity Indices Generated from Satellite Images and Machine Learning Techniques. **AgriEngineering**, v. 4, n. 1, p. 279–291, 3 mar. 2022.

YILMAZ, Osman Salih. Flood hazard susceptibility areas mapping using Analytical Hierarchical Process (AHP), Frequency Ratio (FR) and AHP-FR ensemble based on Geographic Information Systems (GIS): a case study for Kastamonu, Türkiye. **Acta Geophysica**, v. 70, n. 6, p. 2747–2769, 17 ago. 2022.