

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS
FLORESTAIS E AMBIENTAIS

VITOR MATEUS MOREIRA GONÇALVES

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE
CONSERVAÇÃO DE FRAGMENTOS FLORESTAIS URBANOS**

Manaus
2025

VITOR MATEUS MOREIRA GONÇALVES

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE
CONSERVAÇÃO DE FRAGMENTOS FLORESTAIS URBANOS**

Dissertação apresentada ao PPGCIFA como
requisito para obtenção do grau de mestre
em Ciências Florestais e Ambientais.

Área de concentração: Conservação da
Natureza

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Alencar
de Mendonça

Coorientadora: Prof.^a Dra. Aurora Yanai

Manaus

2025

Ficha Catalográfica

Elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

G635p Gonçalves, Vitor Mateus Moreira
 Proposta Metodológica para Avaliação de Conservação de
 Fragmentos Florestais Urbanos / Vitor Mateus Moreira Gonçalves. -
 2025.
 55 f. : il., color. ; 31 cm.

 Orientador(a): André Luiz Alencar de Mendonça.
 Coorientador(a): Aurora Yanai.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Amazonas,
 Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais,
 Manaus, 2025.

 1. Análise Espacial Multicritério. 2. Conservação. 3. Florestas
 Urbanas. 4. AHP - Processo de Hierarquia Analítica. 5. Modelagem
 Espacial. I. Mendonça, André Luiz Alencar de. II. Yanai, Aurora. III.
 Universidade Federal do Amazonas. Programa de Pós-Graduação
 em Ciências Florestais e Ambientais. IV. Título

VITOR MATEUS MOREIRA GONÇALVES

**PROPOSTA METODOLÓGICA PARA AVALIAÇÃO DE
CONSERVAÇÃO DE FRAGMENTOS FLORESTAIS URBANOS**

Dissertação apresentada ao PPGCIFA como
requisito para obtenção do grau de mestre
em Ciências Florestais e Ambientais.

Área de concentração: Conservação da
Natureza

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Alencar
de Mendonça

Coorientadora: Prof.^a Dra. Aurora Yanai

Aprovado em: 13 de março de 2025

Prof. Dr. André Luiz Alencar de Mendonça (UFAM)

Prof. Dr. Rodrigo Campos Macedo (UFPR)

Prof. Dr. Rodrigo Capelato (UFAM)

Manaus

2025

AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação só foi possível graças ao apoio e incentivo de diversas pessoas e instituições, às quais expresso minha profunda gratidão.

Agradeço, primeiramente, à minha família, pelo amor incondicional, compreensão e suporte em todos os momentos. O apoio de vocês foi fundamental para que eu pudesse enfrentar os desafios e perseverar até a conclusão deste trabalho.

Ao Laboratório de Geoprocessamento (LABGEO), por fornecer suporte técnico e estrutural essencial para o desenvolvimento deste projeto. O ambiente de pesquisa e as discussões enriquecedoras foram cruciais para o aprimoramento deste estudo.

Ao meu orientador, pela paciência, dedicação e orientação ao longo de todo o processo. Sua expertise e disponibilidade para esclarecer dúvidas foram indispensáveis para a concretização deste trabalho.

Agradeço, ainda, à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), pelo financiamento e incentivo à pesquisa, permitindo que este estudo fosse conduzido com os recursos necessários para sua realização.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada acadêmica, meus mais sinceros agradecimentos.

Resumo

Os fragmentos florestais urbanos desempenham um papel crucial ao fornecer serviços ecossistêmicos, sendo fundamental avaliar seu estado de conservação para embasar ações de gestão ambiental. Este estudo propõe uma metodologia para avaliar a conservação de fragmentos urbanos utilizando análise multicritério espacial. O processo foi dividido em três fases: (1) definição e hierarquização das variáveis; (2) modelagem espacial dessas variáveis; e (3) aplicação do método, simulação de cenários e interpretação dos resultados. Foram definidos 14 critérios importantes para a conservação, sendo os “tamanho de área e conectividade” os mais influentes nos resultados. A análise revelou variações entre e dentro dos fragmentos estudados e efeito de mudanças de critérios, destacando a pertinência do método para avaliar o estado de conservação. A metodologia pode ser aplicada em políticas de gestão e restauração de fragmentos florestais urbanos, oferecendo subsídios para a tomada de decisão.

Palavras-chave: Análise Espacial Multicritério. Conservação. Florestas Urbanas. AHP - Processo de Hierarquia Analítica. Modelagem Espacial.

Abstract

Urban forest fragments play a crucial role in providing ecosystem services, and it is essential to assess their conservation status to support environmental management actions. This study proposes a methodology to evaluate the conservation of urban fragments using spatial multicriteria analysis. The process was divided into three phases: (1) definition and hierarchy of variables; (2) spatial modeling of these variables; and (3) application of the method, simulation of scenarios and interpretation of results. 14 important criteria for conservation were defined, with “area size and connectivity” being the most influential in the results. The analysis revealed variations between and within the fragments studied and the effect of changes in criteria, highlighting the relevance of the method for evaluating the state of conservation. The methodology can be applied to management and restoration policies for urban forest fragments, offering support for decision-making.

Keywords: Multicriteria Spatial Analysis. Conservation. Urban Forests. AHP - Analytic Hierarchy Process. Spatial Modeling.

Lista de Figuras

Figura 1 – Área de estudo	23
Figura 2 – Fluxograma metodológico	24
Figura 3 - Procedimentos espaciais realizados no software Qgis.....	35
Figura 4 - Exemplo de reclassificação por tabela	36
Figura 5 - Hierarquização dos critérios	39
Figura 6 - Valores de conservação, a partir da metodologia proposta, para os fragmentos da cidade de Manaus – AM	41
Figura 7 -Variação dos valores de conservação dentro dos fragmentos florestais do bairro do Coroadó, zona centro-leste	42
Figura 8 - Porcentagem de área (ha) por classe de valor para os diferentes cenários.....	44
Figura 9 - Simulação dos diferentes cenários de mudanças	45

Lista de Quadros

Quadro 1 - Escala de importância AHP	26
Quadro 2 - Critérios e respectivos motivos para escolha	27
Quadro 3 - Padronização dos critérios	29
Quadro 4 - Fonte de obtenção e procedimentos realizados nos dados	31

Lista de siglas

AHP	Processo de Hierarquia Analítica
ADMC	Análise de Decisão Multicritério
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
AMCE	Análise Multicritério Espacial
APP	Área de Preservação Permanente
SIG	Sistema de Informação Geográfica
CR	Índice de Consistência
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
IDW	Método de distância inversa ponderada
SUFRAMA	Superintendência da Zona Franca de Manaus

Sumário

1 Introdução.....	11
2 Objetivo	13
2.1 Objetivo Geral.....	13
2.2 Objetivos Específicos	13
3 Revisão de Literatura	13
3.1 Fragmentos florestais.....	13
3.2 Análise multicritério espacial e modelagem espacial.....	18
3.3 Simulação de cenários	21
5 Metodologia	22
5.1 Definição e hierarquização.....	25
5.2 Modelagem espacial	34
5.3 Simulações	37
6 Resultados e discussão.....	38
6.1 Definição e hierarquização dos critérios	38
6.2 Modelagem espacial	40
6.3 Simulações	43
6.4 Considerações sobre o método.....	45
7 Conclusão	46
Referências	47

1 Introdução

Fragmentos florestais são áreas de vegetação que permanecem cercadas por paisagens dominadas por atividades humanas, como agricultura, urbanização ou pastagem. Eles representam remanescentes de ecossistemas florestais que foram parcialmente preservados em meio à degradação ou perda de habitat, podendo variar em tamanho, forma e composição, compartilhando a característica de serem pedaços isolados de vegetação natural em meio a uma matriz modificada pelo Homem (Gardner et al., 2009).

São caracterizados pela presença de plantas e animais nativos, os quais formam um ecossistema com certa independência em relação ao ambiente circundante (Bierregaard et al., 2001). Esses fragmentos são definidos por sua extensão, tamanho e conexões com outras áreas florestadas, podendo variar desde pequenos até grandes remanescentes florestais. Esses locais podem incluir matas ciliares, fragmentos de floresta primária ou secundária e outras formas de vegetação nativa que foram preservados ou recuperados (Haddad et al., 2015). Ao passo que as populações humanas e as áreas urbanas continuam a expandir-se globalmente, as florestas presentes em cidades tornam-se cada vez mais importantes para o bem-estar dos residentes das áreas urbanas (Mitchell e Devisscher, 2022).

Esses ambientes possuem processos intrínsecos que afetam diretamente e indiretamente a sociedade, fornecendo, assim, serviços ecossistêmicos. De acordo com Constanza et al. (2014), estes serviços correspondem aos benefícios obtidos a partir dos ecossistemas e podem ser classificados em quatro categorias principais. A primeira categoria inclui os serviços de regulação, como a melhoria da qualidade do ar (Escobedo et al., 2011) e a regulação do clima e microclima (Kabisch et al., 2015). A segunda categoria abrange os serviços de suporte, como a preservação da biodiversidade (Fahrig, 2017). A terceira categoria é composta por serviços culturais, que englobam o valor estético e cultural dos ecossistemas (Escobedo et al., 2019), além de contribuírem para a saúde e o bem-estar humano (Twohig-Bennett e Jones, 2018). Por fim, a quarta categoria envolve os serviços de provisão, que incluem o fornecimento de recursos como madeira (Turner et al., 2016).

A avaliação precisa do estado de conservação destes habitats torna-se imprescindível para assegurar a perpetuação da sustentabilidade ambiental. Ao quantificar seu estado atual e possíveis ameaças futuras podem-se embasar

mecanismos de gestão subsidiando proteção ambiental, equidade e justiça social (Balmford et al., 2011; Grimm et al., 2008). Nesse viés algo fundamental para analisar tal aspecto é a necessidade de se trabalhar com fatores ou critérios a serem avaliados, o que torna necessário definir quais são os que influenciam na manutenção dos fragmentos florestais na paisagem. Além disso, dentre eles, se pensarmos nos critérios como ponto de partida, podemos obter informações de forma efetiva, pois, uma definição inequívoca de critérios nos fornece uma base consistente para a avaliação, garantindo que o processo seja transparente e replicável. Isso é essencial para garantir a confiabilidade dos resultados e eventual extrapolação (Valente et al., 2021). A definição de critérios executáveis também facilita a comunicação entre os diferentes atores envolvidos no processo de avaliação como: investigador, tomador de decisão e parte interessada. Isso ajuda a evitar ambiguidades e divergências na interpretação dos resultados, promovendo uma compreensão comum e uma base sólida para a tomada de decisões (Nunes e van den Bergh, 2001).

As tomadas de decisão que envolvem o meio ambiente são complexas por natureza e envolvem conhecimentos multidisciplinares, a análise de decisão multicritério (ADMC) surge como uma alternativa para auxílio na tomada de decisões. Para Belton e Stewart (2002) ela consiste em uma coleção de abordagens formais que procuram levar explicitamente em conta múltiplos critérios para ajudar indivíduos ou grupos a explorar decisões importantes, tem sido aplicada a uma gama de situações de gestão de recursos naturais (Mendoza e Martins, 2006), no setor florestal já é utilizada em estudos como avaliação de incêndios florestais (Nikhil et al., 2021, Kant et al., 2012), avaliação de saúde de ecossistemas (Sun et al., 2017) e na quantificação do valor dos serviços ecossistêmicos de uma forma não monetária (Ananda e Herath, 2009).

Nesse contexto de ADMC, abordagens híbridas que utilizam técnicas como AHP (Processo de Hierarquia Analítica) desenvolvida por Saaty (1980), avaliação de especialistas (Hsu e Sandford, 2019) e sistemas de informações geográficas, surgem como uma alternativa, por serem abordagens que fornecem uma acumulação sinérgica de insights proveniente de diferentes métodos para a tomada de decisão (Ananda e Herath, 2009).

Portanto, o presente estudo visa propor uma metodologia para analisar o conjunto de fragmentos florestais urbanos considerando, majoritariamente, o valor associado à conservação destes espaços e as nuances da obtenção de dados para

tal finalidade. Para isso foi realizado estudo de caso na cidade de Manaus - AM, capital do estado do Amazonas, Norte do Brasil.

2 Objetivo

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver modelagem multicritério para avaliar o estado de conservação de fragmentos florestais urbanos na Amazônia.

2.2 Objetivos Específicos

Definir e hierarquizar critérios que influenciam na conservação de fragmentos florestais urbanos;

Criar um modelo espacial que relaciona critérios com a conservação dos fragmentos e conseqüentemente a sua manutenção na paisagem;

Simular diferentes cenários futuros de mudança nos critérios influenciadores.

3 Revisão de Literatura

3.1 Fragmentos florestais

Primariamente ao conceito de fragmentos florestais é de suma importância definirmos o que se entende por florestas a nível nacional e internacional, para a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura - FAO floresta é: "Área medindo mais de 0,5 hectares com árvores maiores que 5 metros de altura e cobertura de copa superior a 10%, ou árvores capazes de alcançar estes parâmetros in situ. Isso não inclui terra que está predominantemente sob uso agrícola ou urbano". Já a UNFCCC (Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas), embora apresente uma definição consoante, aborda o conceito de florestas sob a perspectiva das mudanças climáticas onde: "Floresta é uma área mínima de terra de 0,05-1,0 hectare com cobertura arbórea (ou densidade equivalente) superior a 10-30%, contendo árvores com capacidade potencial para atingir uma altura mínima de

2-5 metros na maturidade in situ" (UNFCCC, 2014). A nível de nacional o Serviço Florestal Brasileiro, em suas atividades de pesquisa e na elaboração de relatórios sobre os recursos florestais do Brasil, tem adotado como floresta as tipologias de vegetação lenhosa que mais se assemelham à definição de florestas proposta pela FAO. Porém, quando se trata de áreas urbanas a FAO traz uma outra definição, considerando florestas urbanas todas as florestas, grupos de árvores e árvores individuais localizadas em áreas urbanas e periurbanas; eles incluem, portanto, florestas, árvores de rua, árvores de parques e jardins e árvores em locais abandonados (FAO, 2016). Essa última definição, corrobora com o dito por Chazdon et al. (2016), onde ele afirma que ao adotar um limite excludente de 0,5 hectare, desconsideram-se extensas áreas que englobam pequenos fragmentos florestais, resultando em subestimação da efetiva cobertura arbórea (Nduwamungu et al., 2013; Ribeiro et al., 2009). Isso inclui pequenos fragmentos arbóreos, bem como árvores isoladas remanescentes, que podem apresentar elevado valor ecológico e de conservação (Solar et al., 2015) e desempenhar um papel crucial na promoção da conectividade da paisagem, na preservação da biodiversidade local (Manning et al., 2006) e no sustento das comunidades locais (Ndayambaje et al., 2013).

Nesse sentido, fragmentos florestais representam unidades de florestas naturais outrora contínuas, interrompidas por barreiras naturais, como lagos, rios, tipos de solo, presença de rochas, outros tipos de vegetação natural, ou por barreiras antrópicas, como culturas agrícolas, estradas e cidades, capazes de reduzir significativamente o fluxo de animais, pólen e sementes (Viana, 1990). Metzger (2003) acrescenta ainda que a fragmentação, caracterizada pela ruptura de uma unidade da paisagem, resulta no surgimento de parcelas menores com dinâmicas diferentes das existentes no ambiente original. Essas parcelas tornam-se áreas desconectadas do funcionamento biológico da paisagem original, funcionando como verdadeiras "ilhas de diversidade" cercadas por áreas não florestadas (Dias et al., 2000; Debinsk e Holt, 2000; Gardner et al, 2009).

No recorte de fragmentos florestais em áreas urbanas nota-se que desempenham um papel vital na promoção da biodiversidade, melhoria da qualidade do ar, regulação térmica e na saúde física e mental das comunidades urbanas. Essas remanescentes áreas de vegetação contribuem significativamente para a conectividade da paisagem, facilitando o deslocamento de espécies, mantendo fluxos gênicos e aumentando a resiliência dos ecossistemas urbanos diante de mudanças

ambientais (McDonnell et al., 2009). Além disso, fragmentos florestais urbanos são cruciais para a promoção do bem-estar humano, proporcionando espaços verdes acessíveis para atividades recreativas, redução do estresse e melhoria da qualidade de vida (Bratman et al., 2019; Dallimer et al., 2011). A preservação e gestão adequada desses fragmentos são primordiais para garantir os benefícios ecológicos e sociais que eles oferecem em um contexto urbano em constante transformação.

Analisar os principais fatores que afetam a dinâmica desses ambientes se faz pertinente, Viana e Pinheiro (1998) citam esses como os principais:

- **Tamanho:** A correlação entre a extensão territorial dos fragmentos e suas características ecológicas, notadamente a diversidade de espécies, constitui um componente fundamental na fundamentação teórica da biogeografia de ilhas (MacArthur e Wilson, 2001). Laurence et al., (2011) corroboram acrescentando que em certos conjuntos de espécies, fragmentos de menor dimensão frequentemente não conseguem manter populações viáveis, ao passo que o tamanho do fragmento também desempenha um papel crucial na taxa de perda de espécies, sendo que fragmentos menores tendem a perder espécies de forma mais acelerada. A classificação dos tamanhos varia de acordo com a fonte, para Pirovani et al., (2014) fragmentos pequenos são os menores que 05 ha, médios de 05 a 50 ha e grandes acima de 50 ha, já para Viana e Pinheiro (1998) os pequenos são os abaixo de 10 ha e os grandes os acima de 40 ha ficando os médios no intervalo entre os dois.
- **Forma:** A forma de um fragmento está diretamente relacionada com o tamanho e disposição de sua borda, fator esse que está entre os mais importantes impulsionadores da mudança ecológica nos fragmentos (Laurence et al., 2011), por interferirem no aumento do estresse de dessecação, cisalhamento e turbulência do vento, ocasionando mudança na germinação, mortalidade, hidrografia e composição de espécies do fragmento (Laurance et al., 1997; Laurance et al., 1998a; Uriarte et al., 2010) ressalta-se ainda que o efeito de bordas é cumulativo duas ou mais bordas próximas criam efeitos de borda mais severos do que apenas uma, e que a idade da borda, a estrutura e a vegetação adjacente influenciam nos seus efeitos (Laurence et al., 2011). Quanto a distância de penetração desse fenômeno é variável, a depender do efeito variando de 10 a 300 metros (Laurence et al., 2011), 50 metros (Viana e Pinheiro, 1998) e 70 metros (Blumenfeld et al., 2016).

- Grau de isolamento: A condição de isolamento pode resultar na diminuição ou até mesmo na eliminação da colonização por espécies presentes em áreas adjacentes, assim como no restringimento do fluxo gênico e na limitação do acesso das espécies aos recursos localizados fora do habitat fragmentado. Portanto, fatores como o tamanho de cada área remanescente, o tempo de isolamento e o grau de conectividade entre elas, que inclui a distância entre áreas remanescentes e o tipo de ambiente circundante, emergem como determinantes significativos que influenciam a resposta de longo prazo das espécies à fragmentação (Pires et al., 2006; Viana e Pinheiro, 1998), Almeida (2008) classificou como de baixo, médio, alto e muito alto isolamento, as distâncias de 60, 120, 200 e >200 metros respectivamente.
- Tipo de vizinhança: Conforme apontado por Lindenmayer e Ficher (2013), o determinante preponderante na expressão dos efeitos de borda é a intensidade de contraste com a tipologia circundante; quanto mais destacada a matriz na qual o fragmento se encontra inserido, mais pronunciados são os efeitos de borda.

Não obstante, algumas características comumente utilizadas para análises ambientais de modo geral também podem ser aplicadas em fragmentos florestais como:

- Biomassa: A biomassa representa a quantidade total de matéria orgânica presente nas árvores, plantas e outros componentes vivos da floresta. A medição da biomassa fornece informações cruciais sobre a saúde, produtividade e capacidade de sequestro de carbono da floresta, sendo uma ferramenta essencial para a gestão ambiental e a tomada de decisões relacionadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais (Houghton e Lawrence, 1999; Chave et al., 2014). Há diversas formas de se obter esse parâmetro, desde métodos diretos a indiretos (Asner et al., 2014). Para a Amazônia, os valores médios de biomassa variam na faixa de 250-350 Mg.ha⁻¹ (de Oliveira Piva et al., 2021).
- Biodiversidade: Conforme enfatizado por Loreau et al. (2001), a biodiversidade de espécies tem influência em processos ecossistêmicos como a produtividade, a decomposição de matéria orgânica, a ciclagem de nutrientes e a estabilidade do ecossistema. Podendo ser também um indicativo da resiliência de um fragmento florestal diante de perturbações naturais ou

causadas pelo Homem. Ecossistemas com maior biodiversidade tendem a ser mais resilientes a mudanças ambientais e têm maior probabilidade de se recuperar de distúrbios, como incêndios florestais ou doenças (Cardinale et al., 2012; Haddad et al., 2015).

- Topografia: As características do relevo condicionam os fluxos de materiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes) e energia na paisagem (Moore et al., 1991). Essas características controlam a variabilidade espacial da umidade do terreno (Moore, 1988), das características dos solos, do processo erosivo e da degradação do solo e da água (Moore e Burch, 1986a). Tais características podem ser avaliadas por um número significativo de índices topográficos que são úteis para identificar a susceptibilidade ao dano e que podem ser estimados usando técnicas de análise digital do terreno (Minella e Merten, 2012).
- Qualidade do ar: Aqui definida pela concentração de MP2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Evidencia a eficiência do fragmento em filtrar impurezas atmosféricas, absorvendo partículas poluidoras suspensas (Escobedo et al., 2011).
- Densidade de drenagem: O sistema de drenagem compreende o rio principal e seus afluentes, cujo estudo revela a rapidez com que a água é evacuada da bacia hidrográfica. Esse índice representa um indicador do nível de desenvolvimento do sistema de drenagem, fornecendo uma avaliação da eficácia na remoção de água da bacia. Tal eficiência é expressa pela relação entre a soma dos comprimentos de todos os canais da rede — independentemente de serem perenes, intermitentes ou temporários — e a área total da bacia (Horton, 1932; Cardoso et al., 2006).
- Densidade demográfica: É uma medida expressa pela relação entre a população e a superfície do território em habitantes por unidade de área. Quando analisada para o entorno de uma área natural, pode-se dizer que tem influência na intensidade do impacto e da pressão exercida pelas atividades humanas sobre um ecossistema. Pois, as atitudes comportamentais do Homem, desde que ele se tornou parte dominante dos sistemas, têm uma tendência em sentido contrário à manutenção do equilíbrio ambiental. Ele esbanja energia e desestabiliza as condições de equilíbrio pelo aumento de sua densidade populacional, além da capacidade de tolerância da natureza, e de suas exigências individuais (Moraes e Jordão, 2002).

- Umidade: Sua alteração influencia na saúde das plantas, a biodiversidade e o ciclo hidrológico. Níveis adequados de umidade ajudam a mitigar estresses climáticos, controlam incêndios e mantêm um microclima estável, essencial para a flora e fauna (Magnago et al., 2017).
- Temperatura: Influencia, causando estresse térmico em plantas e animais, alterando microclimas e afetando ciclos de vida e composição de espécies. Altas temperaturas podem acelerar a degradação dos fragmentos florestais, aumentando a vulnerabilidade a incêndios, pragas e doenças (Long e Frank, 2019).
- Geomorfologia: Os dados geomorfológicos são essenciais para análises integradas do meio. Eles permitem identificar as unidades geomorfológicas, descrevendo tipos e formas de relevo, padrões de drenagem, altimetria, declividade, processos de erosão e acumulação, além das fragilidades e potencialidades de uma área específica (Bergamo e Almeida, 2006).

3.2 Análise multicritério espacial e modelagem espacial

As tomadas de decisão que envolvem o meio ambiente são complexas por natureza e envolvem conhecimentos multidisciplinares. Para avaliar questões ambientais, em geral utilizam-se testes experimentais, analistas experientes, modelos computacionais e ferramentas de automação e controle de critérios. No entanto, a aplicação dessas ferramentas enfrenta desafios devido à presença de alguns gargalos: ausência de informações disponíveis publicamente, evidências conflitantes sobre áreas afins e diferentes bagagens de conhecimento dos aplicadores. Portanto, integrar informações heterogêneas e incertas requer uma estrutura organizacional e julgamento especializado (Hwang et al., 2012).

A análise de decisão multicritério (ADMC) se apresenta como uma metodologia capaz de sintetizar considerações heterogêneas durante o processo de tomada de decisão. O termo ADCMC engloba diversas estruturas e métodos analíticos que visam integrar informações quantitativas e qualitativas, bem como contribuições e preferências das partes interessadas, mesmo quando estas são limitadas ou divergentes (Belton e Stewart, 2002). O objetivo central da ADCMC é fornecer uma abordagem abrangente e sistemática para avaliar e comparar alternativas de projeto,

levando em consideração múltiplos critérios e perspectivas, resultando em uma decisão mais informada e alinhada com os interesses das partes envolvidas (Cegan et al., 2017).

No ambiente florestal a análise multicritério comumente está associada a sistemas de informação geográfica (SIG). Dados e análises espaciais são inerentemente de natureza multicritério (Chakhar e Mousseau, 2007). A denominação de Análise Multicritério Espacial (AMCE) é descrita como um processo que converte e integra informações geográficas (dados de entrada) e preferências de tomadores de decisão para gerar “mapas de decisão” (dados de saída) (da Silva, 2020). Um aspecto crucial da AMCE reside na avaliação de alternativas de decisão, as quais são geograficamente definidas com base em valores de critérios (ou atributos) e nas preferências dos tomadores de decisão. Essa abordagem implica que os resultados das análises dependem não apenas dos modelos espaciais das alternativas, mas também dos valores dos julgamentos incorporados nos processos decisórios (Malczewski e Rinner, 2015).

As regras de decisão são métodos que possibilitam a combinação dos critérios de análise e das preferências dos decisores para determinar valores de desempenho. Esses valores, por sua vez, viabilizam a geração, avaliação e ordenação de um conjunto de alternativas de solução. Uma abordagem comum em ADMCs é calcular a pontuação total de uma alternativa como uma soma ponderada de suas pontuações em vários critérios, expressa por $V = \sum w_i x_{ij}$, onde $\sum w_i = 1$. Estruturas hierárquicas também são frequentes, dividindo dimensões em subdimensões (Linkov et al., 2006). E dentro dessas linhas de abordagem derivam diversos métodos a ver abaixo.

- Teoria da Utilidade Multiatributos: Introduzida por Keeney e Raiffa, aprimora o modelo, transformando pontuações em funções de utilidade, seguindo os axiomas de von Neumann e Morgenstern. A MAUT facilita escolhas racionais quando há um único tomador de decisão que pode expressar preferências claras, alinhando-se com os axiomas da teoria da decisão (Keeney e Raiffa, 1993).
- PROMETHEE e ELECTRE: essas abordagens envolvem votos entre dimensões, considerando diferentes pontuações para alternativas em cada dimensão. Pesos são então aplicados para derivar uma atratividade global, representando níveis de concordância ou confiança. Esses métodos, ao

contrário de MAUT, buscam orientar processos deliberativos entre partes interessadas (Huang et al., 2011).

- Processo de Hierarquia Analítica (AHP): desenvolvido por Saaty (1980), e seus desdobramentos, empregam comparações de pares de critérios para determinar importâncias relativas, adaptando-se bem a cenários com múltiplos intervenientes, suas etapas consistem na estruturação hierárquica do problema em diferentes níveis: objetivo, critérios, subcritérios (se necessário) e alternativas, seguida da realização de comparações pareadas entre os elementos de cada nível, atribuindo pesos relativos com base em uma escala de julgamento. Esses pesos representam a importância relativa de cada elemento em relação ao objetivo principal. Por meio de cálculos matriciais, o AHP permite obter uma ordenação das alternativas segundo sua prioridade, facilitando a tomada de decisão de forma racional, transparente e consistente, mesmo em contextos com subjetividade e múltiplos interesses envolvidos. Ishizaka e Lusti (2006) destacam a aplicação de álgebra matricial para lidar com entradas incompletas ou inconsistentes, produzindo pesos, pontuações gerais e medidas de consistência.
- Métodos TOPSIS: proposta por Hwang et al., 1981, compara alternativas identificando pesos, normalizando pontuações e calculando distâncias ponderadas em relação à alternativa ideal e a alternativa ideal negativa. Essa abordagem proporciona benefícios, exigindo apenas julgamentos sobre pesos e garantindo compensações mais suaves devido à relação não linear entre pontuações de dimensão única e proporções de distância.

No contexto de florestas e fragmentos florestais a análise multicritério já é bastante estabelecida, onde pela natureza dos estudos ambientais que em sua maioria possuem dimensões espaciais, o emprego de métodos híbridos também é algo recorrente, no qual se utiliza do apoio de outras técnicas de tomada de decisão baseadas em SIG e avaliações qualitativas para apoiar a análise (Uhde et al., 2015), como no trabalho de Cavalcante et al., 2010 que analisou a vulnerabilidade ambiental de um fragmento florestal urbano na Amazônia por meio da a técnica de suporte à decisão AHP integrando dados de diversas fontes em ambiente SIG, assim como Takikawa et al., 2021 que integrou o Índice de Circularidade, o Índice de Efeito de Borda e o Índice de Qualidade Biofísica do Fragmento também por meio do AHP para propor uma metodologia para elaboração de um indicador de fragilidade

ambiental para fragmentos florestais. Uribe et al (2014) em seu estudo para identificar prioridades de restauração da paisagem florestal, integrou técnicas baseadas em SIG e entrevistas a partes interessadas em sua análise, onde as preferências desses grupos foram modeladas espacialmente para identificar suas prioridades e o resultado final foi um mapa que identifica os locais preferidos para restauração. Já Sartori, 2010 usou da Técnica Participatória e o Processo Hierárquico Analítico, no próprio SIG para definir áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais.

3.3 Simulação de cenários

Dentro da análise de decisão, os cenários são geralmente associados a incertezas futuras (Stewart e Rios, 2013) definição que está sendo aplicada neste trabalho. A simulação de cenários pode ser utilizada para explorar como diferentes incertezas podem se desenrolar, ou seja, para explorar uma gama de resultados possíveis, isso se aplica a várias áreas como mudança de uso do solo (Sadooghi e Abolhasani, 2022), eficiência energética (Witt e Geldermann, 2020) e risco ecológico de paisagem (Cao et al., 2019).

Outrossim, para que possam ocorrer simulações de cenários, devem ser aplicados modelos. Segundo Lambin (1994), para se modelar um fenômeno deve-se responder a três questões principais. Primeiramente, é necessário identificar quais variáveis ambientais e culturais estão voltadas para a explicação das tendências, bem como compreender os processos ecológicos e socioeconômicos que estão por trás dele. Em seguida, é fundamental analisar como o processo evolui ao longo do tempo, observando suas dinâmicas e mudanças. Por fim, é importante determinar onde as ocorrências ocorrem, localizando os espaços específicos em que eles se manifestam.

De acordo com Pedrosa e Câmara (2004) os modelos se subdividem em empíricos e de sistemas, onde os empíricos em sua dimensão procedural, possuem três componentes chaves: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída. Dentre eles podemos citar os modelos de cadeia, logísticos de difusão e de regressão (Magalhães e Medronho, 2017; Souza et al., 2018) . Já os modelos de sistema procuram descrever o sistema como um todo, ou seja, tentar representar as interações entre todos os seus componentes. Uma característica chave desses modelos é a eficiência na abordagem da dimensão espacial, implementando conceitos como as relações de situações e apoiando o uso combinado de múltiplas

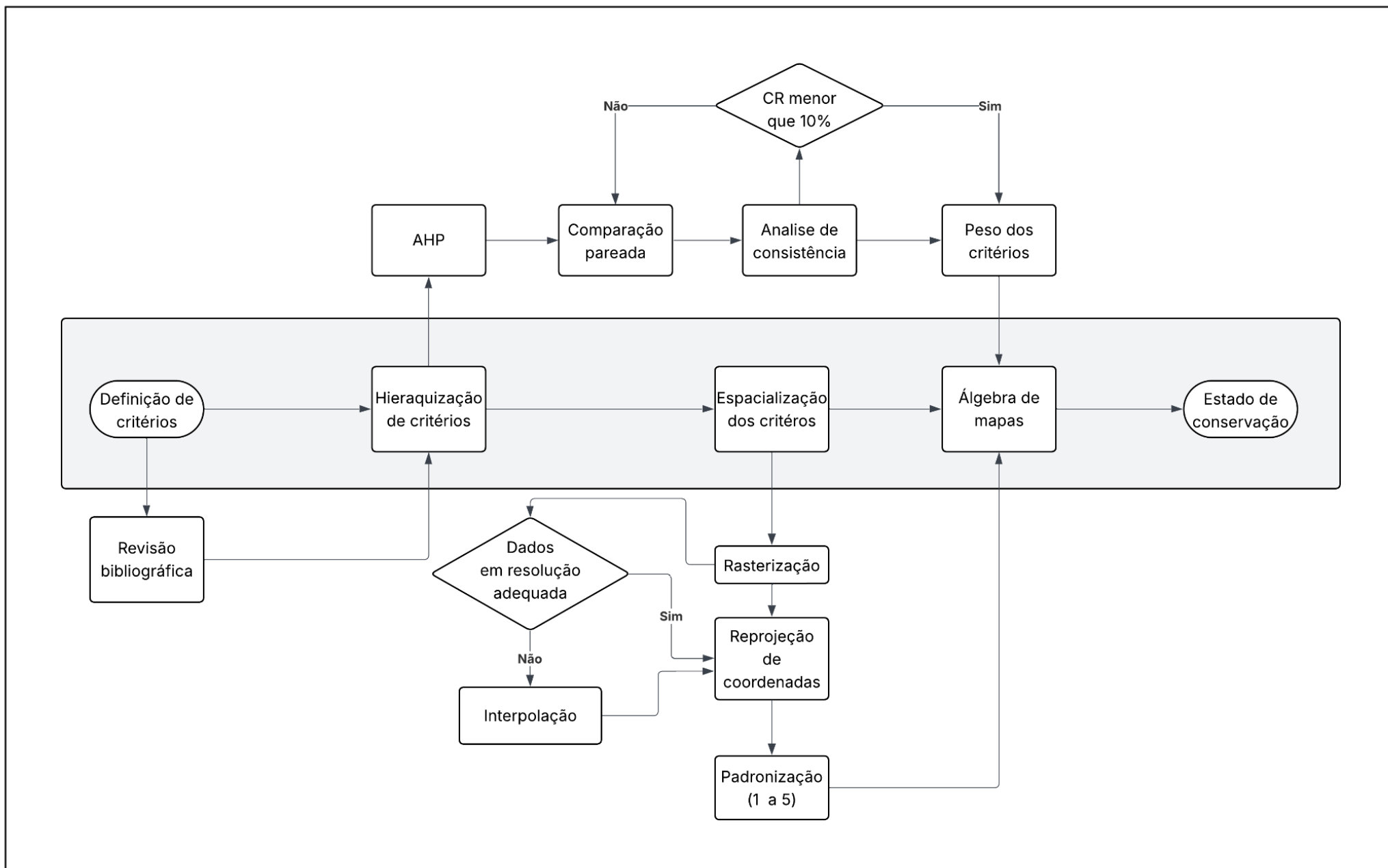
escalas (Trentim e Freitas 2010). Dentre eles se encontram os modelos de simulação e os dinâmicos (Kawashima et al., 2016)..

Zhang et al. (2022), por exemplo, simularam as mudanças no uso da terra na área de estudo para o ano de 2040, considerando quatro cenários: desenvolvimento natural, proteção de terras cultivadas, proteção ecológica e desenvolvimento urbano. Já Roriz et al. (2017) realizou simulações para o município de Boca do Acre, estado do Amazonas, Brasil, projetando até o ano de 2025. O estudo considerou um cenário de linha de base que refletia o comportamento histórico, caracterizado pelo descumprimento do Código Florestal, enquanto dois outros cenários avaliaram o cumprimento integral do antigo Código Florestal (Lei 4.771/1965) e do atual Código (Lei 12.651/2012), no que diz respeito à proteção das Áreas de Preservação Permanente (APPs) ao longo das margens dos cursos d'água. Adams et al. (2019) utilizaram um modelo de autômato celular para simular as mudanças na cobertura florestal na região da Floresta do Norte, no período de 2015 a 2075. O modelo foi parametrizado com base em tendências históricas observadas entre 1985 e 2015, correlacionando variáveis espaciais por meio de Pesos Bayesianos de Evidência.

Sendo assim, dada a variedade de formas de representação disponíveis, não há uma solução única para modelar fenômenos espaciais. Uma solução ideal deve ser desenvolvida considerando o porquê, o onde e o quando de cada especificidade, integrando as escalas temporais e espaciais com o modelo matemático apropriado (Pedrosa e Câmara, 2004).

5 Metodologia

Para a realização do estudo no contexto de fragmentos florestais foram seguidas algumas etapas, inicialmente foi realizado um levantamento de literatura para a definição de critérios e variáveis envolvidos no processo, com posterior hierarquização das variáveis tidas como importantes; Na sequência, foi executado o processo de modelagem espacial dessas variáveis, utilizando-se de ferramentas SIG; Ao final, foi proposta a aplicação do método propriamente dito, simulações de cenários e interpretação e discussão dos resultados para com relação a área urbana e periurbana de Manaus (Figura 1), capital do Estado do Amazonas e com histórico de ausência de planejamento urbano. Manaus é a capital mais populosa da Amazônia



Fonte: O autor (2024).

5.1 Definição e hierarquização

Uma abordagem híbrida foi adotada para definir e hierarquizar critérios considerados de importância. Esse tipo de abordagem tem sido desenvolvido para integrar métodos quantitativos e qualitativos em tomadas de decisões (Myllyviita et al., 2011). Enquanto os métodos qualitativos, como revisões, entrevistas e votações, têm se mostrado úteis na estruturação de problemas, na formulação de objetivos preliminares e na melhoria do entendimento das partes interessadas (Pykäläinen et al., 2007; Hjortsø, 2004; Khadka et al., 2013), os métodos quantitativos, como ADMC, são valiosos para avaliar alternativas de decisão usando informações numéricas (Myllyviita et al., 2011). Essa abordagem integrada permite uma tomada de decisão mais abrangente e informada, aproveitando as vantagens de ambas (Udhe et al., 2015).

A escolha dos critérios seguiu o princípio da importância dos mesmos para a conservação de fragmentos florestais urbanos na paisagem, assim como a disponibilidade de dados sobre eles. Feito isso, o método opinião de especialistas (Denzin et al., 2023) é utilizado, ele envolve a coleta e análise de informações e perspectivas fornecidas por indivíduos qualificados e experientes em seus respectivos campos de conhecimento relacionados às florestas. Essa técnica consiste em uma abordagem amplamente utilizada para a obtenção de informações e tomada de decisões em diversos campos. Para o presente estudo visando facilitar a posterior aplicação do método de hierarquização e evitar dubiedade na interpretação das opiniões a coleta de dados é efetuada diretamente dentro da metodologia que se pretende utilizar, em nosso caso a plataforma online desenvolvida por (Goepel, 2018) foi escolhida, onde é possível aplicar o método AHP, desenvolvido por Saaty (1980).

As etapas da AHP são as seguintes: a) Alimentação dos parâmetros: Nesta etapa, os critérios são inseridos no programa de modo que uma hierarquia seja definida e armazenada no banco de dados, para a partir daí os pesos serem calculados. b) Comparação em pares: Os critérios e subcritérios são comparados em pares, usando uma escala de preferência variando de 1 a 9 (Quadro 1). Os julgamentos foram feitos pelos especialistas constituídos por um grupo de 11

profissionais variando nas especialidades Ecologia florestal, Tecnologia de produtos florestais, Contenção de queimadas, Tecnologia da madeira, Conservação da vida silvestre, Ecologia da conservação da biodiversidade, Manejo de áreas protegidas e Fauna e Ciências florestais em geral. Todos foram acompanhados pelo pesquisador, onde também foram retirados insights e justificativas para a análise de cada profissional.

A comparação em pares gerou uma matriz, que reflete as preferências relativas entre os critérios. Como resultado obtemos um ranqueamento de prioridade local com pesos para cada critério variando de 0 a 1, nos fornecendo uma medida da importância relativa de cada critério em relação aos outros.

Quadro 1 - Escala de importância AHP

Escala	Avaliação
1	Importância igual
3	Importância moderada
5	Importância forte
7	Importância muito forte
9	Importância extrema
2, 4, 6, 8	Valores intermediários

Fonte: Goepel (2018).

c) Consistência da matriz: É feita uma verificação da consistência das comparações em pares por meio do cálculo do índice de consistência. A consistência é importante para garantir a confiabilidade dos resultados observando se as respostas foram incongruentes ou não. Para o cálculo é utilizado o ajuste linear proposto por Alonso e Lamata (2006) para calcular o índice de consistência CR onde segundo Saaty (2003) a condição de consistência dos julgamentos é $CR \leq 0,10$, ou seja, um nível de até 10% de incongruência é o aceitável, maior que isso recomendou-se que fosse efetuado uma nova aplicação da comparação pareada.

As etapas acima são aplicadas iterativamente, permitindo a revisão e ajuste das comparações em pares e dos pesos atribuídos aos critérios. Essa interação pode ocorrer até que um consenso seja alcançado ou até que os resultados sejam considerados satisfatórios pelo investigador.

Assim, foi sistematizada a definição dos critérios (Quadro 2), resumindo-se os motivos da escolha dos mesmos. A escolha da métrica ou unidade para classificar e padronizar os critérios (Quadro 3) foi embasada na facilidade de estratificação e

adaptabilidade da métrica aos dados, isso principalmente para os critérios referentes às métricas de paisagem como, forma e conectividade que possuem mais de uma métrica para serem representados. A partir da definição dos critérios, foram definidas fontes e forma de obtenção, além dos procedimentos técnicos para adequação à análise (Quadro 4).

Quadro 2. Critérios e respectivos motivos para escolha

Critério	Motivo da escolha
Densidade Demográfica do Entorno	É uma medida expressa pela relação entre a população e a superfície do território em habitantes por unidade de área. Quando analisada para o entorno de uma área natural, pode-se dizer que tem influência na intensidade do impacto e da pressão exercida pelas atividades humanas sobre um ecossistema (Moraes e Jordão, 2002)
Uso do Solo no Entorno	Conforme apontado por Ficher e Lindenmayer (2007), o determinante preponderante na expressão dos efeitos de borda é a intensidade de contraste com a tipologia circundante; quanto mais destacada a matriz na qual o fragmento se encontra inserido, mais pronunciados são os efeitos de borda
Densidade de Drenagem	Esse índice representa um indicador do nível de desenvolvimento do sistema de drenagem, fornecendo uma avaliação da eficácia na remoção de água da bacia. Tal eficiência é expressa pela relação entre a soma dos comprimentos de todos os canais da rede independentemente de serem perenes, intermitentes ou temporários e a área total da bacia (Horton, 1932; Cardoso et al., 2006)
Declividade	As características do relevo condicionam os fluxos de materiais (água, nutrientes, sedimentos e contaminantes) e energia na paisagem. Essas características controlam a variabilidade espacial da umidade do terreno, das características dos solos, do processo erosivo e da degradação do solo e da água (Moore, 1988)

Geomorfologia	Os dados geomorfológicos são essenciais para análises integradas do meio. Eles permitem identificar as unidades geomorfológicas, descrevendo tipos e formas de relevo, padrões de drenagem, altimetria, declividade, processos de erosão e acumulação, além das fragilidades e potencialidades de uma área específica (Bergamo e Almeida, 2006)
Solos	A classe de solo é crucial para a análise de fragilidade ambiental pois influencia a suscetibilidade à erosão, a capacidade de retenção de água, a disponibilidade de nutrientes, o suporte às raízes e a interação com o ambiente urbano. Conhecer o tipo de solo e sua composição ajuda a avaliar a vulnerabilidade das áreas e a planejar estratégias de conservação e manejo eficazes (Crepani, 2001; Simonetti et al., 2019)
Biodiversidade	Alta biodiversidade contribui para a estabilidade e resiliência do ecossistema, promovendo interações complexas que sustentam a saúde da floresta, melhorando a resistência a pragas e doenças, facilitando a polinização e a dispersão de sementes e contribuindo para a ciclagem de nutrientes (Haddad et al., 2015)
Biomassa	A mensuração da biomassa florestal fornece informações cruciais sobre a saúde, produtividade e capacidade de sequestro de carbono da floresta, sendo uma ferramenta essencial para a gestão ambiental e a tomada de decisões relacionadas à conservação e ao uso sustentável dos recursos naturais (Houghton e Lawrence, 1999; Chave et al., 2014)
Qualidade do Ar	Evidencia a eficiência do fragmento em filtrar impurezas atmosféricas, absorvendo partículas poluidoras suspensas (Escobedo et al., 2011)
Temperatura	Influencia, causando estresse térmico em plantas e animais, alterando microclimas e afetando ciclos de vida e composição de espécies. Altas temperaturas podem acelerar a degradação dos fragmentos florestais, aumentando a vulnerabilidade a incêndios, pragas e doenças (Long e Frank, 2019)

Umidade relativa do ar	Impacta na saúde das plantas, a biodiversidade e o ciclo hidrológico. Níveis adequados de umidade ajudam a mitigar estresses climáticos, controlam incêndios e mantêm um microclima estável, essencial para a flora e fauna (Magnago et al., 2017)
Forma	A forma de um fragmento está diretamente relacionada com o tamanho e disposição de sua borda, fator esse que está entre os mais importantes impulsionadores da mudança ecológica nos fragmentos (Laurence et al., 2011) por interferirem no aumento do estresse de dessecação, cisalhamento e turbulência do vento, ocasionando mudança na germinação, mortalidade, hidrografia e composição de espécies do fragmento (Uriarte et al., 2010)
Tamanho de Área	A correlação entre a extensão dos fragmentos e suas características ecológicas, como a diversidade de espécies, é fundamentada principalmente na biogeografia de ilhas (MacArthur e Wilson, 2001). Laurence et al. (2011) corroboram que fragmentos menores frequentemente não mantêm populações viáveis e tendem a perder espécies mais rapidamente
Conectividade	A condição de isolamento pode resultar na diminuição ou até mesmo na eliminação da colonização por espécies presentes em áreas adjacentes, assim como no restringimento do fluxo gênico e na limitação do acesso das espécies aos recursos localizados fora do habitat fragmentado (Pires et al., 2006; Viana e Pinheiro, 1998)

Fonte: O autor, 2024.

Quadro 3. Padronização dos critérios

Critério	Unidade	Fonte de classificação	Estado de conservação				
			(1)	(02)	(3)	(04)	(05)
Declividade	%	EMBRAPA	>45	20-45	08-20	03-08	0-03

Área	Hectares	Pirovani et al., (2014) e Viana e Pinheiro (1998)	<10	10-20	20-30	30-40	>40
Biodiversidade (Integridade da biodiversidade)	%	Newbold et al., (2016)	0-25	25 - 50	50 - 65	65 - 80	>80
Biomassa	Mg.ha ⁻¹	O autor	<50	50-150	150-250	250-350	>350
Densidade demográfica do entorno	Percentil	O autor	>80	60-80	40-60	20-40	<20
Classe de uso do solo do Entorno	Classe ^[1]	O autor	5	4	3	2	1
Temperatura	Percentil	O autor	>80	<20	20-40	60-80	40-60
Umidade	Percentil	O autor	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Forma	Dimensão fractal	McGarigal (1995)	1,80 – 2,00	1,60 – 1,80	1,60 – 1,40	1,40 – 1,20	>1,20
Qualidade do ar (média anual)	MP2.5 (µg/m3)	CETESB (2024)	>125	75 - 125	50 - 75	25 - 50	0 - 25

Conectividade (Proximidade fragstrats)	Percentil	O autor	<20	20-40	40-60	60-80	>80
Densidade de drenagem	km/km ²	Carvalho (2006)	< 0,5	0,5 - 1,5	1,5 - 2,5	2,5- 3,5	≥ 3,5
Geomorfologia	Índice de fragilidade ambiental	Adaptado de Crepani et al., (2001)	5	4	3	2	1
Solos	Índice de fragilidade ambiental	Adaptado de Crepani et al., (2001)	5	4	3	2	1

Fonte: O autor, 2024.

Quadro 4. Fonte de obtenção e procedimentos realizados nos dados

Critério	Dado	Link para obtenção	Formato inicial	Procedimentos de processamento
Declividade	DEM ALOS PALSAR	https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS	Raster	Recorte, cálculo de declividade, padronização
Área	Imagem Planet (planet_medres_normalized_analytic_2023-07_mosaic)	WMTS no QGIS https://api.planet.com/basemaps/v1/mosaics/wmts?api_key={api-ke}	Raster	Classificação de imagem, cálculo de área, padronização

Biodiversidade	Mapa global do Índice de Intacta da Biodiversidade, de Newbold et al. (2016) Science	https://data.nhm.ac.uk/dataset/global-map-of-the-biodiversity-intactness-index-from-newbold-et-al-2016-science	Raster	Recorte, padronização
Biomassa	Mapa de biomassa da Amazônia brasileira de Ometto et al., (2023)	https://zenodo.org/records/7647491	Raster	Recorte, padronização
Densidade demográfica do entorno	Censo IBGE 2022	https://bit.ly/3R8lIC3	Vetor	Rasterização, padronização
Classe de uso do solo do Entorno	Adaptado do Plano diretor cidade de Manaus ¹	https://bit.ly/42hvKY1	PDF	Rasterização, padronização
Temperatura	Média da temperatura anual da plataforma EducAIR	https://aqicn.org/station/@376969/pt/	Tabela	Rasterização, padronização
Umidade relativa do ar	Média da umidade relativa do ar das	https://portal.inmet.gov.br/	Tabela	Rasterização, padronização

	estações do INMET			
Forma	Imagem Planet (planet_medres_normalized_analytic_2023-07_mosaic)	WMTS no QGIS https://api.planet.com/basemaps/v1/mosaics/wmts?api_key={api-ke}	Raster	Classificação de imagem, cálculo da forma, padronização
Qualidade do ar	Média anual da qualidade do ar da plataforma EducAIR	https://aqicn.org/station/@376969/pt/	Tabela	Rasterização, padronização
Conectividade	Imagem Planet (planet_medres_normalized_analytic_2023-07_mosaic)	WMTS no QGIS https://api.planet.com/basemaps/v1/mosaics/wmts?api_key={api-ke}	Raster	Classificação de imagem, cálculo da conectividade, padronização
Densidade de drenagem	DEM ALOS PALSAR	https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS	Raster	Recorte, cálculo de drenagem, cálculo da área, cálculo da densidade de drenagem, padronização
Geomorfologia	DEM ALOS PALSAR	https://search.asf.alaska.edu/#/?dataset=ALOS	Raster	Recorte, cálculo de dissecações e declividade, cálculo do índice de fragilidade, padronização

Solos	Mapa de classe de solos da plataforma Soil Grids	https://soilgrids.org/	Raster	Recorte, padronização
-------	--	---	--------	-----------------------

Fonte: O autor, 2024.

^[1] Adaptado do plano diretor da cidade de Manaus onde a intensidade poluidora do uso segue a ordem numeral crescente, desde a classe 5 sendo a menos restritiva quanto ao uso, permitindo atividades bastante poluidoras até a classe 1 sendo a mais restritiva.

5.2 Modelagem espacial

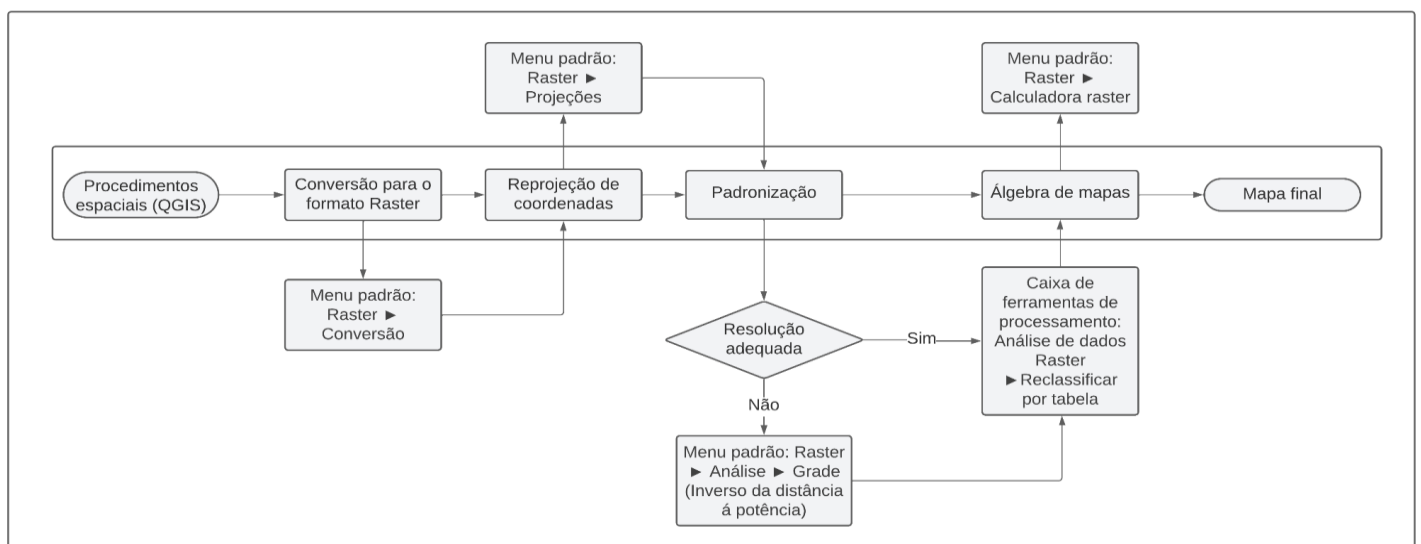
Esta fase consiste na espacialização e padronização das variáveis obtidas previamente, envolve o uso de técnicas de geoprocessamento para obter e processar os dados dos critérios da etapa anterior, por meio de técnicas inerentes ao SIG (Feizizadeh et al., 2014). Nesse viés, após a obtenção das informações de cada critério, devem ser efetuados os procedimentos de adequação espacial como conversão e padronização a fim de padronizar a escala dos dados e converter diferentes níveis de um atributo, eliminando a influência da dimensão e formato de diferentes critérios. Doravante, uma álgebra de mapas deve ser aplicada, técnica comum em processamento de matrizes geoespaciais que envolve a modificação dos valores de pixels com base em critérios e valores predefinidos. Com ela reorganiza-se os dados cruzando os mapas e seus respectivos pesos entre si, tornando-os mais adequados para análise e interpretação. A Figura 2 sumariza o procedimento metodológico desta pesquisa ao representar as etapas da modelagem espacial multicritério aplicada.

A análise baseada em dados espaciais reduz custos associados à coleta de campo e proporciona a capacidade de abranger áreas extensas de forma sistemática (Shimabukuro e Formaggio, 2009). Esta análise procura complementar ou até mesmo solucionar a problemática do custo associado a coletas de dados frequentes. Assim, pode viabilizar a obtenção de informações frequentes ao longo do tempo, permitindo a identificação de padrões e mudanças dinâmicas em ambientes complexos. Dessa forma, enfatiza-se a importância desse viés como uma abordagem eficiente e

econômica para a obtenção de informações detalhadas e abrangentes, com ampla aplicabilidade em diversos domínios de pesquisa e tomada de decisões (Souza et al., 2007).

Os procedimentos relacionados aos dados e análises espaciais que consiste na espacialização dos critérios e álgebra de mapas foram realizados por meio do QGIS versão 3.26.1 (Figura 3). Dentro dele, os dados levantados foram todos convertidos para o formato matricial (raster), reprojetados para o mesmo sistema de coordenadas, e, a depender da resolução dos dados de entrada disponíveis, interpolados e padronizados. Ressalta-se que essa definição interfere diretamente na acurácia e nível de detalhamento da análise. Para padronizar dados obtidos em resolução espacial maior, ou seja, com tamanho menor do pixel, foi utilizada a técnica de interpolação pelo Método de distância inversa ponderada (IDW) (Shepard, 1968), método usa um conjunto de combinação linear ponderada de pontos de amostra para determinar os valores das células de valor desconhecido. Maior peso é atribuído aos pontos que estão mais próximos do local alvo (Chin et al., 2023).

Figura 3. Procedimentos espaciais realizados no software Qgis



Fonte: O autor (2024).

Dentro dos procedimentos da modelagem espacial a padronização permite que dados de diferentes escalas possam ser numericamente utilizados. O uso do princípio da Lógica Fuzzy (Zadeh, 1965) permite a obtenção de uma superfície de decisão, que classifica em áreas mais ou menos adequadas para uma finalidade (de Paula e Souza,

2007). Neste estudo foram utilizadas por padrão cinco classes de intensidade numa escala ordinal entre 1 e 5, conforme recomendado por (Macedo et al., 2018) para facilitação da estratificação e interpretação dos dados. As definições foram realizadas a partir das justificativas dadas pelos especialistas e pela revisão de literatura, onde foram estabelecidas a relação entre cada critério e o objetivo da análise. Para o trabalho em pauta, buscou-se a revisão de trabalhos para entender a possível relação entre níveis de intensidade ou ocorrência ou gradação de um fenômeno e seu efeito na conservação da área na paisagem. Todas as classes definidas para cada critério seguem ordenamento crescente variando de uma classe que teoricamente gera valores de conservação mais baixos para uma classe que gera valores de conservação mais altos (Quadro 3). O procedimento para realizar essa padronização no âmbito espacial é feito pela ferramenta de reclassificação por tabela (Figura 4).

Figura 4. Exemplo de reclassificação por tabela

Reclassificar por tabela

Parâmetros Log

Tabela de reclassificação

	Minimo	Máximo	Valor
1	0	50	1
2	50	150	2
3	150	250	3
4	250	350	4
5	350	1000	5

Adicionar linha
Remover linha(s)
Remover Tudo
OK
Cancelar

Reclassificar por tabela

Esse algoritmo reclassifica uma banda de raster atribuindo novos valores de classe com base nos intervalos especificados em uma tabela fixa.

Fonte: O autor (2024).

A álgebra de mapas nesse contexto consiste na multiplicação dos arquivos matriciais normalizados e seus respectivos pesos entre si utilizando a “calculadora raster” do QGIS. O resultado é um mapa de estado de conservação, com valores de célula variando entre o índice de menor valor (1) a maior valor (5), com a correspondência direta de menores valores serem correspondentes a um menor valor

associado para fins de estado de conservação da área, e maiores valores serem correspondentes a um maior valor associado para fins de estado de conservação da área.

5.3 Simulações

Modelar a dinâmica da alteração da paisagem urbana e a simulação de cenários futuros são ferramentas essenciais para apoiar negociações e debates relacionados à paisagem (Troupin e Carmelo, 2016). A implementação de um método capaz de simular a alteração urbana com base em diferentes cenários, políticas e regulamentações vigentes fornece uma análise eficiente para subsidiar a tomada de decisões e elaborar estratégias voltadas para a gestão sustentável (Sadooghi e Abolhasani, 2022). Aqui consideramos 3 distintos cenários: o primeiro, cunhado de “cenário otimista”, onde os dados foram manipulados para que se obtivesse a restauração as áreas de APP (de cursos d'água) da cidade, para isso foram gerados para todos os cursos d'água na área de estudo um buffer de 30 metros que foram considerados totalmente reflorestados, a outra alteração foi para que o entorno dos fragmentos florestais tivesse maior controle e restrição (alterando-se o dado de uso do solo para a classe mais restritiva). Os demais critérios foram mantidos estáveis.

O segundo cenário, cunhado de “cenário intermediário”, considerou uma mudança intermediária onde foi inserido um aumento de 1.5 graus Celsius no dado de temperatura do ar, a qualidade do ar foi diminuída para “poluição média”, o uso do solo no entorno dos fragmentos foi ajustado para a categoria “média restrição” e os demais critérios sem mudanças dos dados atuais.

O terceiro cenário foi cunhado de “cenário pessimista”, onde a população dobra de tamanho, ocorra um aumento de 5 graus Celsius na temperatura da cidade, os fragmentos com tamanho superior a 40 hectares percam área em uma profundidade de 200 metros em suas bordas, a classe de uso do solo no entorno dos fragmentos seja a mais permissiva possível, a qualidade do ar seja mantida na categoria “péssima” e o quantitativo de biomassa se reduza pela metade na cidade.

Os procedimentos espaciais para a adequação dos cenários foram realizados na etapa de espacialização dos critérios descritos na Figura 2 e consistiu na mudança uniforme - para todas as regiões da cidade - dos valores de pixel, de maneira que os indicadores atendessem as métricas descritas no parágrafo anterior, de maneira que

se mantivesse o máximo possível a curva de distribuição de frequência original para cada região, ou seja, para que todas as áreas diminuíssem ou aumentassem os valores associados a cada critério de maneira o mais uniforme possível, de acordo com as características de cada critério e o interesse em modificar tendências, seja de forma positiva ou negativa.

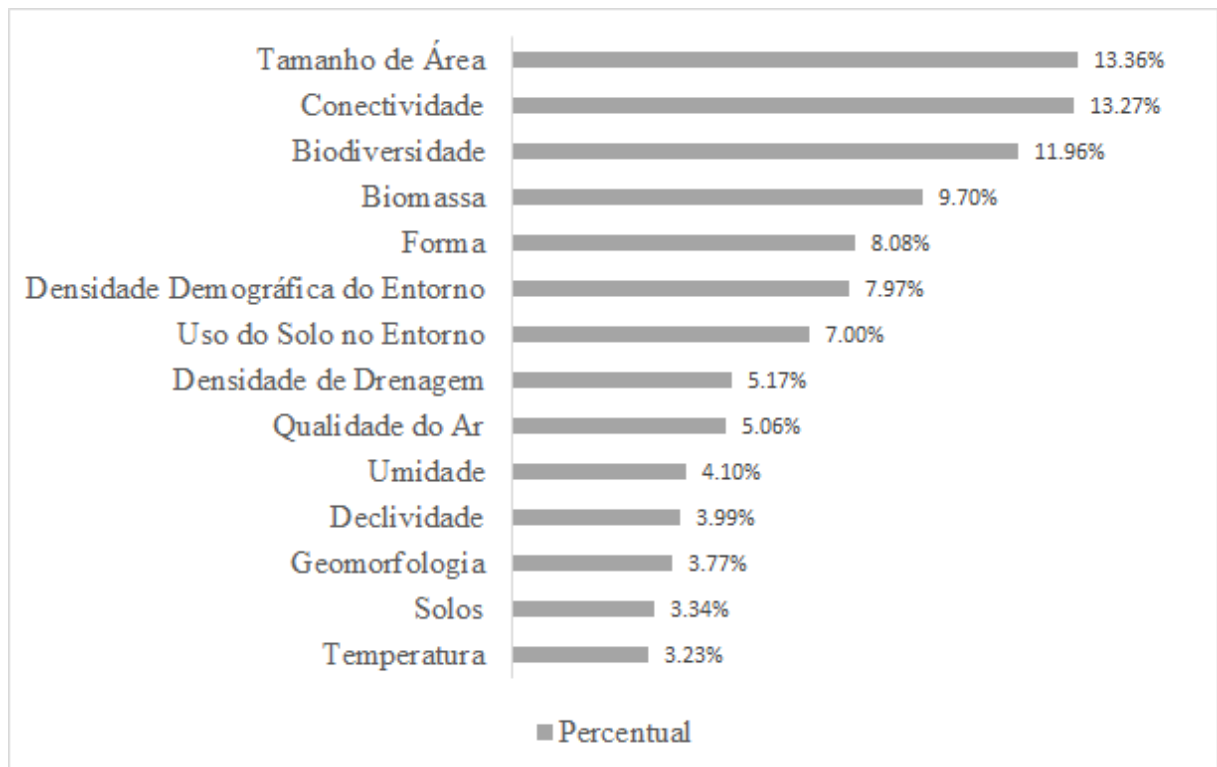
6 Resultados e discussão

Para ilustrar a aplicação do método proposto, foi realizada a execução de um estudo de caso, a partir da área urbana e periurbana do município de Manaus - AM.

6.1 Definição e hierarquização dos critérios

Os procedimentos de alocação de pesos descritos anteriormente foram seguidos usando o método de hierarquização AHP que por consistir em comparações de pares de critérios para determinar importâncias relativas, adapta-se bem a cenários com múltiplos intervenientes. Ishizaka e Lusti (2006) destacam a aplicação dessa álgebra matricial para lidar com entradas incompletas ou inconsistentes, produzindo pesos, pontuações gerais e medidas de consistência, essa metodologia foi efetuada dentro da plataforma de Goepel (2018) auxiliado pela opinião de especialistas da área florestal, e para o processamento da modelagem espacial o Software QGIS versão 3.26.1 foi utilizado.

Ao final, os pesos atribuídos aos critérios foram mapeados e estão apresentados na Figura 5. Os especialistas embasaram suas escolhas majoritariamente pela dependência ou independência de cada critério em relação aos outros e pela importância para manutenção dos fragmentos. Em suma, a resiliência, influência nos demais atributos e a capacidade de agir como ponte essencial para evitar o isolamento completo dos fragmentos, proporcionando variabilidade genética e trocas necessárias à sua manutenção, garantiram os critérios "Tamanho de Área" e "Conectividade" como os mais relevantes respectivamente.

Figura 5. Hierarquização dos critérios

Fonte: O autor (2024).

A análise dos critérios reflete a necessidade de uma abordagem integrada e adaptável ao contexto urbano de cada cidade, uma vez que, embora os critérios apresentados tendem a ser universais, sua aplicação pode variar significativamente dependendo das especificidades locais. Por exemplo, cidades com maior densidade demográfica no entorno dos fragmentos podem apresentar pressões mais intensas sobre os mesmos, influenciando diretamente os resultados da avaliação e a priorização de estratégias de manejo. Essa adaptação é crucial para garantir que as soluções sejam eficazes e contextualmente relevantes, reforçando a importância de estudos comparativos em diferentes realidades urbanas.

Outro aspecto importante está relacionado à percepção dos chamados "desserviços ambientais". Embora as árvores e os fragmentos florestais urbanos ofereçam uma ampla gama de benefícios, como regulação do microclima, melhoria da qualidade do ar e suporte à biodiversidade (Fahrig, 2017; Kabisch et al., 2015; Escobedo et al., 2011), eles também podem ser percebidos como problemáticos por alguns grupos (Mendes et al., 2019). Exemplos incluem custos de manutenção,

interferências em infraestruturas urbanas e riscos associados a quedas em eventos extremos. Reconhecer e avaliar essas percepções é fundamental para um processo de tomada de decisão equilibrado, que considere tanto os serviços ecossistêmicos quanto às possíveis limitações e desafios relacionados à conservação em áreas urbanas.

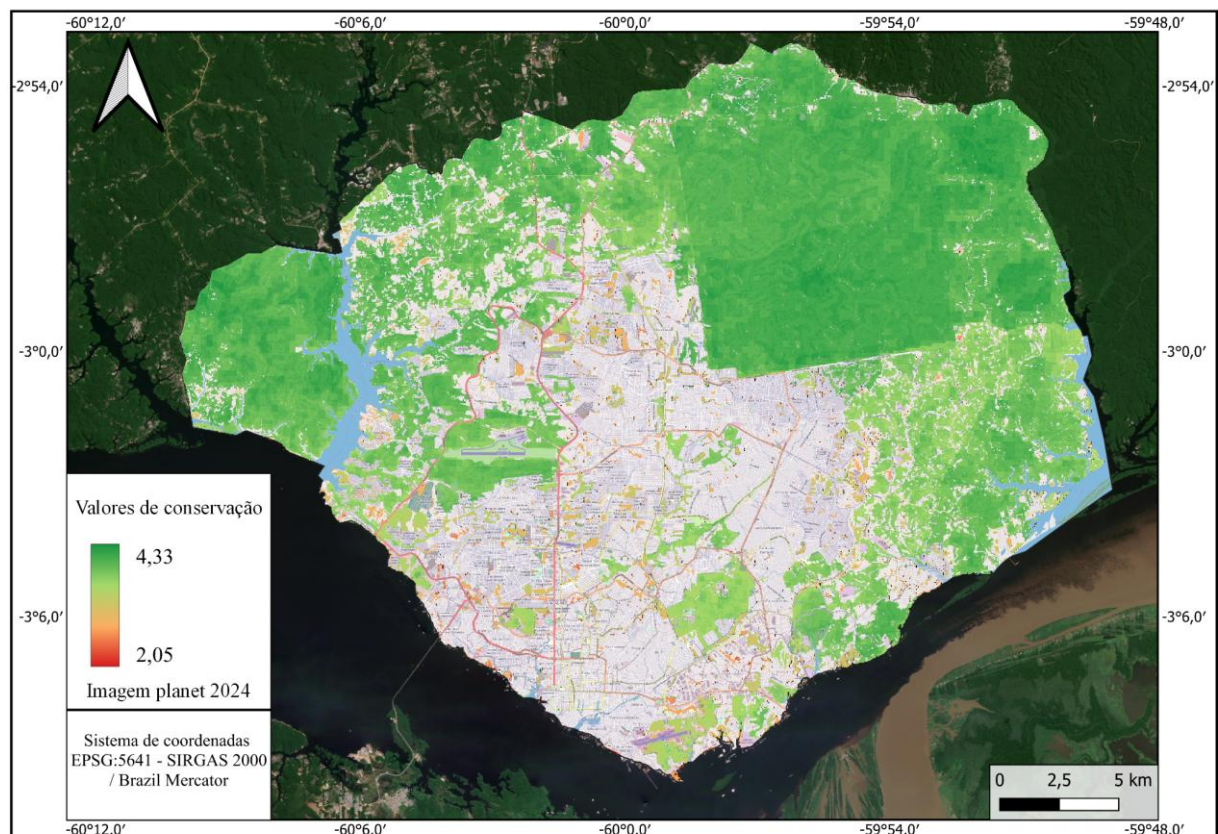
A escolha dos critérios também possui uma conexão direta com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Critérios como "Tamanho de Área" e "Conectividade" dialogam com o ODS 15 (Vida Terrestre), ao promoverem a conservação da biodiversidade e a funcionalidade ecológica dos fragmentos. "Biodiversidade" e "Biomassa", por sua vez, estão alinhados ao ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima), evidenciando a relevância do sequestro de carbono e da mitigação de impactos climáticos. Por fim, o "Uso do Solo no Entorno" e a "Densidade Demográfica do Entorno" contribuem para reflexões relacionadas ao ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), apontando a necessidade de integrar a conservação ambiental ao planejamento urbano sustentável.

6.2 Modelagem espacial

Após a realização da definição e hierarquização dos critérios, a modelagem espacial foi efetuada com o intuito de demonstrar a aplicação do método na área de estudo, com isso resultou-se em um valor de conservação que variou de 2,05 a 4,33 nos fragmentos urbanos e periurbanos da cidade de Manaus-AM, em um índice onde o valor máximo possível, ou seja, o fragmento com o melhor estado de conservação de acordo com a escala definida é igual a 5, os mais conservados são os em tons de verde no mapa e os piores em tons de vermelho (Figura 6). Observou-se que as áreas de maior tamanho foram predominantemente classificadas como as mais conservadas, confirmando a relação do critério de maior peso com o resultado final. Tal resultado é compreensível em um estudo sobre fragmentação florestal e seu estado de conservação, e está alinhado com a teoria da biogeografia de ilhas, proposta por MacArthur e Wilson (2001), que postula que o tamanho da área influencia a chance de sobrevivência das espécies. Fragmentos maiores apresentam uma maior área central, oferecem mais recursos naturais e abrigam maior biodiversidade do que

fragmentos menores, na maioria dos casos. Esta teoria é amplamente aceita na literatura científica e é corroborada por diversos estudos, incluindo Laurence et al. (2011), Nichol, Abbas e Fischer (2017) e Rocha-Santos et al. (2016).

Figura 6. Valores de conservação, a partir da metodologia proposta, para os fragmentos da cidade de Manaus – AM

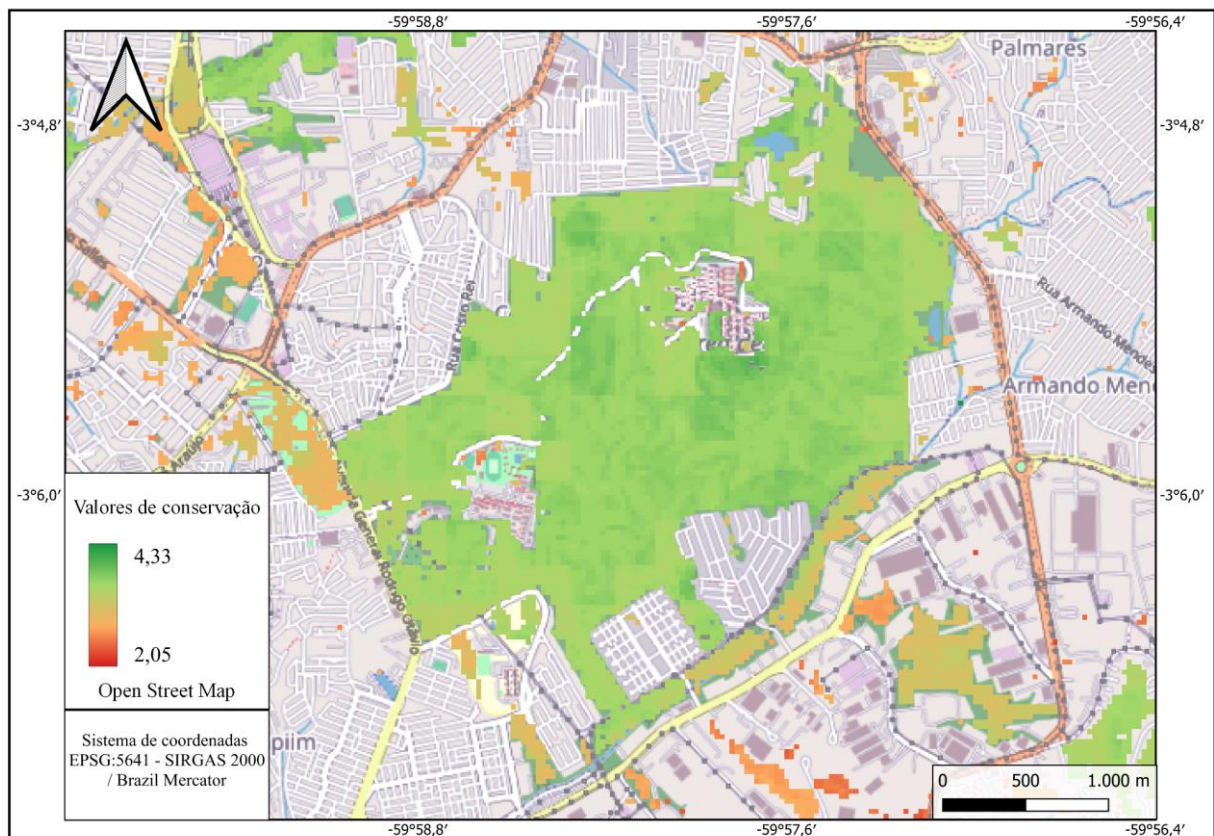


Fonte: O autor (2024).

No método proposto, devido a inclusão de critérios que vão além das análises de paisagem de fragmentação florestal corriqueiras, é possível observar que a metodologia consegue capturar as variações de conservação dentro de cada fragmento. A Figura 7 mostra ampliação para a área da Universidade Federal do Amazonas, bairro do Coroado, zona centro-leste. Por se tratar do contexto urbano, este tipo de análises possibilita a estratificação desses fragmentos e direciona uma gestão mais eficiente, norteando os possíveis usos e restauros. Não obstante, outro ponto importante diz respeito à interpretação desse índice de conservação. Em casos onde os fragmentos possam estar mal ranqueados, isto é, em baixo estado de

conservação, não significa que os mesmos não sejam importantes para a paisagem, ao contrário, fragmentos pequenos possuem extrema importância para a manutenção do equilíbrio do ecossistema, funcionando como conectores dos demais fragmentos incluindo os maiores (de Matos et al., 2021).

Figura 7. Variação dos valores de conservação dentro dos fragmentos florestais do bairro do Coroadó, zona centro-leste



Fonte: O autor (2024).

Isso posto, no resultado final da análise dos fragmentos florestais urbanos deve-se levar em consideração o contexto da urbanização e a evolução do conceito de conservação nesse ambiente. A conservação deve ser compreendida principalmente em função da importância dessas áreas para o fornecimento de serviços ecossistêmicos essenciais para a população urbana, tais como a regulação do microclima, a conservação do solo, o valor estético, cultural, saúde e bem-estar (Escobedo et al., 2011; Kabisch et al., 2015; Fahrig, 2017). A ênfase nesses aspectos reflete uma mudança de foco, direcionando a conservação menos para os parâmetros tradicionais de biodiversidade e funções ecológicas indiretas, que são mais

adequadamente abordados em áreas não urbanizadas. Fragmentos florestais fora das cidades estão geralmente mais adaptados e desempenham melhor as funções de conservação da biodiversidade e manutenção das funções ecológicas pois a urbanização em si gera uma gama de efeitos maléficos aos fragmentos nela contidos (Rötzer et al., 2023). Dessa forma, nos ambientes urbanos, a prioridade deve ser maximizar os benefícios diretos que esses fragmentos proporcionam à qualidade de vida dos habitantes, integrando as funções ecológicas ao planejamento urbano e promovendo uma coexistência harmoniosa entre o desenvolvimento urbano e a preservação dos espaços naturais remanescentes. Uma abordagem diferenciada na conservação urbana reconhece as limitações e as especificidades dos fragmentos florestais urbanos, ajustando as estratégias de manejo para atender às necessidades e às dinâmicas das áreas urbanizadas.

6.3 Simulações

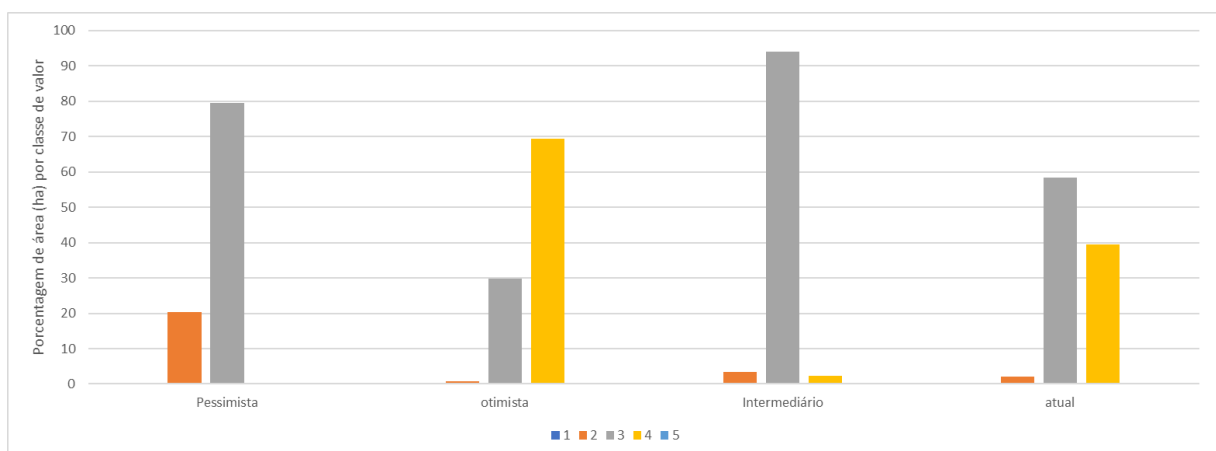
Antes de analisar o resultado da simulação, é preciso entender que cada critério possui uma explicação para que um pixel esteja alocado em cada classe - valores de 1 a 5. Dadas as características da cidade de Manaus, alguns critérios, como por exemplo a biomassa, não possuem amostras classificadas na melhor classe. Além disso, vale ressaltar que há critérios físicos que são praticamente imutáveis, como declividade, geomorfologia e solos, pois dependem da característica do local de análise. Logo, os mesmos manter-se-ão nas respectivas classes após a modelagem, independentemente do cenário considerado.

Após a modelagem dos cenários, notou-se que há uma mudança significativa no quantitativo de área que muda de classe de valor. Onde apesar de não haver um ingresso significativo nos valores que compõem a classe de valores mais desejável - classe 5 (considerando-se que 5 é o melhor e 1 o pior) - há um considerável ingresso, indicativo de melhora ou piora, entre as classes intermediárias (Figura 8). Para o método proposto, o cenário intermediário (Figura 9) gerou como consequência o decréscimo de 37% dos valores na classe 4 - tendo os pixels nesta classe migrado 35,6% para a classe 2 e 1,4% para a classe 1. No cenário pessimista (Figura 9) esse decréscimo foi de 39% na classe 4 que é o limite de decréscimo alcançável, pelo fato

de que no cenário atual apenas 39% da área está nessa classe, em contrapartida embora o decréscimo na classe 4 entre os cenários intermediário e pessimista sejam parecidos (37% e 39% respectivamente), no cenário pessimista os pixels nesta classe migraram 20,60% para a classe 3, 18,30% para a classe 2 e 0,10% para a classe 1.

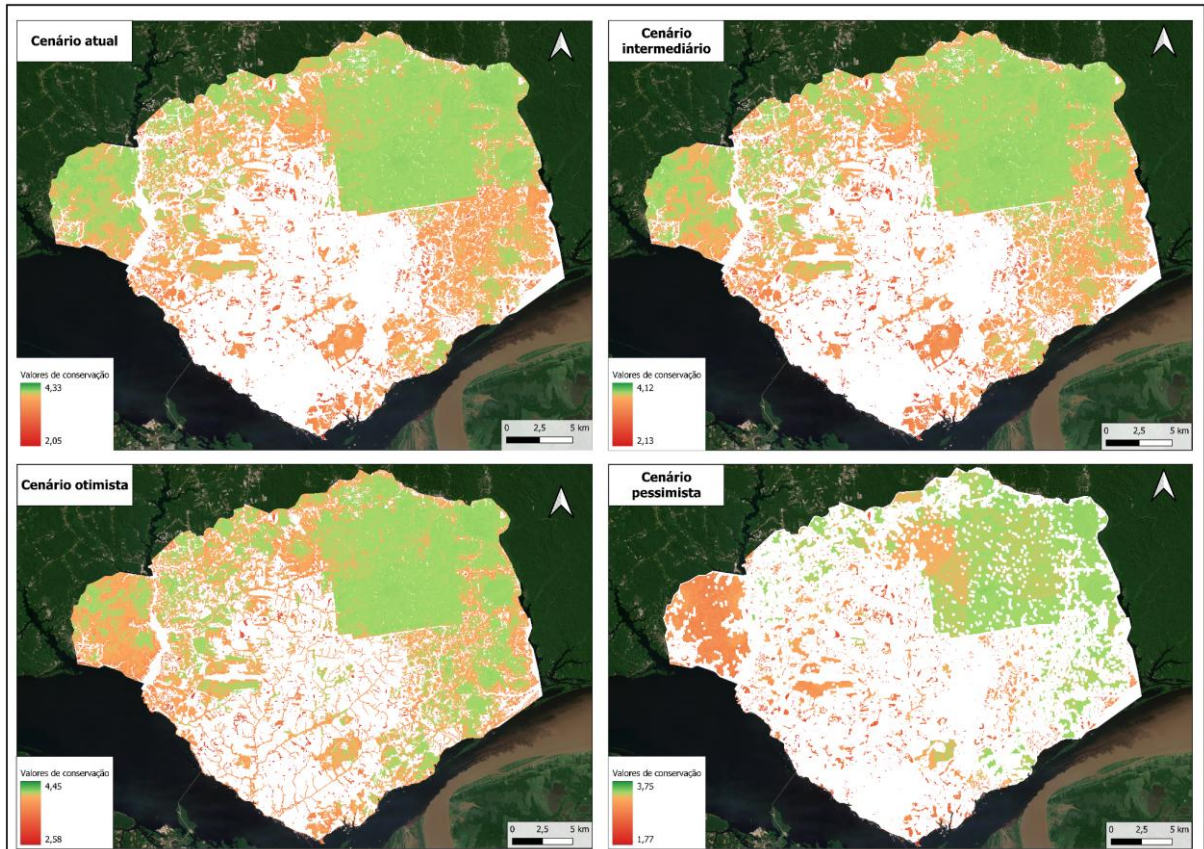
Já no cenário mais otimista (Figura 9) houve um acréscimo de 30% na classe 4, demonstrando que a restauração de áreas de APP e o maior controle de restrição do entorno dos fragmentos florestais quanto a usos, geram impactos notavelmente positivos na paisagem. Pois, influenciam diretamente no tamanho da área, forma do fragmento, conectividade entre fragmentos e o uso do solo no entorno, de modo que esse critérios merecem políticas públicas que os modifiquem de fato na cidade, pois, há quantitativamente formas de se mensurar essas melhorias no bem-estar da cidade e no valor dos seus fragmentos florestais. No entanto, mesmo em um cenário intermediário onde há manutenção de elementos da paisagem urbana, não se sustenta a caracterização para que a paisagem se mantenha em estado desejável, fato que se agrava quando se projeta o cenário pessimista onde há uma notável perda de valor para a os fragmentos da cidade. Isso demonstra que o método pode ser utilizado não somente para a gestão atual do território urbano, mas também para orientar cursos de ações e prevenir possíveis ameaças, podendo ser adaptado para cada especificidade local, considerando o porquê, o onde e o quando conforme recomendado por (Pedrosa e Câmara, 2004).

Figura 8. Porcentagem de área (ha) por classe de valor para os diferentes cenários



Fonte: Os autores (2024).

Figura 9. Simulação dos diferentes cenários de mudanças



Fonte: Os autores (2024).

6.4 Considerações sobre o método

Ressalta-se que a qualidade dos dados geoespaciais referentes a cada critério e as diferentes resoluções dos dados, influenciam significativamente no resultado final da análise (Macedo et al., 2018). Diferentes resoluções podem afetar a identificação de padrões espaciais e a correlação entre critérios, sendo essencial escolher a resolução adequada para capturar a variabilidade espacial e garantir a eficácia da análise multicritério espacial (Li et al., 2012), de modo que dados de alta qualidade a nível de detalhamento com alta resolução fornecem informações mais acuradas, permitindo uma avaliação mais fidedigna das variáveis envolvidas. Isso posto, a escala dos dados interfere no que se entende por fragmentos florestais em sua essência. Para compreender o conceito de fragmentos florestais, é essencial definir o que se entende por florestas a nível nacional e internacional, para áreas urbanas, a

FAO define florestas urbanas como todas as florestas, grupos de árvores e árvores individuais em áreas urbanas e periurbanas, incluindo florestas, árvores de rua, parques, jardins e árvores em locais abandonados (Salbitano, 2016). Nesse ínterim, a depender da escala dos dados, a análise pode não compreender fragmentos pequenos e subestimar os resultados. O que pode se tornar um problema, visto que, ao excluir áreas menores que 0,5 hectares, subestima-se a efetiva cobertura arbórea, incluindo pequenos fragmentos e árvores isoladas que possuem elevado valor ecológico e de conservação (Chazdon et al., 2016).

No quesito da definição das grandezas e níveis de importância, os pesos definidos pelos especialistas diminuem a influência no resultado final da análise à medida que se aumenta o número dos critérios, sendo dessa forma a fase de classificação, ou seja, a estratificação dos dados dentro de cada critério a etapa crucial para um bom resultado. No referente à avaliação dos especialistas durante a aplicação do método ficou notório que cautela na escolha dos mesmos é de suma importância, pois, a depender da área de atuação e bagagem do mesmo a compreensão a respeito do método e seus multicritérios ficam comprometidas, para isso atentar-se ao nível de inconsistência das respostas faz-se primordial (Saaty, 2003), doravante a persistência do erro continue, a eliminação dessas respostas incoerentes é uma alternativa a ser feita a posteriori.

7 Conclusão

A aplicação do método proposto é a oportunidade de gestores urbanos de priorizar ações de gestão, educação ambiental e conservação de paisagens urbanas. Estruturando dentro da gestão pública setores para coleta e organização de informações geoespaciais, melhorando assim a qualidade dos dados de entrada.

O uso de indicadores coroa uma boa produção de dados - atualizados e precisos - para que se monitore diversos aspectos ambientais, sociais, econômicos e

ecológicos. Estes indicadores levam a estimativas de valoração do ambiente e podem ser chave para verificação do andamento de projetos de restauro de ambientes - como plantios de enriquecimento, implantação de áreas verdes, ações como regularização fundiária e ambiental urbana, mudanças em normas como o código de APPs e projetos de conscientização e educação ambiental. Neste trabalho, fatores como densidade populacional e uso do solo no entorno destacaram-se como principais pressões sociais, enquanto drenagem, declividade e geomorfologia influenciaram a conservação física. Biodiversidade e biomassa emergiram como indicadores ecológicos críticos. Temperatura e umidade se mostraram como condições climáticas relevantes, e forma, tamanho de área e conectividade dos fragmentos foram essenciais para a integridade da paisagem urbana.

A Importância dos fragmentos florestais em cidades resilientes pelos serviços ecossistêmicos que os mesmos fornecem, considerando-se as mudanças climáticas - define que eles podem ser ótimos indicadores para a estabilidade do ambiente urbano. De modo que com a escolha dos critérios considerando a realidade urbana é possível comparar a situação de diferentes cidades e propor ações regionais coletivas para sanar problemas e discutir estratégias que abranjam outros elementos.

Referências

- ADAMS, Alison B. et al. Simulating forest cover change in the northeastern US: decreasing forest area and increasing fragmentation. **Landscape ecology**, v. 34, p. 2401-2419, 2019.
- ALMEIDA, Cristina Guilherme de et al. Análise espacial dos fragmentos florestais na área do Parque Nacional dos Campos Gerais, Paraná. 2008.
- ALONSO, Jose Antonio; LAMATA, M. Teresa. Consistency in the analytic hierarchy process: a new approach. **International journal of uncertainty, fuzziness and knowledge-based systems**, v. 14, n. 04, p. 445-459, 2006.
- ANANDA, Jayanath; HERATH, Gamini. A critical review of multi-criteria decision making methods with special reference to forest management and planning. **Ecological economics**, v. 68, n. 10, p. 2535-2548, 2009.

ASNER, Gregory P. et al. Targeted carbon conservation at national scales with high-resolution monitoring. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 47, p. E5016-E5022, 2014.

BALMFORD, Andrew et al. Bringing ecosystem services into the real world: an operational framework for assessing the economic consequences of losing wild nature. **Environmental and Resource Economics**, v. 48, p. 161-175, 2011.

BELTON, Valerie; STEWART, Theodor. **Multiple criteria decision analysis: an integrated approach**. Springer Science & Business Media, 2002.

BERGAMO, E. P.; ALMEIDA, J. A. P. A importância da geomorfologia para o planejamento ambiental: um estudo do município de Fartura/SP. **VI Simpósio Nacional de Geomorfologia, Goiânia-GO**, 2006.

BIERREGAARD JR, Richard O. et al. Principles of forest fragmentation and conservation in the Amazon. **Lessons from Amazonia: The Ecology and Conservation of a Fragmented Forest**, pgs. 271-285, 2001.

BLUMENFELD, Esther Carone et al. Relações entre tipo de vizinhança e efeitos de borda em fragmento florestal. **Ciência Florestal**, v. 26, p. 1301-1316, 2016.

BRATMAN, Gregory N. et al. Nature and mental health: An ecosystem service perspective. **Science advances**, v. 5, n. 7, p. eaax0903, 2019.

CAO, Qiwen et al. Multi-scenario simulation of landscape ecological risk probability to facilitate different decision-making preferences. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 325-335, 2019.

CARDINALE, Bradley J. et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. **Nature**, v. 486, n. 7401, p. 59-67, 2012.

CARDOSO, Christiany Araujo et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista árvore**, v. 30, p. 241-248, 2006.

CARVALHO, DF de; SILVA, LDB da. Hidrologia—Capítulo 3. Bacia Hidrográfica. 2006.

CAVALCANTE, Davi Grijó et al. Análise da vulnerabilidade ambiental de um fragmento florestal urbano na Amazônia: Parque Estadual Sumaúma. **Sociedade & Natureza**, v. 22, p. 391-403, 2010.

CEGAN, Jeffrey C. et al. Trends and applications of multi-criteria decision analysis in environmental sciences: literature review. **Environment Systems and Decisions**, v. 37, p. 123-133, 2017.

CHAKHAR, Salem; MOUSSEAU, Vincent. An algebra for multicriteria spatial modeling. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 31, n. 5, p. 572-596, 2007.

CHAVE, Jérôme et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global change biology*, v. 20, n. 10, p. 3177-3190, 2014.

CHAZDON, Robin L. et al. When is a forest a forest? Forest concepts and definitions in the era of forest and landscape restoration. **Ambio**, v. 45, n. 5, p. 538-550, 2016.

CHIN, Ren Jie et al. Assessment of inverse distance weighting and local polynomial interpolation for annual rainfall: A case study in Peninsular Malaysia. **Engineering Proceedings**, v. 38, n. 1, p. 61, 2023.

COSTANZA, Robert et al. Changes in the global value of ecosystem services. **Global environmental change**, v. 26, p. 152-158, 2014.

CREPANI, Edison et al. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao zoneamento ecológico-econômico e ao ordenamento territorial**. São José dos Campos: Inpe, 2001.

DA SILVA, Livia Maria Leite et al. Multiattribute spatial decision-making for qualitative information processing as applied to the renewable energy generating sites prospection. **IEEE Access**, v. 8, p. 137745-137757, 2020.

DALLIMER, Martin et al. Temporal changes in greenspace in a highly urbanized region. **Biology letters**, v. 7, n. 5, p. 763-766, 2011.

DE MATOS, Tatiana Possati Vieira et al. Protected areas and forest fragmentation: sustainability index for prioritizing fragments for landscape restoration. **Geology, Ecology, and Landscapes**, v. 5, n. 1, p. 19-31, 2021.

DE OLIVEIRA PIVA, Luani Rosa et al. Estoques de biomassa e carbono na Amazônia brasileira: uma nova abordagem. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. Supl. 2, p. 1-20, 2021.

DE PAULA, Eder Mileno Silva; SOUZA, M. J. N. Lógica Fuzzy como técnica de apoio ao Zoneamento Ambiental. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 13, p. 2979-2984, 2007.

DEBINSKI, Diane M.; HOLT, Robert D. A survey and overview of habitat fragmentation experiments. **Conservation biology**, v. 14, n. 2, p. 342-355, 2000.

DENZIN, Norman K. et al. (Ed.). **The Sage handbook of qualitative research**. Sage publications, 2023.

DIAS, A.; LATRUBESSE, E.; GALINKIN, M. Projeto corredor ecológico Bananal-Araguaia. 2000.

ESCOBEDO, Francisco J. et al. Urban forests, ecosystem services, green infrastructure and nature-based solutions: Nexus or evolving metaphors?. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 37, p. 3-12, 2019.

ESCOBEDO, Francisco J.; KROEGER, Timm; WAGNER, John E. Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. **Environmental pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2078-2087, 2011.

FAHRIG, Lenore. Ecological responses to habitat fragmentation per se. **Annual review of ecology, evolution, and systematics**, v. 48, p. 1-23, 2017.

FAO. Guidelines on urban and peri-urban forestry. **FAO Forestry Paper No. 178. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 2016.

FEIZIZADEH, Bakhtiar et al. A GIS-based extended fuzzy multi-criteria evaluation for landslide susceptibility mapping. **Computers & geosciences**, v. 73, p. 208-221, 2014.

FISCHER, Joern; LINDENMAYER, David B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. **Global ecology and biogeography**, v. 16, n. 3, p. 265-280, 2007.

GARDNER, Toby A. et al. Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. **Ecology letters**, v. 12, n. 6, p. 561-582, 2009.

GOEPEL, Klaus D. Implementation of an online software tool for the analytic hierarchy process (AHP-OS). **International journal of the analytic hierarchy process**, v. 10, n. 3, 2018.

GRIMM, Nancy B. et al. Global change and the ecology of cities. **science**, v. 319, n. 5864, p. 756-760, 2008.

HADDAD, N. M. et al. Fragmentação de Habitat e seu Impacto Duradouro nos Ecossistemas da Terra. **Science Advances**, v. 1, n. 2, p. 8-17, 2015.

HJORTSØ, Carsten Nico. Enhancing public participation in natural resource management using Soft OR—an application of strategic option development and analysis in tactical forest planning. **European Journal of operational research**, v. 152, n. 3, p. 667-683, 2004.

HORTON, Robert E. Drainage-basin characteristics. **Transactions, American geophysical union**, v. 13, n. 1, p. 350-361, 1932.

HOUGHTON, Richard A.; HACKLER, Joseph L.; LAWRENCE, Kira T. The US carbon budget: contributions from land-use change. **Science**, v. 285, n. 5427, p. 574-578, 1999.

HSU, Chia-Chien; SANDFORD, Brian A. The Delphi technique: making sense of consensus. **Practical assessment, research, and evaluation**, v. 12, n. 1, 2019.

HUANG, Ivy B.; KEISLER, Jeffrey; LINKOV, Igor. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. **Science of the total environment**, v. 409, n. 19, p. 3578-3594, 2011.

HWANG, C.-L.; MASUD, Abu Syed Md. **Multiple objective decision making—methods and applications: a state-of-the-art survey**. Springer Science & Business Media, 2012.

HWANG, Ching-Lai et al. Methods for multiple attribute decision making. **Multiple attribute decision making: methods and applications a state-of-the-art survey**, p. 58-191, 1981.

ISHIZAKA, Alessio; LUSTI, Markus. How to derive priorities in AHP: a comparative study. **Central European Journal of Operations Research**, v. 14, p. 387-400, 2006.

KABISCH, Nadja. Ecosystem service implementation and governance challenges in urban green space planning—The case of Berlin, Germany. **Land use policy**, v. 42, p. 557-567, 2015.

KANT SHARMA, Laxmi et al. Fuzzy AHP for forest fire risk modeling. **Disaster Prevention and Management: An International Journal**, v. 21, n. 2, p. 160-171, 2012.

KAWASHIMA, Renata Sayuri et al. Modelagem Dinâmica Espacial como ferramenta para simulação de cenários da paisagem na região portuária da Baixada Santista. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 4, p. 703-718, 2016.

KEENEY, Ralph L.; RAIFFA, Howard. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. Cambridge university press, 1993.

KHADKA, Chiranjewee et al. Problem structuring in participatory forest planning. **Forest policy and economics**, v. 26, p. 1-11, 2013.

LAMBIN, E. F. Modelling deforestation processes: a review. **TREES Series B. Research Rep**, v. 1, 1994.

LAURANCE, William F. et al. Biomass collapse in Amazonian forest fragments. **Science**, v. 278, n. 5340, p. 1117-1118, 1997.

LAURANCE, William F. et al. Rain forest fragmentation and the dynamics of Amazonian tree communities. **Ecology**, v. 79, n. 6, p. 2032-2040, 1998.

LAURANCE, William F. et al. The fate of Amazonian forest fragments: a 32-year investigation. **Biological conservation**, v. 144, n. 1, p. 56-67, 2011.

LI, Deren; ZHANG, Jingxiong; WU, Huayi. Spatial data quality and beyond. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 26, n. 12, p. 2277-2290, 2012.

LINDENMAYER, David B.; FISCHER, Joern. **Habitat fragmentation and landscape change: an ecological and conservation synthesis**. Island Press, 2013.

LINKOV, Igor et al. From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. **Environment international**, v. 32, n. 8, p. 1072-1093, 2006.

LONG, Lawrence C.; D'AMICO, Vincent; FRANK, Steven D. Urban forest fragments buffer trees from warming and pests. **Science of the Total Environment**, v. 658, p. 1523-1530, 2019.

LOREAU, Michel et al. Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges. **science**, v. 294, n. 5543, p. 804-808, 2001.

MACARTHUR, Robert H.; WILSON, Edward O. **The theory of island biogeography**. Princeton university press, 2001.

MACEDO, Diego R. et al. Development and validation of an environmental fragility index (EFI) for the neotropical savannah biome. **Science of the Total Environment**, v. 635, p. 1267-1279, 2018.

MAGALHÃES, Monica de Avelar Figueiredo Mafra; MEDRONHO, Roberto de Andrade. Análise espacial da Tuberculose no Rio de Janeiro no período de 2005 a 2008 e fatores socioeconômicos associados utilizando microdado e modelos de regressão espaciais globais. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, p. 831-840, 2017.

MAGNAGO, Luiz Fernando Silva et al. Do fragment size and edge effects predict carbon stocks in trees and lianas in tropical forests?. **Functional ecology**, v. 31, n. 2, p. 542-552, 2017.

MALCZEWSKI, Jacek; RINNER, Claus. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. New York: Springer, 2015.

MANNING, Adrian D.; FISCHER, Joern; LINDENMAYER, David B. Scattered trees are keystone structures—implications for conservation. **Biological conservation**, v. 132, n. 3, p. 311-321, 2006.

MCDONNELL, Mark J.; HAHS, Amy K.; BREUSTE, Jürgen H. (Ed.). **Ecology of cities and towns: a comparative approach**. Cambridge University Press, 2009.

MCGARIGAL, Kevin. **FRAGSTATS: spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure**. US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, 1995.

MENDES, Flávio Henrique et al. Probabilidade de ocorrência de altas temperaturas do ar e chuvas intensas em Piracicaba/SP. *Geografia em Atos (Online)*, v. 1, n. 9, p. 51-65, 2019.

MENDOZA, Guillermo A.; MARTINS, Helena. Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modelling paradigms. **Forest ecology and management**, v. 230, n. 1-3, p. 1-22, 2006.

METZGER, Jean-Paul. Estrutura da paisagem: o uso adequado de métricas. **Métodos de estudos em biologia da conservação e manejo da vida silvestre**, 2003.

MINELLA, Jean Paolo Gomes; MERTEN, Gustavo Henrique. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. **Ciência Rural**, v. 42, p. 1575-1582, 2012.

MITCHELL, Matthew GE; DEVISSCHER, Tahia. Strong relationships between urbanization, landscape structure, and ecosystem service multifunctionality in urban forest fragments. **Landscape and Urban Planning**, v. 228, p. 104548, 2022.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Modelling erosion and deposition: topographic effects. **Transactions of the ASAE**, v. 29, n. 6, p. 1624-1630, 1986.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the ASAE**, v. 31, n. 4, p. 1098-1107, 1988.

MOORE, Ian Donald; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

MORAES, Danielle Serra de Lima; JORDÃO, Berenice Quinzani. Degradação de recursos hídricos e seus efeitos sobre a saúde humana. **Revista de saúde pública**, v. 36, p. 370-374, 2002.

MYLLYVIITA, Tanja et al. Decision support in assessing the sustainable use of forests and other natural resources—a comparative review. **The Open Forest Science Journal**, v. 4, n. 1, 2011.

NDAYAMBAJE, Jean Damascene; HEIJMAN, Wim JM; MOHREN, Godefridus MJ. Farm woodlots in rural Rwanda: purposes and determinants. **Agroforestry Systems**, v. 87, p. 797-814, 2013.

NDUWAMUNGU, Jean et al. Rwanda forest cover mapping using high resolution aerial photographs. In: **Proceedings of the Global Geospatial Conference 2013 integrating Africa GIS 2013 and GSDI**. 2013.

NEWBOLD, Tim et al. Has land use pushed terrestrial biodiversity beyond the planetary boundary? A global assessment. **Science**, v. 353, n. 6296, p. 288-291, 2016.

NICHOL, Janet E.; ABBAS, Sawaid; FISCHER, Gunter A. Spatial patterns of degraded tropical forest and biodiversity restoration over 70-years of succession. **Global ecology and conservation**, v. 11, p. 134-145, 2017.

NIKHIL, S. et al. Application of GIS and AHP method in forest fire risk zone mapping: a study of the Parambikulam tiger reserve, Kerala, India. **Journal of Geovisualization and Spatial Analysis**, v. 5, n. 1, p. 14, 2021.

NUNES, Paulo ALD; VAN DEN BERGH, Jeroen CJM. Economic valuation of biodiversity: sense or nonsense?. **Ecological economics**, v. 39, n. 2, p. 203-222, 2001.

OMETTO, Jean Pierre et al. A biomass map of the Brazilian Amazon from multisource remote sensing. **Scientific Data**, v. 10, n. 1, p. 668, 2023.

PEDROSA, Bianca Maria; CÂMARA, Gilberto. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. **EMBRAPA, Brasília, DF, Brasil**, 2004.

PIRES, Alexandra S.; FERNANDEZ, Fernando AS; BARROS, Camila S. Vivendo em um mundo em pedaços: efeitos da fragmentação florestal sobre comunidades e populações animais. **Biologia da Conservação: Essências. São Carlos, São Paulo, Brazil**, p. 231-260, 2006.

PIROVANI, Daiani Bernardo et al. Análise espacial de fragmentos florestais na Bacia do Rio Itapemirim, ES. **Revista Árvore**, v. 38, p. 271-281, 2014.

PYKÄLÄINEN, Jouni; HILTUNEN, Veikko; LESKINEN, Pekka. Complementary use of voting methods and interactive utility analysis in participatory strategic forest planning: experiences gained from western Finland. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 37, n. 5, p. 853-865, 2007.

RIBEIRO, Milton Cezar et al. The Brazilian Atlantic Forest: How much is left, and how is the remaining forest distributed? Implications for conservation. **Biological conservation**, v. 142, n. 6, p. 1141-1153, 2009.

ROCHA-SANTOS, Larissa et al. The shrinkage of a forest: Landscape-scale deforestation leading to overall changes in local forest structure. **Biological Conservation**, v. 196, p. 1-9, 2016.

ROQUE, Wallace Vargas. Mapeamento geoambiental da área urbana de Manaus-AM. 2009.

RORIZ, Pedro Augusto Costa; YANAI, Aurora Miho; FEARNSIDE, Philip Martin. Deforestation and carbon loss in Southwest Amazonia: impact of Brazil's revised forest code. **Environmental management**, v. 60, p. 367-382, 2017.

RÖTZER, Thomas et al. Urban Forest and Urban Microclimate. **Forests**, v. 14, n. 12, p. 2391, 2023.

SAATY, Thomas L. Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. **European journal of operational research**, v. 145, n. 1, p. 85-91, 2003.

SAATY, Thomas L. The analytical hierarchy process, planning, priority. **Resource allocation. RWS publications, USA**, 1980.

SADOOGHI, Seyed Ehsan; TALEAI, Mohammad; ABOLHASANI, Somaie. Simulation of urban growth scenarios using integration of multi-criteria analysis and game theory. **Land Use Policy**, v. 120, p. 106267, 2022.

SALBITANO, Fabio et al. **Guidelines on urban and peri-urban forestry**. Fao, 2016.

SARTORI, Anderson Antonio da Conceição. Análise multicritérios na definição de áreas prioritárias à conectividade entre fragmentos florestais. 2010.

SHEPARD, Donald. A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data. In: **Proceedings of the 1968 23rd ACM national conference**. 1968. p. 517-524.

SHIMABUKURO, Yosio Edemir; MAEDA, Eduardo Eiji; FORMAGGIO, Antonio Roberto. Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informações Geográficas aplicados ao estudo dos recursos agrônômicos e florestais. **Ceres**, v. 56, n. 4, 2009.

SIMONETTI, Vanessa Cezar et al. Análise da variabilidade espacial horizontal e vertical dos atributos do solo e sua relevância para o Parque Natural Chico Mendes, SP. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 7, p. 2537-2550, 2019.

SOLAR, Ricardo Ribeiro de Castro et al. How pervasive is biotic homogenization in human-modified tropical forest landscapes?. **Ecology Letters**, v. 18, n. 10, p. 1108-1118, 2015.

SOUZA, Carlos Dornels Freire de et al. Estudo espacial da hanseníase na Bahia, 2001-2012: abordagem a partir do modelo bayesiano empírico local. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 27, n. 4, p. e2017479, 2018.

SOUZA, Celso Coelho de et al. Técnicas de sensoriamento remoto como subsídios aos estudos de florestas implantadas no Brasil-Uma revisão bibliográfica. **Ciência Florestal**, v. 17, p. 409-417, 2007.

STEWART, Theodor J.; FRENCH, Simon; RIOS, Jesus. Integrating multicriteria decision analysis and scenario planning—Review and extension. **Omega**, v. 41, n. 4, p. 679-688, 2013.

SUN, Rui et al. Assessment of wetland ecosystem health in the Yangtze and Amazon River Basins. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 3, p. 81, 2017.

TAKIKAWA, Bruno Yuji et al. Proposta metodológica para elaboração de um indicador de fragilidade ambiental para fragmentos florestais. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 41, p. e170587-e170587, 2021.

TRENTIN, Gracieli; FREITAS, Maria Isabel Castreghini. Modelagem da dinâmica espacial urbana: modelo de autômato celular na simulação de cenários para o município de Americana-SP. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 62, n. 1, p. 295-305, 2010.

TROUPIN, David; CARMEL, Yohay. Landscape patterns of development under two alternative scenarios: Implications for conservation. **Land use policy**, v. 54, p. 221-234, 2016.

TURNER, Katrine Grace et al. A review of methods, data, and models to assess changes in the value of ecosystem services from land degradation and restoration. **Ecological Modelling**, v. 319, p. 190-207, 2016.

TWOHIG-BENNETT, Caoimhe; JONES, Andy. The health benefits of the great outdoors: A systematic review and meta-analysis of greenspace exposure and health outcomes. **Environmental research**, v. 166, p. 628-637, 2018.

UHDE, Britta et al. Hybrid MCDA methods to integrate multiple ecosystem services in forest management planning: a critical review. **Environmental management**, v. 56, p. 373-388, 2015.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (ORGANIZATION). Report of the Conference of the Parties on Its Nineteenth Session, Held in Warsaw from 11 to 23 November 2013: Proceedings. Part One. UN, 2014.

URIARTE, María et al. Effects of forest fragmentation on the seedling recruitment of a tropical herb: assessing seed vs. safe-site limitation. **Ecology**, v. 91, n. 5, p. 1317-1328, 2010.

URIBE, David et al. Integrating stakeholder preferences and GIS-based multicriteria analysis to identify forest landscape restoration priorities. **Sustainability**, v. 6, n. 2, p. 935-951, 2014.

VALENTE, Roberta Aversa et al. A multicriteria evaluation approach to set forest restoration priorities based on water ecosystem services. **Journal of Environmental Management**, v. 285, p. 112049, 2021.

VIANA, Virgílio M. Biologia e manejo de fragmentos de florestas naturais. **Florestas e meio ambiente: conservação e produção, patrimônio social; Trabalhos Convidados**, 1990.

VIANA, Virgílio M.; PINHEIRO, L. A. F. V. Conservação da biodiversidade em fragmentos florestais. **Série técnica IPEF**, v. 12, n. 32, p. 25-42, 1998.

VON NEUMANN, John; MORGENSTERN, Oskar. **Theory of games and economic behavior (60th Anniversary Commemorative Edition)**. Princeton university press, 2007.

WITT, Tobias; DUMEIER, Marcel; GELDERMANN, Jutta. Combining scenario planning, energy system analysis, and multi-criteria analysis to develop and evaluate energy scenarios. **Journal of Cleaner Production**, v. 242, p. 118414, 2020.

ZADEH, Lotfi A. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZHANG, Xuesong; REN, Wei; PENG, Hongjie. Urban land use change simulation and spatial responses of ecosystem service value under multiple scenarios: A case study of Wuhan, China. **Ecological Indicators**, v. 144, p. 109526, 2022.