



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

unesp 


Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

LEONARDO MASSATO NICACIO NOMURA

**GESTÃO ESTRATÉGICA DA INFRAESTRUTURA VERDE URBANA:
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA O ALCANCE DE
CIDADES SAUDÁVEIS E SUSTENTÁVEIS**

Bauru
2025



LEONARDO MASSATO NICACIO NOMURA

**GESTÃO ESTRATÉGICA DA INFRAESTRUTURA VERDE URBANA:
IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA O ALCANCE DE
CIDADES SAUDÁVEIS E SUSTENTÁVEIS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Bressane



Nomura, Leonardo Massato Nicacio.
Gestão Estratégica Da Infraestrutura Verde Urbana:
Identificação De Áreas Prioritárias Para O Alcance
De Cidades Saudáveis E Sustentáveis / Leonardo
Massato Nicacio Nomura. - Bauru, 2025
66 f.: il.

Dissertação (Mestrado)- Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Unesp), Faculdade
de Engenharia de Bauru, Bauru (SP)
Orientadora: Adriano Bressane

1. Infraestrutura Verde. 2. Lógica Fuzzy. 3. Gestão
Urbana Sustentável. 4. Serviços Ecossistêmicos. 5.
Análise Multicritério. 6. Planejamento Urbano I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia de Bauru. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LEONARDO MASSATO NICACIO NOMURA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 30 dias do mês de abril do ano de 2025, às 14h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LEONARDO MASSATO NICACIO NOMURA, intitulada **GESTÃO ESTRATÉGICA DA INFRAESTRUTURA VERDE URBANA: IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA O ALCANCE DE CIDADES SAUDÁVEIS E SUSTENTÁVEIS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ADRIANO BRESSANE (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Universidade Estadual Paulista (UNESP) - Instituto de Ciência e Tecnologia de São José dos Campos - Câmpus São José dos Campos, Prof. Assoc. ROGÉRIO GALANTE NEGRI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciência e Tecnologia do câmpus de São José dos Campos/UNESP, Prof. Dr. HENRIQUE EWBANK DE MIRANDA VIEIRA (Participação Virtual) do(a) University of North Texas. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. ADRIANO BRESSANE

Resumo

A urbanização desordenada tem resultado em impactos ambientais significativos e desafios para a saúde pública. A conversão de áreas verdes em infraestruturas urbanas pode comprometer serviços ecossistêmicos essenciais, intensificando problemas como a deterioração da qualidade de vida. Diante desse cenário, foram desenvolvidas e avaliadas duas abordagens complementares, apresentadas na forma de artigos que compõem a presente dissertação. O primeiro artigo propôs e validou um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) fundamentado em lógica fuzzy, voltado à identificação e priorização de áreas para implantação de infraestrutura verde. O segundo artigo ampliou essa perspectiva ao desenvolver um arcabouço metodológico baseado em sistemas de inferência fuzzy, direcionado à classificação de áreas urbanas conforme suas demandas específicas. A metodologia adotada incluiu uma revisão sistemática da literatura e a seleção de variáveis indicadoras para composição dos sistemas. Como parte da abordagem, foram desenvolvidos modelos computacionais de suporte à decisão, integrando lógica fuzzy e análise multicritério no ambiente de um Sistema de Informação Geográfica. Os métodos foram aplicados a estudos de caso em Jundiaí, SP, e São José dos Campos, SP, considerando diferentes condicionantes urbanos e ambientais. Os resultados demonstraram que a lógica fuzzy foi adequada para a avaliação da infraestrutura urbana existente e a identificação de áreas prioritárias para ampliação, contribuindo para a otimização da gestão dos recursos naturais e para a melhoria da qualidade de vida em áreas urbanas. Além disso, a abordagem baseada em inferência fuzzy permitiu a classificação dinâmica das áreas urbanas, viabilizando a recomendação de estratégias específicas para planejamento sustentável.

Palavras-chave: Infraestrutura Verde, Lógica Fuzzy, Gestão Urbana Sustentável, Serviços Ecossistêmicos, Análise Multicritério, Planejamento Urbano.

Abstract

Unregulated urbanization has led to significant environmental impacts and public health challenges. The conversion of green areas into urban infrastructure can compromise essential ecosystem services, exacerbating issues such as the deterioration of quality of life. In response to this scenario, two complementary approaches were developed and evaluated, presented in the form of articles that compose this dissertation. The first article proposed and validated a Decision Support System (DSS) based on fuzzy logic, aimed at identifying and prioritizing areas for green infrastructure implementation. The second article expanded this perspective by developing a methodological framework based on fuzzy inference systems, designed to classify urban areas according to their specific demands. The adopted methodology included a systematic literature review and the selection of indicator variables for system composition. As part of this approach, computational decision-support models were developed, integrating fuzzy logic and multicriteria analysis within a Geographic Information System (GIS) environment. The methods were applied to case studies in Jundiaí, SP, and São José dos Campos, SP, considering different urban and environmental constraints. The results demonstrated that fuzzy logic was suitable for evaluating existing urban infrastructure and identifying priority areas for expansion, contributing to the optimization of natural resource management and the improvement of quality of life in urban areas. Additionally, the fuzzy inference-based approach enabled the dynamic classification of urban areas, facilitating the recommendation of specific strategies for sustainable planning.

Keywords: Green Infrastructure, Fuzzy Logic, Sustainable Urban Management, Ecosystem Services, Multicriteria Analysis, Urban Planning.

SUMÁRIO

RESUMO	I
SUMÁRIO.....	III
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 OBJETIVOS	7
2.1 OBJETIVO GERAL	7
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	7
2 ARTIGO PUBLICADO	9
3 ARTIGO PUBLICADO	28
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	52
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A crescente expansão dos centros urbanos, impulsionada pela busca por melhorias em infraestrutura e condições de vida, vem promovendo profundas transformações no ambiente construído e natural. Estima-se que, até 2050, cerca de 68% da população mundial residirá em áreas urbanas (NAÇÕES UNIDAS, 2018). Essa migração, motivada por demandas como moradia, transporte, saúde, saneamento e educação (WANG et al., 2021), tem intensificado a conversão de áreas naturais em infraestrutura urbana, resultando na degradação ambiental e no agravamento de desafios relacionados à saúde pública. Problemas como poluição, perda de biodiversidade e aumento da incidência de doenças respiratórias e cardiovasculares (BRESSANE et al., 2019; RAMELI et al., 2019; LEDDA; DE MONTIS, 2019; NIEUWENHUIJSEN, 2021; YANG et al., 2021) evidenciam a necessidade urgente de estratégias sustentáveis para mitigar os impactos desse crescimento desordenado.

Historicamente, o desenvolvimento urbano tem sido pautado pela implementação de infraestruturas predominantemente cinzas, voltadas ao suporte de atividades econômicas e sociais essenciais, como comércio, produção e lazer (FERRER et al., 2018; SUN et al., 2020). Essa abordagem tradicional, ao priorizar soluções

tecnológicas e construídas para atender demandas imediatas, frequentemente negligenciou a incorporação de elementos naturais, contribuindo para a intensificação dos problemas ambientais.

Assim, há a necessidade por cidades mais equilibradas e resilientes, e essa pauta tem ampliado a necessidade por *cidades saudáveis e sustentáveis*. Segundo Silva e Pereira (2021), uma cidade saudável é caracterizada por oferecer condições adequadas para o bem-estar físico, mental e social da população, promovendo acesso universal a saneamento básico, serviços de saúde de qualidade e espaços urbanos seguros e inclusivos. Já Oliveira (2022) destaca que uma cidade sustentável tem como princípio fundamental a preservação ambiental, a gestão eficiente dos recursos naturais e a mitigação dos impactos ecológicos, garantindo qualidade de vida também para as gerações futuras. Embora esses conceitos sejam complementares, eles não são sinônimos: é possível que uma cidade apresente alta qualidade nos serviços de saúde e infraestrutura social, mas falhe em termos de sustentabilidade ambiental (COSTA; MOURA, 2023). Do mesmo modo, cidades com excelente desempenho ambiental podem não garantir equidade no acesso à saúde e bem-estar. Assim, compreender as nuances e inter-relações entre saúde urbana e sustentabilidade é essencial para a formulação de políticas públicas integradas e eficazes.

Nesse contexto, surge a Infraestrutura Verde como uma alternativa integrativa, que promove a resiliência urbana ao associar elementos naturais ao planejamento territorial (NEFEDOV, 2017). Exemplos dessa abordagem incluem a

criação de parques urbanos, arborização viária, sistemas de drenagem sustentável, como biovaletas e lagoas pluviais, e pavimentos permeáveis, os quais não apenas promovem a biodiversidade, mas também melhoram a qualidade do ar e da água, além de oferecerem espaços de lazer e bem-estar à população (KOC et al., 2017; MACHADO et al., 2020; NIEUWENHUIJSEN, 2021).

Apesar dos benefícios comprovados da Infraestrutura Verde, sua implementação em larga escala ainda é limitada. Diversos fatores dificultam sua consolidação nos processos de planejamento urbano, incluindo a priorização histórica da Infraestrutura Cinza e a maior familiaridade dos gestores públicos com seus métodos de financiamento e execução. Além disso, a percepção de que os investimentos em soluções verdes demandam retornos a longo prazo, somada à complexidade da integração dos serviços ecossistêmicos nas políticas urbanas, contribui para a resistência à adoção dessas estratégias. Embora a Infraestrutura Verde ofereça benefícios como mitigação das ilhas de calor, purificação do ar e da água e aumento da resiliência climática, barreiras institucionais e econômicas continuam favorecendo a manutenção do modelo tradicional (BENEDICT; MCMHON, 2006).

A predominância da Infraestrutura Cinza no planejamento urbano está também associada à sua capacidade de atender rapidamente às demandas urbanas e ao respaldo financeiro e político consolidado em torno de obras convencionais. Esse viés na alocação de recursos e na formulação de políticas públicas resulta em soluções de curto prazo que, muitas vezes, ignoram os impactos ambientais e sociais de longo prazo (GILL et al., 2007). Dessa forma, a transição para um modelo de

desenvolvimento urbano sustentável enfrenta desafios estruturais, exigindo uma abordagem integrada que alie infraestrutura tradicional e soluções baseadas na natureza.

A busca por um equilíbrio entre esses dois paradigmas ressalta a necessidade de ferramentas metodológicas inovadoras, capazes de auxiliar a tomada de decisão na priorização de áreas para implementação de Infraestrutura Verde. Nesse sentido, metodologias baseadas em análise multicritério e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido amplamente exploradas para avaliar a viabilidade de diferentes intervenções urbanas (MACHADO et al., 2020; LIU et al., 2018; NIKIFOROVA et al., 2019; ZHOU et al., 2018). No entanto, desafios relacionados à disponibilidade e heterogeneidade dos dados ainda persistem, dificultando a implementação de abordagens mais precisas e adaptativas. Para lidar com essas incertezas inerentes aos dados espaciais, técnicas baseadas em lógica fuzzy têm se destacado como uma solução promissora, permitindo maior precisão na identificação de áreas prioritárias para intervenções sustentáveis (MEHRYAR et al., 2017; CANIANI et al., 2016; BRESSANE et al., 2016, 2017, 2020, 2022, 2023).

A lógica fuzzy, desenvolvida inicialmente por Lotfi Zadeh em 1965, tem sido intensificado o uso nas últimas décadas, pois tem se configurado de modo a se tornar uma ferramenta para lidar com incertezas e imprecisões em processos complexos. Assim, seu uso tem sido expandido para diferentes áreas, incluindo saúde pública, agricultura de precisão, controle ambiental e, especialmente, planejamento urbano (SINGH; KUMAR; SHARMA, 2021; MENEZES et al., 2023). A principal vantagem da

lógica fuzzy reside na sua capacidade de modelar variáveis qualitativas e subjetivas de maneira mais próxima ao raciocínio humano, superando limitações dos modelos tradicionais binários (LI; ZHOU; CHEN, 2022). Portanto, se focado no planejamento de infraestrutura verde urbana, essa abordagem é particularmente adequada, pois permite integrar fatores diversos — como densidade populacional, cobertura vegetal e qualidade ambiental — que geralmente apresentam altos níveis de incerteza e variabilidade espacial (RAMOS; DIAS, 2024). Ademais, a lógica fuzzy proporciona maior flexibilidade e precisão na identificação de áreas prioritárias para ações de infraestrutura verde, resultando em decisões mais robustas e adaptáveis às especificidades locais.

1.2 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturada em dois artigos científicos que, de forma complementar, introduzem uma proposta metodológica para aprimorar a gestão sustentável da infraestrutura verde urbana. Esses artigos não apenas compartilham um eixo temático comum — o uso da lógica fuzzy para suporte à tomada de decisão —, mas também se interligam para construir uma abordagem complementar sobre como identificar, priorizar e classificar áreas urbanas para intervenções verdes estratégicas.

O primeiro artigo introduz o desenvolvimento de um Sistema Fuzzy de Suporte à Decisão (SSD), concebido para otimizar a alocação de infraestrutura verde em ambientes urbanos. A principal inovação desse estudo reside na integração de

dados geoespaciais com lógica fuzzy dentro de um Sistema de Informação Geográfica (SIG), permitindo a priorização de áreas para intervenção com base em múltiplos critérios ambientais e sociais. Essa abordagem aborda desafios metodológicos na incorporação de incertezas inerentes aos dados espaciais, refinando a capacidade de análise para identificar regiões onde a infraestrutura verde pode gerar maior impacto positivo.

O segundo artigo expande essa perspectiva ao propor um arcabouço metodológico baseado em sistemas de inferência fuzzy, que aprofunda a análise da classificação de áreas urbanas conforme demandas específicas. Enquanto o primeiro artigo foca na priorização espacial das áreas mais adequadas para infraestrutura verde, o segundo investiga quais tipologias de infraestrutura verde são mais apropriadas para cada contexto urbano analisado. Assim, essa abordagem não apenas define onde devem ser realizadas as intervenções, mas também orienta quais soluções sustentáveis são mais eficazes para atender às necessidades locais, considerando variáveis como vulnerabilidade ambiental, conectividade ecológica e impactos socioeconômicos.

Dessa forma, a dissertação introduz uma proposição metodológica que avança do diagnóstico espacial à formulação de soluções concretas para a sustentabilidade urbana. O primeiro artigo estabelece os fundamentos para a tomada de decisão baseada em análise multicritério, enquanto o segundo amplia essa lógica ao detalhar a adaptação das soluções de infraestrutura verde às características específicas de cada área urbana. Essa relação entre os dois estudos fortalece o caráter aplicado da pesquisa, fornecendo uma estrutura de suporte à decisão que pode ser replicada e ajustada para

diferentes cenários urbanos, contribuindo para o avanço das práticas de planejamento territorial sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver e avaliar uma proposição metodológica baseada em lógica fuzzy para suporte à decisão na gestão da infraestrutura verde urbana, contemplando tanto a identificação e priorização de áreas estratégicas para sua implementação quanto a classificação e recomendação de tipologias adequadas de intervenção, visando a construção de cidades mais saudáveis, resilientes e sustentáveis.

2.2 Objetivos específicos

(1) Identificar e selecionar variáveis indicadoras relevantes para a avaliação da infraestrutura verde urbana, considerando fatores ambientais, sociais e espaciais, com base em revisão bibliográfica e métodos analíticos de priorização;

(2) Desenvolver e validar um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) baseado em lógica fuzzy, integrado a um Sistema de Informação Geográfica (SIG), para a priorização de áreas urbanas que demandam intervenção por meio da infraestrutura verde;

(3) Propor e avaliar um arcabouço metodológico de inferência fuzzy para a classificação das áreas urbanas identificadas, de modo a recomendar tipologias adequadas de infraestrutura verde, alinhadas às necessidades e características específicas de cada região.

2 ARTIGO PUBLICADO

Sistema Fuzzy de Apoio à Gestão da Infraestrutura Verde Urbana

Adriano Bressane, Leonardo Massato Nicácio Nomura, Felipe Hashimoto Fengler, Líliam César de Castro Medeiros, Rogério Galante Negri

Resumo: Lidar com os desafios do rápido crescimento urbano, enquanto preserva ecossistemas e a qualidade de vida humana, é um desafio complexo e essencial para o desenvolvimento urbano sustentável. Este estudo visa apresentar um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para a gestão sustentável da Infraestrutura Verde Urbana (IVU). Considerando a urgência do desenvolvimento sustentável urbano, este SSD, desenvolvido com base em inteligência artificial (IA) fuzzy, é projetado para lidar com incertezas inerentes à integração de dados geoespaciais no ambiente computacional de um Sistema de Informação Geográfica. A seleção das variáveis e parâmetros do SSD foi realizada por meio de revisão da literatura e consulta a especialistas utilizando o método Delphi. Para demonstrar e discutir o potencial SSD, é realizado um estudo de caso sobre uma bacia hidrográfica localizada na Reserva Biológica da Serra do Japi. Os resultados indicam que o SSD constitui uma ferramenta promissora para planejadores, formuladores de políticas e pesquisadores, a qual oferece suporte a recomendações orientadas a dados e derivadas de análises de casos. Pesquisas futuras devem explorar a integração de indicadores adicionais, aprimorar o mecanismo de inferência fuzzy e estender a aplicação do SSD em diversos contextos urbanos.

Keywords: Infraestrutura verde. Cidades sustentáveis. Lógica fuzzy. Inteligência artificial

1. Introduction

No contexto contemporâneo de rápido crescimento urbano desordenado, as cidades confrontam desafios cruciais, como a fragmentação dos ecossistemas naturais, impactando adversamente a qualidade ambiental e agravando as condições de vida nas cidades (LIMA et al., 2022; ASSEDE et al., 2023; ZHENG et al., 2023). A complexidade resultante da interseção entre a conservação de recursos naturais e a gestão do uso e cobertura do solo (UCS) contribui para crises que afetam a segurança alimentar e o bem-estar humano (NÄSCHEN et al., 2019; KARIUKI et al., 2021; CUI et al., 2022).

Em resposta a esses desafios, surge o conceito de cidades mais verdes, buscando harmonizar a expansão urbana com a preservação ecológica. Para essa transformação, emerge como estratégia a Infraestrutura Verde Urbana (IVU), que abrange elementos e espaços naturais, como florestas e parques urbanos, essenciais para promover ambientes resilientes e habitáveis (ZHANG et al., 2022; BLASI et al., 2022; DEMIREL, 2023).

Estudos recentes têm focado nos desafios e estratégias para gestão da IVU, visando apoiar à preservação dos recursos hídricos, mitigação das

ilhas de calor, redução de riscos climáticos, segurança alimentar e eficiência energética (FLORES et al., 2021; OU et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2022; LIN et al., 2023). Esforços têm sido dedicados ao desenvolvimento de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) para diversas aplicações, por exemplo, a gestão da arborização urbana e a gestão participativa de espaços verdes (BRESSANE et al., 2018; LANGEMEYER et al., 2020; ZAREI; NIK-BAKHT, 2021; MASSARO et al., 2021, CARVALHO MARIA et al., 2023).

O presente estudo tem como objetivo propor o desenvolvimento de um SSD voltado à gestão sustentável de IVU baseado na análise integrada de dados geoespaciais em ambiente computacional de um sistema de informações geográficas (SIG). A fim de contornar incertezas inerentes à aquisição indireta de dados espaciais, sobretudo, quando provenientes de múltiplas fontes (LIU et al., 2018), sujeitos a variações de escala, sistemas de referência e precisão dos equipamentos (NIKIFOROVA et al., 2019), que podem ser analógicos ou digitais e com diferentes formas representação (ZHOU et al., 2018), o SSD proposto utiliza conceitos de inteligência artificial (IA) e lógica fuzzy.

Em especial, devido a sua reconhecida capacidade em lidar com incertezas, a lógica fuzzy têm sido amplamente utilizada na construção de sistemas de gestão ambiental para suporte à tomada de decisões complexas (MOCHIZUKI et al., 2016; BIAGOLINI et al., 2017; MOTA et al., 2019; SILVA et al., 2020; EWBANK et al., 2020; SPALDING et al., 2022; BRESSANE et al., 2022; GOMES et al., 2023; GOULART et al., 2023).

2. Materiais e métodos

O desenvolvimento do SSD proposto é baseado na integração de três Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF), no ambiente computacional de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) composto pelo software QGIS. Em geral o desenvolvimento dos SIF envolve duas etapas principais, sendo a primeira delas a fuzzificação das variáveis selecionadas para compor o SSD.

A seleção destas variáveis baseou-se na revisão da literatura. Para levantar os estudos correlatos utilizou-se a base Web of Science, aplicando os seguintes termos de busca: title-abs-key (“infraestrutura verde” OU “espaço verde” OU “edifício verde”) E (“cidade inteligente” OU “cidade sustentável” OU “cidade saudável”) E (“inteligência artificial” OU “lógica fuzzy” OU “aprendizado de máquina”) E (limit-to (pubstage, “final”)) E (limit-to (doctype, “ar”)) E limit-to (subjarea, “eng.” ou “env.”) E (limit-to (pubyear, “de 2015 a 2024”)).

Como resultado, foram encontrados 172 artigos. Após a exclusão dos artigos fora do escopo do estudo, foram selecionados 12 trabalhos relacionados à SSD aplicados à gestão da IVU e que por sua vez determinam o referencial teórico do sistema proposto. Ademais, os documentos selecionados permitem identificar os avanços alcançados por estudos anteriores, bem como estabelecer a base para as contribuições inovadoras pretendidas nesse estudo.

Na etapa de fuzzificação, as variáveis do sistema foram categorizadas com uso de valores linguísticos. Ao contrário de SSD baseados em lógica clássica, os SIF desenvolvidos proporcionam um mecanismo para tratar matematicamente incertezas através de transições graduais entre valores (TAVANA; HAJIPOUR, 2020). Para tanto, foram usadas funções de pertinências triangulares, amplamente utilizadas em estudos similares (JAIN; SHARMA, 2020).

A segunda etapa da modelagem fuzzy do SSD foi a construção da base de regras, com uso de SIF Tipo-1, uma extensão com maior poder expressivo e melhor capacidade de lidar com incertezas, comumente usada em diversas áreas de aplicação devido a sua flexibilidade e menor custo computacional (SILVA et al., 2020). Dessa forma, o SSD baseado em mecanismo de inferência fuzzy é capaz de emular o processo de raciocínio humano ao capturar a essência de como os especialistas tomam decisões (BIAGOLINI et al., 2017).

Os limites estabelecidos às variáveis do SSD, bem como as bases de regras aplicadas nos SIF, foram definidos por meio de um comitê de especialistas. Para isso, foi adotada a técnica Delphi, onde cada especialista apresenta de forma independente proposições que são posteriormente sintetizados por um facilitador (HSU; SANFORD 2019). Em seguida, os membros do comitê discutem e analisam um relatório síntese, atualizando suas proposições em rodadas subsequentes até alcançar um consenso. O processo preservou o anonimato, permitindo que os especialistas expressassem opiniões e promovessem discussões abertas e de alto nível sem viés.

3. Resultados e discussão

3.1 Síntese da literatura

Uma síntese dos estudos revisados é apresentada no Quadro 1. Para cada referência, é sintetizada a abordagem desenvolvida e as contribuições proporcionadas pelo estudo ao campo da gestão da IVU. Neste contexto, foi estabelecida uma base para demonstrar a originalidade e avanços pretendidos com o SSD proposto no presente estudo.

Quadro 1 – Síntese de revisão da literatura.

	Abordagem desenvolvida	Contribuição ao campo de estudo
Oliveira et al. (2022)	Potencial da Infraestrutura Verde e Azul urbana, destacando seu papel em serviços ecossistêmicos e resiliência.	Apoio à sustentabilidade, segurança hídrica e alimentar, redução do consumo de energia e contribuições para a economia circular.
Bibri (2021)	Integração de processos urbanísticos em cidades inteligentes baseadas em dados e com foco em tecnologias de análise de dados.	Exploração abrangente dos paradigmas urbanísticos e do impacto transformador da ciência de dados no planejamento e gestão do uso e cobertura do solo.
Flores et al. (2021)	Investigação do papel de governos regionais em práticas sensíveis à água na IVU.	Abordagem de desafios específicos na implementação da IVU com foco em governança regional.
Bressane et al. (2018)	Otimização da gestão da arborização urbana com ferramentas de IA para avaliação de riscos e manejo eficaz de árvores.	Enfoque na gestão eficiente da arborização urbana, utilizando inteligência artificial para melhorar práticas de manejo.
Lin et al. (2023)	Aprendizado de máquina para examinar a relação entre o padrão espacial da IVU e a intensidade da ilha de calor.	Insights para o planejamento do Uso e Cobertura do Solo considerando a relação entre IVU e ilha de calor.
Ou et al. (2022)	Proposição de método para a priorização espacial da IVU, abordando riscos decorrentes de degradação do ecossistema e mudanças climáticas.	Incorporação de estados de vulnerabilidade e risco para priorizar zonas de gestão da IVU com base na biodiversidade e serviços ecossistêmicos.
Massaro et al. (2021)	SSD para otimizar o planejamento da IVU considerando condições climáticas e padrões de ocupação.	Enfoque na otimização do design da IVU, integrando dados climáticos e de ocupação para suportar decisões de planejamento.
Langemeyer et al. (2020)	Redes Bayesianas para avaliar a demanda por serviços ecossistêmicos de telhados verdes.	Oferecimento de um modelo espacial para orientar políticas municipais eficazes para a IVU.
Zhu et al. (2022)	Conceito de Cidade Inteligente Orientada pela Felicidade, com ênfase em IVU eficiente e pública.	Destaque para o desenvolvimento centrado no ser humano, incluindo a IVU como componente essencial para promover a felicidade.
Barbosa et al. (2019)	Restauração eficaz em designs de IVU baseada em biodiversidade e serviços ecossistêmicos.	Restauração ecológica na IVU, integrando biodiversidade e serviços ecossistêmicos em um design otimizado.
Biagolini et al. (2017)	SSD baseado em lógica fuzzy para diagnóstico participativo na IVU.	Participação comunitária, integrando conhecimento técnico e compreensão local por meio de um DSS fuzzy.

Quadro 1 – Síntese de revisão da literatura.

	Abordagem desenvolvida	Contribuição ao campo de estudo
Zarei and Nik-Bakht (2021)	Quadro conceitual e um DSS para envolvimento cidadão em projetos urbanos, utilizando conjuntos fuzzy e um mecanismo de inferência fuzzy.	Promoção do envolvimento cidadão na gestão urbana, utilizando lógica fuzzy para abordar incertezas.

A revisão dos estudos anteriores revelou contribuições significativas para o aprimoramento da gestão da IVU. As pesquisas revisadas abrangeram desde a promoção de resiliência urbana até a otimização do design da IVU, em alguns casos, incorporando o uso de IA e aprendizado de máquina. Contudo, verifica-se uma lacuna, relacionada a ausência de um SSD para a gestão sustentável da IVU, orientado por dados geoespaciais da resiliência, fragilidade e do nível de perturbação da área analisada, como proposto no presente estudo

3.2 Sistema de apoio à gestão da IVU

O SIF1 foi desenvolvido para análise integrada das variáveis "Tamanho" e "Efeito de Borda", resultando no "Índice de Fragilidade" da IVU (Figura 1, Quadro 2). A seleção destas variáveis e a construção das regras que traçam relações sobre estas consideraram que fragmentos de IVU maiores e com aspecto circular tendem a proporcionar melhor resistência à estressores, diversidade de habitat, aumento da biodiversidade e estabilidade do ecossistema (GUARIS et al., 2020).

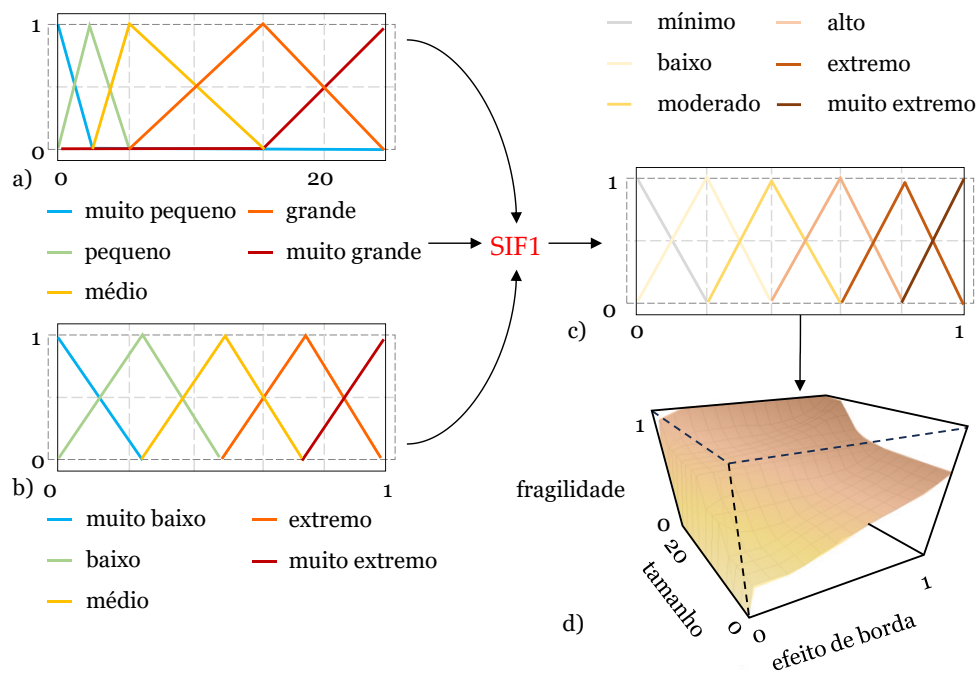


Figura 1 - SIF1: a) Tamanho; b) Efeito de borda; c) Índice de fragilidade; d) Superfície de decisão.

Quadro 2 – Base de regras do índice de fragilidade da IVU no SIF1.

		Efeito de borda				
		muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto
Tamanho	muito pequeno	moderado	alto	extremo	muito extremo	muito extremo
	pequeno	baixo	moderado	alto	extremo	muito extremo
	médio	baixo	baixo	moderado	alto	extremo
	grande	mínimo	baixo	baixo	moderado	alto
	muito grande	mínimo	baixo	baixo	baixo	moderado

Por sua vez, o SIF2 integra as variáveis "Conectividade" e "Capacidade de Suporte", resultando na variável de saída "Índice de Resiliência da IVU" (Figura 2, Quadro 3). A base lógica aplicada considerou que uma conectividade forte e uma alta capacidade de suporte contribuem para a manutenção do fluxo gênico, melhor movimento efetivo de espécies, a troca de nutrientes e a propagação da função ecológica (ABREU et al., 2014; SILVA et al., 2019).

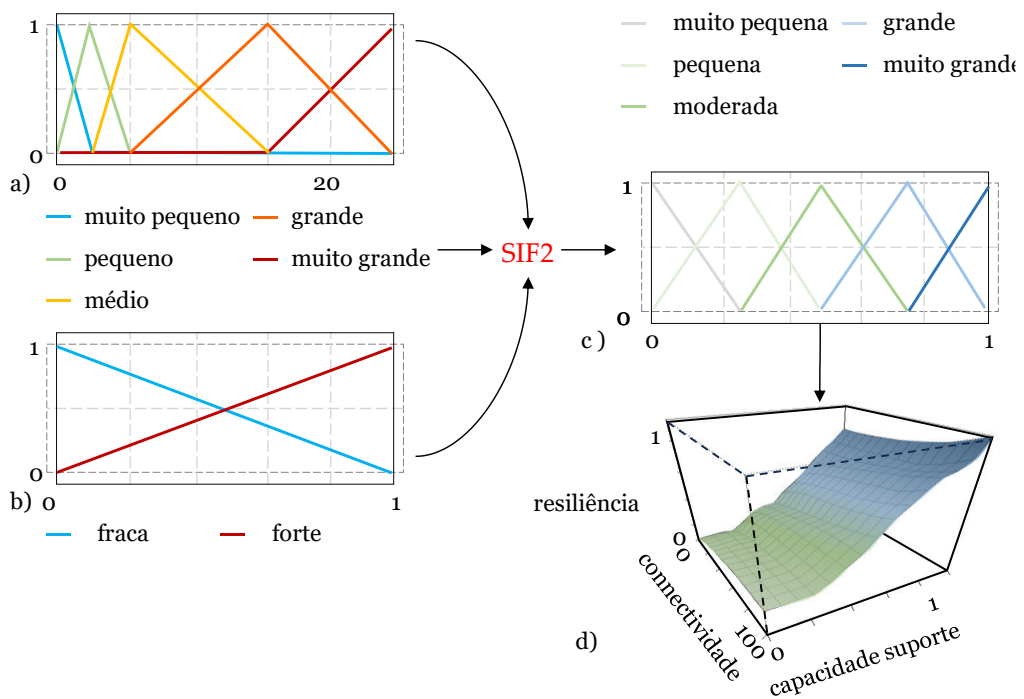


Figura 2 – SIF2: a) Conectividade; b) Capacidade suporte; c) Índice de resiliência; d) Superfície de decisão.

Quadro 3 – Base de regras do índice de resiliência da IVU no SIF2.

Conectividade	Capacidade suporte	Resiliência
muito pequena	forte	pequena
muito pequena	fraca	muito pequena
pequena	forte	pequena
pequena	fraca	muito pequena

média	forte	moderada
média	fraca	pequena
grande	forte	grande
grande	fraca	moderada
muito grande	forte	muito grande
muito grande	fraca	moderada

Por fim, o SIF3 integra as saídas do SIF1 e SIF2, resultando no "Índice de Sustentabilidade da IVU", nesse estudo considerada como a capacidade da IVU de se manter a "muito curto", "curto", "médio", "longo" ou "muito longo" prazo (Figura 3, Quadro 4). Ao sobrepor tal condição de sustentabilidade com a existência de fatores de perturbação relacionados ao uso e ocupação, sistema viário e impermeabilização do solo, com uso das operações fuzzy overlay "OR" e "GAMMA" ($\gamma = 0,5$) no SIG, o SSD resulta em recomendações para gestão sustentável da IVU (Figura 4, Quadro 5).

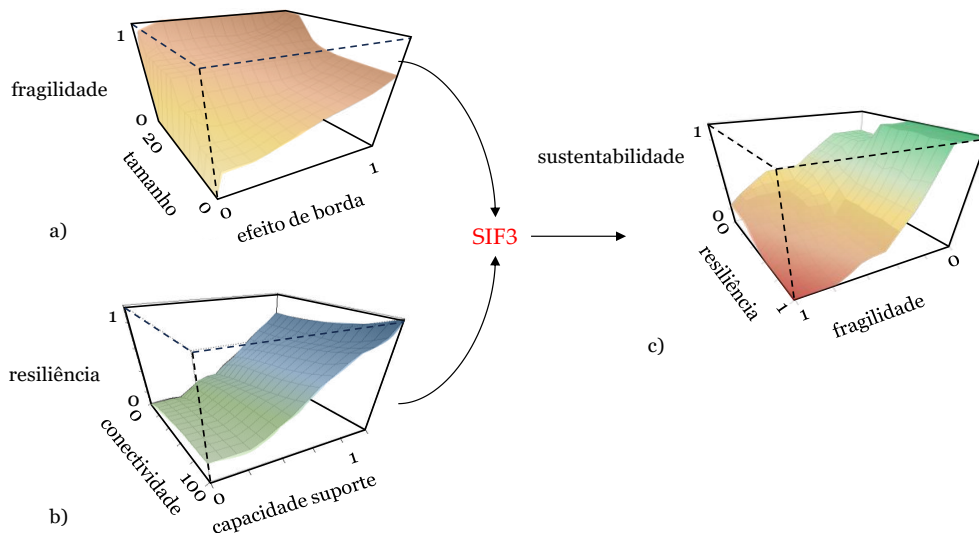


Figura 3 – SIF2: a) Índice de fragilidade; b) Índice de resiliência; c) Índice de sustentabilidade.

Quadro 4 – Base de regras do índice de sustentabilidade da IVU no SIF3.

	Resiliência					
	muito pequena	pequena	moderada	grande	muito grande	
Fragilidade	mínima	médio prazo	médio prazo	longo prazo	muito longo prazo	muito longo prazo
	mínima	médio prazo	médio prazo	médio prazo	longo prazo	muito longo prazo
	moderada	curto prazo	curto prazo	médio prazo	longo prazo	longo prazo
	alta	muito curto prazo	curto prazo	curto prazo	médio prazo	longo prazo
	extrema	muito curto prazo	muito curto prazo	curto prazo	médio prazo	médio prazo
	muito extrema	muito curto prazo	muito curto prazo	muito curto prazo	curto prazo	médio prazo

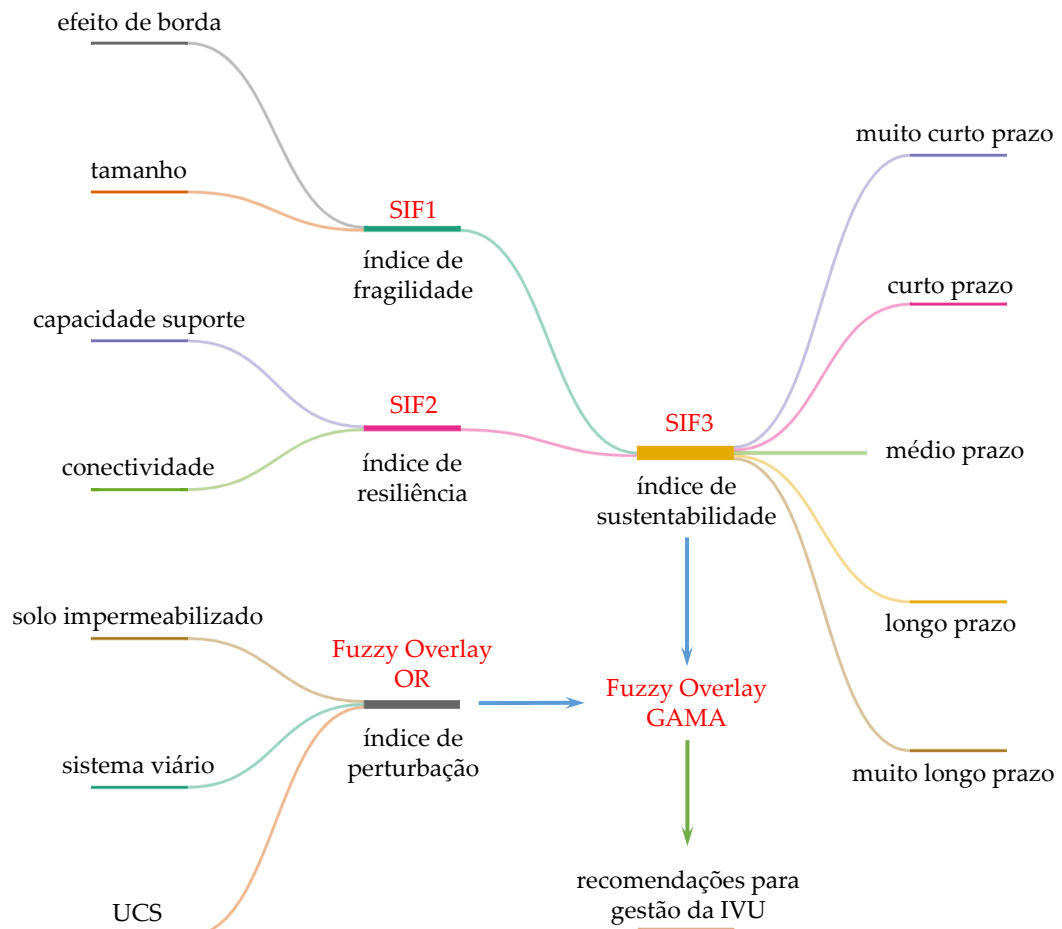


Figure 4 – Arquitetura do sistema de suporte à decisão baseado em inteligência artificial fuzzy.

Quadro 5 – Recomendações para gestão sustentável da IVU.

Saída do SIF3	Avaliação da sustentabilidade	Recomendação
---------------	-------------------------------	--------------

[0,8 1,0]	IVU com sustentabilidade de muito longo prazo; em condições que se assemelham ao estado natural.	<p>(i) criar zonas de amortecimento ao redor da IVU para mitigar possíveis perturbações externas e salvaguardar sua integridade diante da expansão urbana; (ii) implementar monitoramento regular da biodiversidade para avaliar a saúde e diversidade da flora e fauna, identificando quaisquer mudanças que possam exigir intervenção; (iii) envolver as comunidades locais por meio de programas educacionais para aumentar a conscientização sobre a importância ecológica da IVU, promovendo um senso de responsabilidade; (iv) priorizar técnicas de regeneração natural, reduzindo a intervenção humana e permitindo que o ecossistema se restaure ao longo do tempo.</p>
[0,6 0,8[IVU com sustentabilidade de longo prazo; sobre pouco efeito de perturbações, prevalecendo elementos de conservação.	<p>(i) estabelecer corredores ecológicos conectando as áreas alteradas da IVU para promover a troca genética e facilitar o movimento da flora e fauna dentro da paisagem urbana; (ii) implementar esforços direcionados de restauração para aprimorar a biodiversidade e as funções ecológicas, incluindo reflorestamento, manejo de espécies invasoras e aprimoramento de habitats; (iii) regulamentações de zoneamento que priorizem a preservação da IVU, garantindo que desenvolvimentos próximos não invadam ou degradem ainda mais sua integridade; (iv) integrar a IVU no planejamento urbano, criando espaços multifuncionais que equilibrem as necessidades humanas com a preservação ecológica.</p>

[0,4 0,6[IVU com sustentabilidade de médio prazo; em estado impactado por perturbações, com conservação limitada.	<p>(i) recuperação das áreas degradadas com ações que priorizem a recomposição com espécies vegetais nativas, visando restabelecer a funcionalidade do ecossistema e promover a biodiversidade; (ii) executar planos de controle de espécies invasoras para mitigar a propagação de espécies não nativas que poderiam degradar ainda mais a integridade ecológica da Infraestrutura Verde Urbana (IVU) moderadamente alterada; (iii) estabelecer corredores verdes e ligações conectando as áreas da IVU, fomentando o fluxo genético e melhorando as oportunidades de movimentação para a fauna em áreas urbanas; (iv) integrar a IVU aos frameworks de planejamento urbano, garantindo que o desenvolvimento circundante leve em consideração seu valor ecológico; (v) envolver as comunidades locais por meio de programas participativos, educando os residentes sobre a importância da IVU e os envolvendo em esforços de conservação.</p>
[0,2 0,4[IVU com sustentabilidade de curto prazo; exhibe características de forte efeito de fontes de perturbação.	<p>(i) reabilitar essas áreas da IVU altamente alteradas, reintroduzindo espécies nativas e restaurando as funções naturais do ecossistema; (ii) implementar técnicas de design de IVU que aproveitem soluções tecnológicas para aprimorar serviços ecossistêmicos, como gestão de águas pluviais, purificação do ar e redução de ruídos; (iii) executar estrategicamente iniciativas de reflorestamento urbano que visem o estabelecimento de vegetação nativa dentro das áreas alteradas da IVU para aprimorar a biodiversidade e a resiliência do ecossistema; (iv) construir melhorias de habitat, como locais de nidificação para aves e habitats para insetos, para promover o retorno da biodiversidade e apoiar o restabelecimento dos processos do ecossistema; (v) realizar uma avaliação abrangente dos serviços ecossistêmicos fornecidos por essas áreas alteradas da IVU, quantificando seus benefícios para o ambiente urbano e defendendo sua preservação.</p>

[0,0 0,2[IVU com sustentabilidade de muito curto prazo; sob efeito extremo de fontes de perturbação.	<p>(i) desenvolver planos abrangentes de restauração do ecossistema que enfatizem o uso de espécies vegetais nativas e foquem na restauração de processos ecológicos que apoiam o restabelecimento das funções essenciais do ecossistema; (ii) implementar soluções avançadas de infraestrutura ecológica, como sistemas de biofiltração e áreas úmidas artificiais, para mitigar os impactos da vegetação alterada, melhorando a qualidade da água e a regulação climática urbana; (iii) projetar e implementar iniciativas de criação de habitat que atendam a espécies selvagens específicas adaptadas às condições urbanas, visando apoiar a biodiversidade local e promover a conectividade de habitats; (iv) transformar áreas altamente alteradas da IVU em projetos de regeneração de áreas degradadas, utilizando técnicas inovadoras para revitalizar esses espaços enquanto integra usos sustentáveis da terra; (v) lançar campanhas abrangentes de engajamento público para conscientizar sobre a necessidade crítica de preservar e reabilitar essas áreas alteradas da VU, envolvendo comunidades em esforços ativos de restauração.</p>
-----------	---	--

3.3 Estudo de caso

Para demonstrar e discutir seu potencial, o sistema proposto foi aplicado à análise da IVU na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim, localizada na Reserva Biológica da Serra do Japi, Estado de São Paulo (SP), Brasil (Figura 5).

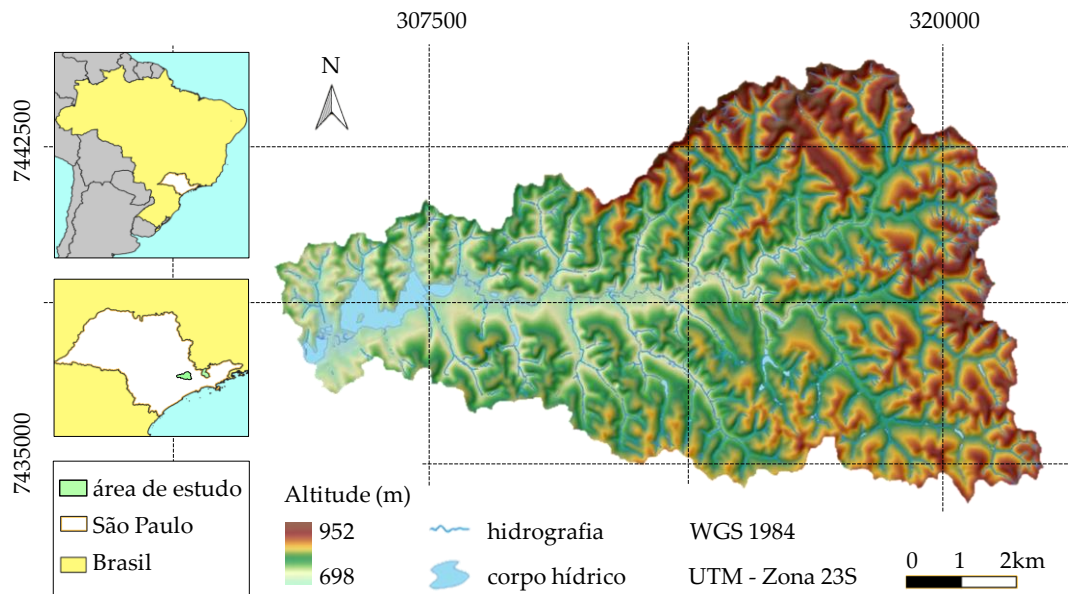


Figura 5 – Área de estudo – bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim.

Apesar de situada na zona de amortecimento da Reserva Biológica da Serra do Japi, um território especialmente protegido, a área tem sido impactada com a crescente supressão de seus remanescentes florestais ao longo das últimas décadas, um cenário crítico que requer atenção para gestão sustentável do uso da terra (LIMA et al., 2023). Para este estudo de caso, foi utilizado um banco de dados abrangendo imagens aéreas e orbitais, juntamente com dados geoespaciais de uso e cobertura do solo. Esses dados foram estruturados em formato vetorial (i.e., shapefile), garantindo interoperabilidade entre diferentes plataformas de SIG. Então, mapas sintéticos compostos de métricas da paisagem e pelo mapeamento das fontes de perturbação na área foram gerados por geoprocessamento (Quadro 6).

Quadro 6 – Ponderação das fontes de perturbação.

UCS	Peso*	UCS	Peso*
agroindústria	0,1	moradia de alta densidade	0,1
culturas agrícolas	0,5	moradia de baixa densidade	0,1
bosque	0,8	pastagem	0,5
gramado	0,3	pastagem com solo exposto	0,3
industrial	0,1	pasto sujo	0,6
loteamento industrial	0,1	piscicultura	1,0
loteamento para moradia	0,1	reflorestamento	1,0
macega	0,9	represa	1,0
mata	1,0	silvipastoril	0,7
mineração	0,1	solo exposto	0,1
mina em recuperação	0,2	várzea	1,0

* valores mais próximos de 1 indicam menor potencial de perturbação.

As métricas da paisagem incluíram o cálculo das distâncias entre fragmentos florestais e fontes de perturbação, normalizadas em uma escala de 0 (fragmentos diretamente adjacentes às fontes de perturbação)

a 1 (fragmentos situados a 200 metros ou mais de distância). A capacidade de suporte foi classificada considerando os potenciais e restrições relacionados ao uso da terra. Um raio de 100 metros ao redor de todas as unidades de IVU foi estabelecido para a construção do indicador de conectividade, vinculando distâncias à unidade mais próxima. Maior isolamento correspondeu a condições locais de resiliência mais adversas. O tamanho de cada IVU foi calculado, e a distância euclidiana dentro de uma zona de amortecimento de 30 metros simulou o efeito de decaimento da perturbação à medida que a distância da fonte aumenta. O efeito de borda da IVU foi determinado pelo cálculo da circularidade. Os principais resultados estão apresentados na Figura 6.

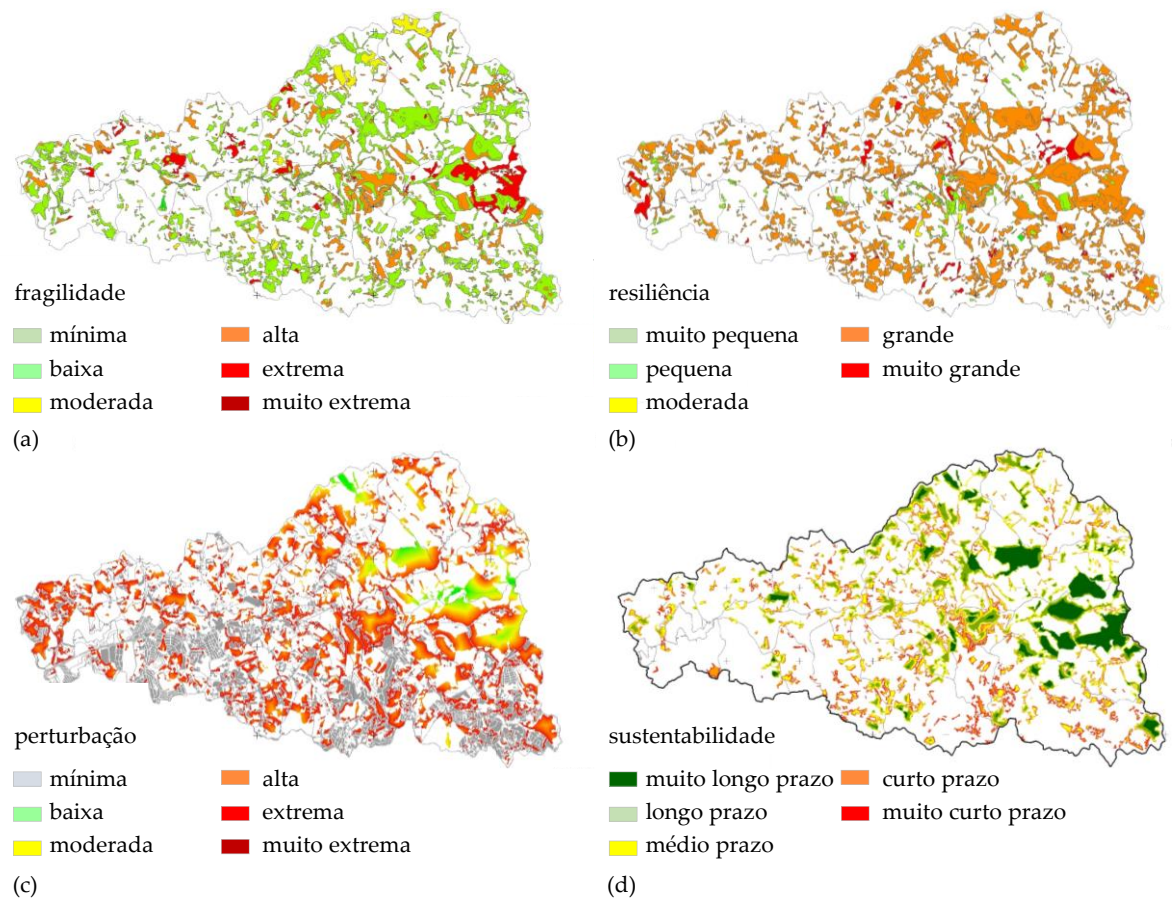


Figura 6 – IVU: (a) fragilidade baseada no SIF1, (b) resiliência baseada no SIF2, (c) perturbação baseada na sobreposição fuzzy - OR, e (d) sustentabilidade baseada no SIF3.

Os resultados proporcionados pelo SSD proposto foram satisfatórios, produzindo classificações pertinentes para unidades homogêneas e resultando em segmentação adequada nos procedimentos de síntese cartográfica. Tal como esperado, é possível verificar que os resultados do SIF2 foram influenciados pela capacidade de suporte dentro de cada unidade de IVU, dada pela proximidade de fragmentos florestais dentro de um determinado perímetro de referência. A abordagem baseada em análises vetoriais no ambiente SIG também foi satisfatória durante o geoprocessamento, respeitando como esperado as restrições pertinentes a capacidade suporte e a ponderação dos fatores de perturbação no entorno.

O operador fuzzy OR, destacou adequadamente tais perturbações existentes sobre área de estudo. Essa abordagem garantiu que a saída

resultante não apenas incorporasse as particularidades espaciais da IVU, mas também enfatizasse de forma robusta as condições em seu entorno. Como resultado da integração desses aspectos intrínsecos a IVU e do seu entorno com uso da operação Fuzzy Overlay GAMMA, o SSD proposto resultou em recomendações para gestão sustentável da IVU, as quais podem ser visualizadas na representação espacial da Figura 7.

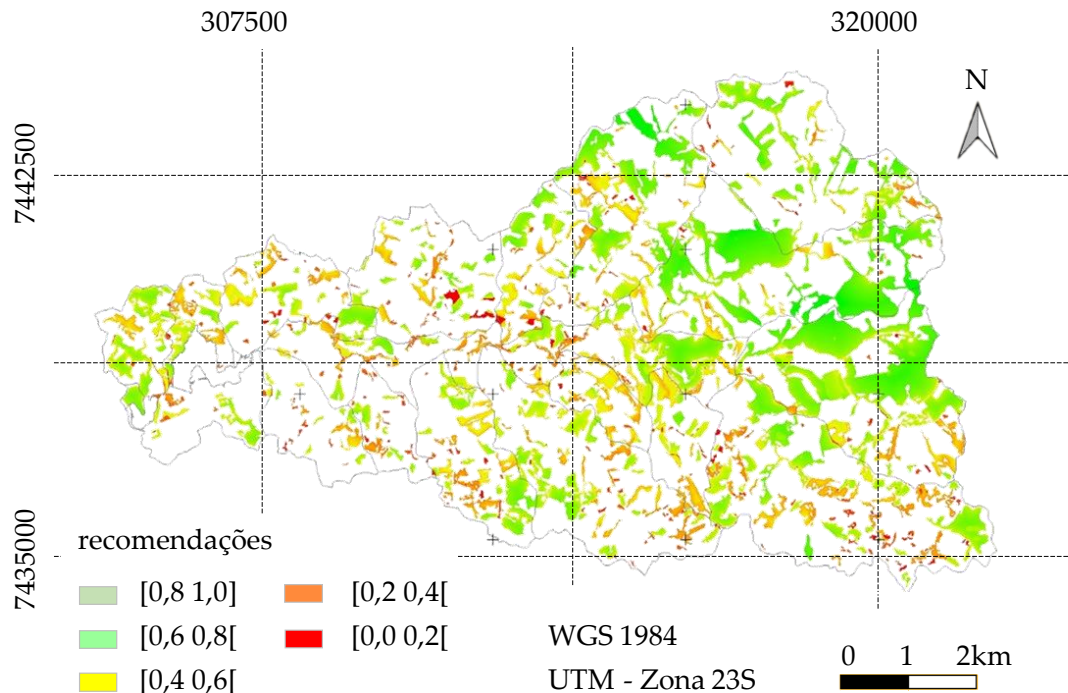


Figura 7 - Recomendações para gestão sustentável da IVU na área de estudo.

Em geral, o SSD proposto apresentou resultados pertinentes, demonstrando robustez e aderência compatíveis com os princípios da lógica fuzzy no domínio de análises geoespaciais, proporcionando uma abordagem capaz de integrar a influência de fatores de perturbação aos indicadores de fragilidade e resiliência. Logo, o estudo de caso demonstrou o potencial do SSD proposto como ferramenta aplicável a gestão sustentável da IVU.

4. Conclusões

Este estudo contribuiu para o complexo desafio da gestão sustentável da IVU. O SSD baseado em IA fuzzy destacou-se como uma ferramenta promissora, capaz de apoiar tomada de decisões orientada por dados, ao fornecer recomendações estratégicas por meio de análises “caso a caso”. Logo, é válido concluir que o sistema proposto tem potencial de orientar urbanistas e formuladores de políticas públicas na promoção de ambientes urbanos que asseguram o equilíbrio ecológico ao mesmo tempo em que viabilizam o bem-estar social e a prosperidade econômica. Estudos futuros podem aprimorar a abrangência do SSD através da integração de novos indicadores e fontes de dados adicionais. Esforços para refinar os SIF propostos devem ser realizados levando em consideração relações mais intrincadas entre as variáveis. Além disso, estender a aplicação do SSD a diferentes contextos urbanos contribuiriam para consolidar a validação da sua eficácia e versatilidade.

Referências

ABREU, Karla Maria Pedra; COUTINHO, Luciano Melo. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. **Revista Vértices**, v. 16, n. 1, p. 177-202, 2014.

ASSEDE, Eméline et al. Understanding drivers of land use and land cover change in Africa: a review. **Current Landscape Ecology Reports**, p. 1-11, 2023.

BARBOSA, Ana et al. Cost-effective restoration and conservation planning in Green and Blue Infrastructure designs. A case study on the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean: Andalusia (Spain)–Morocco. **Science of the Total Environment**, v. 652, p. 1463-1473, 2019.

BIBRI, Simon Elias. Data-driven smart sustainable cities of the future: An evidence synthesis approach to a comprehensive state-of-the-art literature review. **Sustainable Futures**, v. 3, p. 100047, 2021.

BLASI, S.; GANZAROLI, A.; DE NONI, I. Smartening sustainable development in cities: Strengthening the theoretical linkage between smart cities and SDGs. **Sustainable Cities and Society**, v. 80, p. 103793, 2022.

BRESSANE, Adriano et al. Neuro-fuzzy modeling: a promising alternative for risk analysis in urban afforestation management. **Revista Árvore**, v. 42, 2018.

BRESSANE, Adriano et al. Fuzzy artificial intelligence – Based model proposal to forecast student performance and retention risk in engineering education: An alternative for handling with small data. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14071, 2022.

BIAGOLINI, Carlos H., et al. Fuzzy-based methodological proposal for participatory diagnosis in the linear parks management. **Ecological Indicators**, v. 80, p. 153-162, 2017.

CARVALHO MARIA, Tamara Ribeiro Botelho et al. Application of artificial intelligence for tree risk assessment optimization in Itanhaém–São Paulo, Brazil. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 81, p. 127844, 2023.

CHENG, Haojie et al. Water requirement of Urban Green Infrastructure under climate change. **Science of The Total Environment**, v. 893, p. 164887, 2023.

CUI, Jian et al. Land use/land cover change and their driving factors in the Yellow River Basin of Shandong Province based on google earth Engine from 2000 to 2020. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 11, n. 3, p. 163, 2022.

DEMIREL, Demokaan. The Impact of Managing Diversity on Building the Smart City A Comparison of Smart City Strategies: Cases from Europe, America, and Asia. **SAGE Open**, v. 13, n. 3, p. 21582440231184971, 2023.

EWBANK, Henrique et al. Sustainable resource management in a supply chain: a methodological proposal combining zero-inflated fuzzy time series and clustering techniques. **Journal of Enterprise Information Management**, v. 33, n. 5, p. 1059-1076, 2020.

FLORES, Cesar Casiano; VIKOLAINEN, Vera; CROMPVOETS, Joep. Governance assessment of a blue-green infrastructure project in a small size city in Belgium. The potential of Herentals for a leapfrog to water sensitive. **Cities**, v. 117, p. 103331, 2021.

GOMES, Isadora G., et al. Computer-aided classification of successional stage in subtropical Atlantic Forest: A proposal based on fuzzy artificial intelligence. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 1, p. 184, 2023.

GOULART, Anna P. G., et al. A Non-Hybrid Data-Driven Fuzzy Inference System for Coagulant Dosage in Drinking Water Treatment Plant: Machine-Learning for Accurate Real-Time Prediction. **Water**, v. 15, n. 6, p. 1126, 2023.

GUARIZ, Hugo Roldi; GUARIZ, Francisco Roldi. Avaliação do tamanho e forma de fragmentos florestais por meio de métricas de paisagem para o Município de São Roque do Canaã, Noroeste do Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 05, p. 2193-2153, 2020.

HALDER, Bijay et al. Assessment of urban green space dynamics influencing the surface urban heat stress using advanced geospatial techniques. **Agronomy**, v. 12, n. 9, p. 2129, 2022.

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

JAIN, Arpit; SHARMA, Abhinav. Membership function formulation methods for fuzzy logic systems: A comprehensive review. **Journal of Critical Reviews**, v. 7, n. 19, p. 8717-8733, 2020.

KARIUKI, Rebecca W. et al. Integrating stakeholders' perspectives and spatial modelling to develop scenarios of future land use and land cover change in northern Tanzania. **PloS One**, v. 16, n. 2, p. e0245516, 2021.

LANGEMEYER, Johannes et al. Creating urban green infrastructure where it is needed—A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. **Science of the total environment**, v. 707, p. 135487, 2020.

LIMA, Carlos Eduardo Sousa et al. Anthropic Changes in Land Use and Land Cover and Their Impacts on the Hydrological Variables of the São Francisco River Basin, Brazil. **Sustainability**, v. 14, n. 19, p. 12176, 2022.

LIMA, Luciana Zignani Barroso et al. PRESSURE-STATE-RESPONSE MODEL FOR ASSESSING ENVIRONMENTAL IMPACTS IN SERRA DO JAPI. **Journal of Interdisciplinary Debates**, v. 4, n. 03, p. 119-127, 2023.

LIN, Jinyao et al. Measuring the relationship between morphological spatial pattern of green space and urban heat island using machine learning methods. **Building and Environment**, v. 228, p. 109910, 2023.

LIU, Xiaoping et al. Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 32, n. 4, p. 738-756, 2018.

MASSARO, Alessandro et al. Innovative DSS for intelligent monitoring and urban square design approaches: A case of study. **Sustainable Cities and Society**, v. 65, p. 102653, 2021.

MOCHIZUKI, Patricia S., et al. A system for evaluating the impact of noise pollution on the population's health. **Cadernos de saúde pública**, v. 32, 2016.

MOTA, Maurício Tavares da et al. Classification of successional stages in Atlantic forests: a methodological approach based on a fuzzy expert system. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 519-530, 2019.

NÄSCHEN, Kristian et al. The impact of land use/land cover change (LULCC) on water resources in a tropical catchment in Tanzania under different climate change scenarios. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 7083, 2019.

NASSARY, Eliakira Kisetu et al. Exploring urban green packages as part of Nature-based Solutions for climate change adaptation measures in rapidly growing cities of the Global South. **Journal of Environmental Management**, v. 310, p. 114786, 2022.

NIKIFOROVA, A. et al. Multi-scale soil-landscape maps as the basis of geographic information systems for soil melioration. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2019. p. 012038.

OLIVEIRA, Jose A. Puppim et al. Innovations in Urban Green and Blue Infrastructure: Tackling local and global challenges in cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 362, p. 132355, 2022.

OU, Xiaoyang et al. Integrated multi-hazard risk to social-ecological systems with green infrastructure prioritization: A case study of the Yangtze River Delta, China. **Ecological Indicators**, v. 136, p. 108639, 2022.

SILVA, Alessandra Leite da et al. Classification of urban forest fragments based on landscape metrics. **Ciência Florestal**, v. 29, p. 1254-1269, 2019.

SILVA, Patricia M., et al. Fuzzy-based computational intelligence to support screening decision in environmental impact assessment: A complementary tool for a case-by-case project appraisal. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 85, p. 106446, 2020.

SPALDING, Mariane, et al. Fuzzy artificial intelligence—Based model proposal to forecast student performance and retention risk in engineering education: An alternative for handling with small data. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14071, 2022.

TAVANA, Madjid; HAJIPOUR, Vahid. A practical review and taxonomy of fuzzy expert systems: methods and applications. **Benchmarking: An International Journal**, v. 27, n. 1, p. 81-136, 2020.

ZAREI, Farzaneh; NIK-BAKHT, Mazdak. Citizen engagement body of knowledge–A fuzzy decision maker for index-term selection in built environment projects. **Cities**, v. 112, p. 103137, 2021.

ZHANG, Dan et al. Big data analytics, resource orchestration, and digital sustainability: A case study of smart city development. **Government information quarterly**, v. 39, n. 1, p. 101626, 2022.

ZHENG, Fangyu et al. Impact of armed conflict on land use and land cover changes in global border areas. **Land Degradation & Development**, v. 34, n. 3, p. 873-884, 2023.

ZHOU, Guoqing et al. Vector and Raster Data Storage based on Morton Code. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 2523-2526, 2018.

ZHU, Huiying et al. How can smart city shape a happier life? The mechanism for developing a Happiness Driven Smart City. **Sustainable cities and society**, v. 80, p. 103791, 2022.

3 ARTIGO PUBLICADO

Identifying Priority Areas for Urban Green Infrastructure Planning: A Fuzzy Artificial Intelligence - Based Framework

Leonardo Massato Nicacio Nomura, Adriano Bressane, Vitoria Valente Monteiro, Inara Vilas Boas de Oliveira, Grazielle Ruas, Rogério Galante Negri, Alexandre Marco da Silva

Abstract: Urban green infrastructure (UGI) plays a key role in fostering sustainability, resilience, and ecological balance in cities. However, the task of identifying priority areas for UGI implementation remains complex due to the multifactorial nature of urban systems and prevailing uncertainties. This study proposes a fuzzy inference system (FIS)-based framework composed of seven interconnected modules designed to assess diverse criteria, including flood vulnerability, water quality, habitat connectivity, vegetation condition, and social vulnerability. The model was applied in the urban watersheds of São José dos Campos, Brazil, a municipality recognized for its smart city initiatives and urban environmental complexity. Through the integration of multi-criteria spatial data, the framework effectively prioritized urban areas, highlighting critical zones for extreme event mitigation, water quality preservation, habitat conservation, and recreational space provision. The case study demonstrated that São José dos Campos, with an 11.73% urbanized area and 737,310 inhabitants, benefits from targeted UGI typologies, including sustainable drainage systems and green public spaces, aligning infrastructure interventions with specific spatial demands. Notably, the expert validation process involving 18 multidisciplinary specialists confirmed the model's relevance and coherence, with the majority classifying the outcomes as "highly coherent". The system's modular structure, use of triangular membership functions, and incorporation of the gamma operator allow for adaptable prioritization across different planning horizons. By offering a transparent, expert-validated, and data-driven approach, the proposed method advances evidence-based decision-making and equips planners with a practical tool for UGI implementation in dynamic urban contexts.

Keywords: Greener and Healthier Cities; Human well-being; Urban Resilience; Sustainability.

Introduction

As the global population increasingly migrates to urban centers, cities are undergoing transformative changes. These transformations are further intensified by the escalating impacts of climate change, which demand adaptive urban strategies integrated into spatial planning frameworks. This urban shift demands a multifaceted infrastructure to support essential aspects of city life, such as housing, sanitation,

transportation, and healthcare services. Recent studies highlight the pivotal role of such infrastructure in creating environments conducive to human habitation [1,2]. However, the expansion of so-called gray infrastructure often encroaches upon urban green spaces, posing significant risks to environmental quality and public health [3,4]. This reduction in green spaces underscores the importance of identifying priority areas for urban green infrastructure (UGI) planning, a critical endeavor for city planners and policymakers.

UGI represents man-managed natural systems designed to be seamlessly integrated into the urban fabric, including, but not limited to, parks, afforestation areas, stormwater management systems, and green roofs. These elements play a dual role: they are essential for ecological sustainability and serve as spaces for recreation, thus playing a significant social role [5,6]. UGI typologies can be broadly categorized into four groups: vegetated surfaces (e.g., parks, green roofs, green facades), water management systems (e.g., bioswales, vegetated pavements, stormwater wetlands, water circulation systems integrated into urban public spaces), biodiversity corridors (e.g., urban forests, ecological strips), and social-nature interfaces (e.g., community gardens, green plazas). These elements often overlap with Nature-Based Solutions (NBSs) and are most effective when interwoven with gray infrastructure, such as roads, drainage, and energy systems. Recognizing the hybrid nature of these infrastructures is crucial for spatial planning, as urban resilience depends on the co-functioning of green and gray systems. By enhancing environmental quality and expanding the provision of ecosystem services, UGI is fundamental in preserving biodiversity, conserving natural resources, and improving residents' well-being, all of which contribute to the development of healthier and more sustainable urban environments [7].

Despite the recognized importance of UGI, urban planning faces inherent complexities that demand sophisticated decision-making processes capable of balancing diverse objectives and constraints. A notable gap exists in the development of systematic frameworks for identifying priority areas for UGI, crucial for its strategic planning. Current methodologies often fail to address the multifaceted interplay of factors and uncertainties that characterize urban planning [8]. The lack of a comprehensive, data-driven approach capable of dealing with these uncertainties may lead to suboptimal resource allocation, thereby diminishing the potential positive impacts of urban planning interventions. Addressing this challenge, our research introduces an innovative framework centered on the fuzzy inference system (FIS), a distinguished branch of artificial intelligence noted for its exceptional handling of uncertainties. This framework distinguishes itself from conventional AI technologies and decision-support systems through its unique capacity to process imprecise, ambiguous, or subjective information, which is a common challenge in the realm of urban planning.

The FIS leverages fuzzy logic to closely mirror human reasoning [9], presenting a significant advantage in urban green infrastructure (UGI) planning compared with traditional AI that depends on binary logic. This approach excels in managing the qualitative, nuanced data characteristic of UGI planning, enabling a structured decision-making process that accommodates diverse variables and stakeholder perspectives [10]. This adaptability is essential in UGI planning, aiming to balance ecological sustainability with urban development amidst uncertainties. Unlike other AI technologies requiring large, quantifiable datasets, the FIS integrates

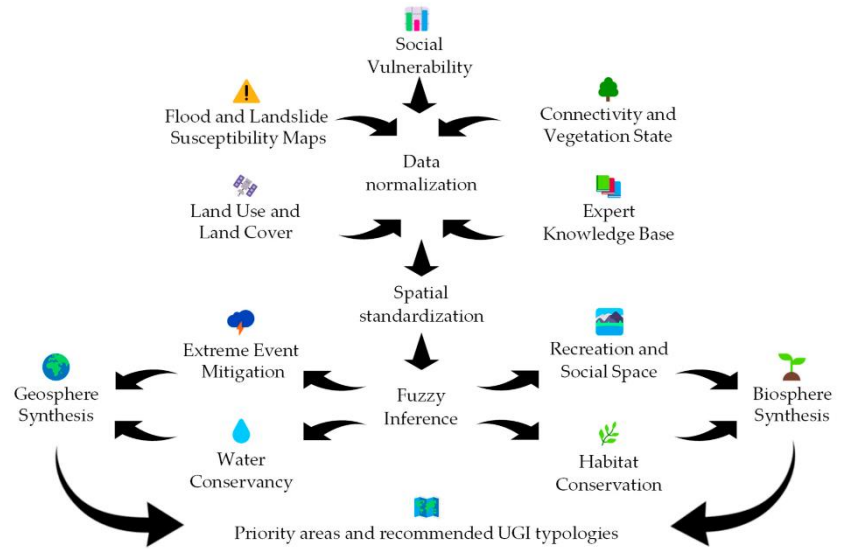
expert knowledge directly into the decision-making process [9]. This integration is crucial in UGI planning, necessitating expertise across ecology, urban design, and public policy fields. As such, the FIS-based framework is uniquely suited for addressing the complexities of UGI planning, providing a nuanced, inclusive decision-making approach that aligns with the varied values and priorities of urban communities. This method signifies a notable advancement in developing resilient, sustainable urban environments.

This study contributes novel advancements to the field in several key aspects. First, it proposes an integrated, multi-criteria FIS-based framework capable of accommodating both biosphere and geosphere demands—an approach not yet operationalized in prior UGI studies. Second, unlike conventional data-driven models that require extensive, high-resolution datasets or operate as opaque “black-box” systems, our model combines fuzzy logic with expert-derived rules to enable transparency, interpretability, and adaptability across varying data conditions. Third, the modular architecture of the seven interconnected FISs enables planners to generate flexible prioritization scenarios through the tuning of the gamma operator, supporting short-, medium-, and long-term strategies. These contributions address persistent gaps in scalability, uncertainty management, and typology specificity, thus offering a robust alternative to existing DSS approaches in UGI planning [10].

Our objectives include: (i) highlighting the necessity for a data-driven framework in identifying priority UGI planning areas amidst uncertainties; (ii) introducing an FIS-based model to identify such areas and suggest appropriate UGI typologies based on specific urban demands; (iii) implementing and validating this framework in a real-world urban context to provide practical insights; and (iv) offering a decision-support tool to enhance urban sustainability and resilience through informed UGI planning.

This paper was structured into five main sections: “Related Works”, presents a literature review contextualizing the study; “Theoretical Background”, introduces key fuzzy logic concepts underlying the model [9]; “Fuzzy Inference System Modeling”, details the design of the FIS-based framework; “Application of the Proposed Framework”, demonstrates real-world validation; and “Final Remarks”, discusses the implications and potential of the proposed framework in advancing UGI planning and sustainability. Figure 1 presents a flowchart detailing each step of the proposed framework.

Figure 1. Flowchart of the proposed research framework.



2. Related Works

To search for the most reliable, relevant, and up-to-date related works, the Science Direct, Scopus, and Web of Science databases were used, in which the following query was applied: title-abs-key (“green infrastructure” or “green space” or “green building”) and (“sustainable city” or “healthy city”) and (“artificial intelligence” or “fuzzy system”) and (limit-to (pubstage, “final”)) and (limit-to (doctype, “ar”)) and limit-to (subarea, “eng.” or “env.”) and (limit-to (pub year, “from 2014 to 2023”)) and (limit-to (language, “English”)). Thus, 181 articles were found and preliminarily screened. After excluding those outside the scope, eight works related to DSS to face challenges associated with the management of UGI were selected and are discussed below.

Several research studies have emerged in the domain of UGI planning. Table 1 highlights the diversity of methodologies applied in UGI planning and their respective limitations. While each approach offers unique advantages, they also present challenges that need to be considered when implementing UGI projects, such as bias from expert input, potential oversimplification, data requirements, interpretability issues, and the complexity of integrating diverse data sources and expert

knowledge.

Table 1. Methodologies applied in UGI planning and respective limitations.

Study	Methodology	Limitations in UGI Planning
Bagatini et al. (2018)	Neuro-Fuzzy Adaptive Inference System	Reliance on expert input for criteria weighting may introduce bias.
Carvalho Maria et al. (2023)	Decision Tree Algorithm	May overlook subtle patterns due to simplicity; potential oversimplification.
Lin et al. (2023)	Machine Learning Techniques	Requires extensive data for training; can be difficult to interpret ("black box").
Biagolini et al. (2017)	Fuzzy-Based Decision Support Systems	Subjective set and rule base construction could lead to variability in outcomes.
Zarei and Nik-Bakht (2021)	Fuzzy-Based DSS and Conceptual Framework	Similar to Biagolini et al. (2017), with added complexity in integrating inputs.
Barbosa et al. (2019)	Computer-Aided Tool	May not fully account for dynamic changes or urban development over time.
Massaro et al. (2021)	Decision Support System Optimizing	High dependency on accurate, real-time data.
Langemeyer et al. (2020)	Bayesian Belief Networks	Need for deep domain expertise and computational resources.

Bressane et al. [11] and Carvalho Maria et al. [12] concentrated on optimizing urban afforestation management. Bressane et al. [11] employed a combination of an Analytical Hierarchy Process and a Neuro-Fuzzy Adaptive Inference System to assess tree falling risks, while Carvalho Maria et al. [12] utilized the decision tree algorithm to achieve the same objective, utilizing artificial intelligence tools to detect tree issues and enhance management practices.

Lin et al. [13] applied machine learning techniques to analyze the relationship between UGI spatial patterns and heat island intensity, revealing that green space characteristics significantly impact heat island intensity and providing valuable insights for land use and land cover (LULC) planning.

Numerous other research studies with diverse focuses and methodologies have also emerged. Bressane et al. [14] introduced a fuzzy-based DSS for participatory UGI management, merging technical expertise with community insights, promising enhanced participatory linear park management.

Similarly, Zarei and Nik-Bakht [15] proposed the same approach to integrate citizen engagement into urban projects, facilitating knowledge extraction from the literature for new initiatives by researchers and

practitioners. Barbosa et al. [16] proposed an innovative approach for selecting cost-effective areas for UGI restoration, employing a computer-aided tool to identify management zones within green and blue infrastructure that align with various conservation objectives, aiming for an optimal spatial UGI design that balances biodiversity protection and the delivery of ecosystem services.

Massaro et al. [17] presented a DSS optimizing UGI design using climatic data, environmental sensing, and occupancy patterns, incorporating computer vision techniques. Langemeyer et al. [18] harnessed Bayesian Belief Networks to assess demand for ecosystem services (ESs) from green roofs, offering insights for local policy, particularly regarding the effectiveness of UGI in delivering ESs.

In addition to the approaches discussed above, recent advances in multi-criteria decision-making (MCDM) further support prioritization efforts in complex systems. For instance, methods based on the Analytic Hierarchy Process (AHP) have been employed to evaluate suitability for sustainable construction and land use planning [19,20]. Furthermore, hybrid fuzzy models—such as the hesitant fuzzy VIKOR—have demonstrated improved ranking capabilities in medical and spatial domains [21]. These studies underscore the flexibility of MCDM tools and inform the positioning of our FIS-based approach as a robust alternative that balances interpretability, adaptability, and data-driven rigor.

While the literature review reveals extensive research on UGI management and data-driven decision-making, existing approaches often struggle to handle the intricate interactions of various factors and uncertainties inherent in UGI planning, particularly when using a Geographic Information System (GIS). GIS analyses frequently involve indirect spatial data acquisition and rely on multisource data [22], which can vary in scale, reference system, and equipment precision [23]. Data can be either analog or digital, and the representation can be raster- or vector-based [24]. Hence, the search for suitable alternatives to address the integrated treatment of data subject to such variations holds the potential for significant advancements in multi-criteria analysis applied to the identification of priority areas for UGI planning.

In this context, we propose the development and evaluation of a framework based on the FIS, a methodology that has been widely and promisingly applied across various fields, including participatory planning [25], impact assessment [26], and environmental management [10]. This alternative approach, grounded in the FIS, has the potential to overcome the challenges posed by diverse data sources, making it a promising tool for dealing with uncertainties and addressing the multifaceted nature of UGI planning.

To guarantee technical alignment with our proposed framework, we emphasize that insights from UGI-related decision support systems directly informed the construction of our FIS-based approach. Specifically, limitations such as reliance on expert bias [11], oversimplification [12], data-intensive requirements [13], and interpretability issues [17] shaped the definition of input criteria and fuzzy rule structures used in our system. For example, the integration of expert knowledge in our fuzzy rule base responds to challenges faced by machine learning models that operate as “black boxes”, while our modular FIS architecture overcomes integration issues highlighted in prior GIS-dependent studies [22,24]. Thus, the empirical findings and constraints of prior UGI methodologies served as a foundation for the FIS framework proposed herein, underscoring a direct methodological progression rather than a thematic digression.

3. Theoretical Background

An FIS can be structured through the specification of input and output variables, membership functions, fuzzy rules, and an inference mechanism, as delineated in prior studies [10,27]. In the current research, the input variables are conceptualized as indicators for the demand in mitigating extreme events, maintaining water quality, habitat preservation, and facilitating leisure and recreation activities. Conversely, the output variables delineate the prioritization categories for UGI implementation.

Unlike classical logic models, where membership functions are binary, indicating a state of either true (1) or false (0), fuzzy logic employs a continuous scale from 0 to 1 to express membership (φ) within a fuzzy set.

This gradation allows for the depiction of membership degrees through various function shapes, such as linear (triangular or trapezoidal), sigmoid, or quadratic, thereby facilitating the representation of linguistic terms within a fuzzy set context [10]. In this investigation, these linguistic values (a_i), corresponding to the demand levels (lower, medium, higher) and implementation priority (very small, small, moderate, large, very large), are articulated.

Compared with traditional AI approaches—such as neural networks or decision trees—the FIS presents distinct advantages for urban planning applications. While conventional models typically require large, structured datasets and often function as ‘black boxes’ with limited transparency, the FIS accommodates small, imprecise, or subjective datasets through rule-based modeling. This makes it particularly suitable for planning contexts marked by uncertainty, heterogeneous data, and multidimensional decision criteria. Moreover, the FIS enables expert-driven customization and interpretability, which are essential for policy-sensitive domains such as green infrastructure planning.

The continuum of membership values enhances the depiction of truth, introducing a flexible and authentic approach to managing uncertainties inherent in real-world phenomena [10]. As an element’s value nears the soft boundaries between overlapping concepts, the uncertainty level escalates. This study employs triangular-shaped membership functions to represent such uncertainties effectively (Figure 2).

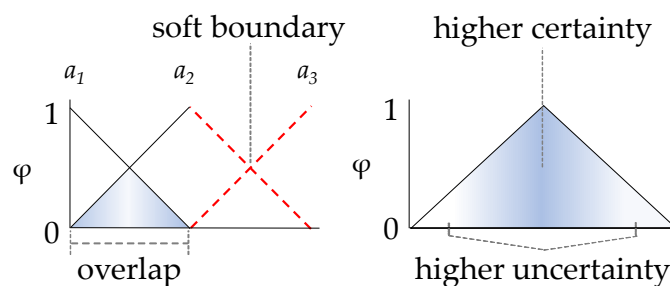


Figure 2. Uncertainty modeled by a triangular-shaped membership function.

Fuzzy rules articulate the correlation between input and output variables, outlining the transformation of inputs into outputs (Gomes et al., 2023). The inference engine operationalizes these rules through fuzzy logic operations like OR (Max), AND (Min), and GAMMA (γ), producing the output variables. In our model, the GAMMA operator is utilized, defined by:

$$\varphi = (\Sigma_f)^\gamma \times (\Pi_f)^{1-\gamma}$$

where φ is the membership, Σ_f and Π_f represent the fuzzy algebraic sum and product, respectively, and γ is the GAMMA operator, defined between zero and 1. When γ is zero, the output results from the product, and when it is 1, it results from the sum. The output's restrictiveness is modulated by γ 's value, with lower γ values creating more stringent conditions. This foundational overview underscores the modeling process's steps: defining linguistic terms, establishing membership function shapes, and crafting fuzzy rules, all underpinned by expert knowledge (Figure 3).

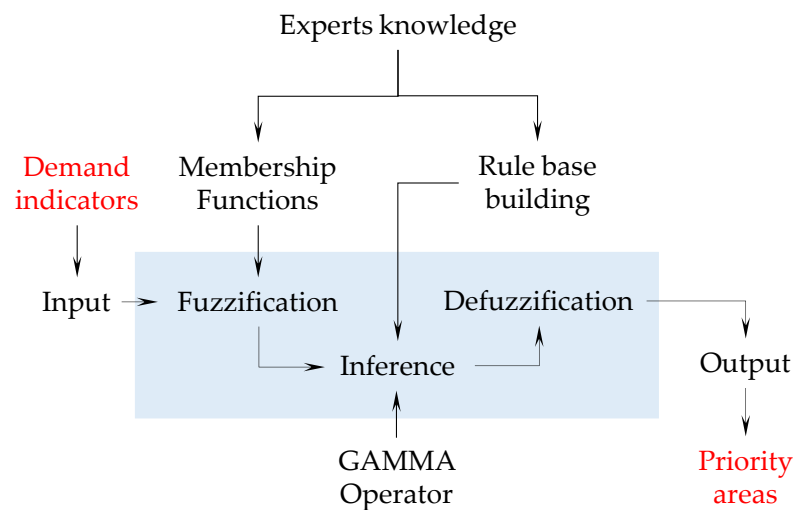


Figure 3. Fuzzy logic - based modeling process.

4. Fuzzy Inference System Modeling

The proposed framework encompasses seven distinct FIS, designed to advance UGI planning through a comprehensive, data-driven approach. Each FIS is tailored to assess specific criteria, thereby facilitating enhanced decision-making processes for UGI prioritization (Figure 4).

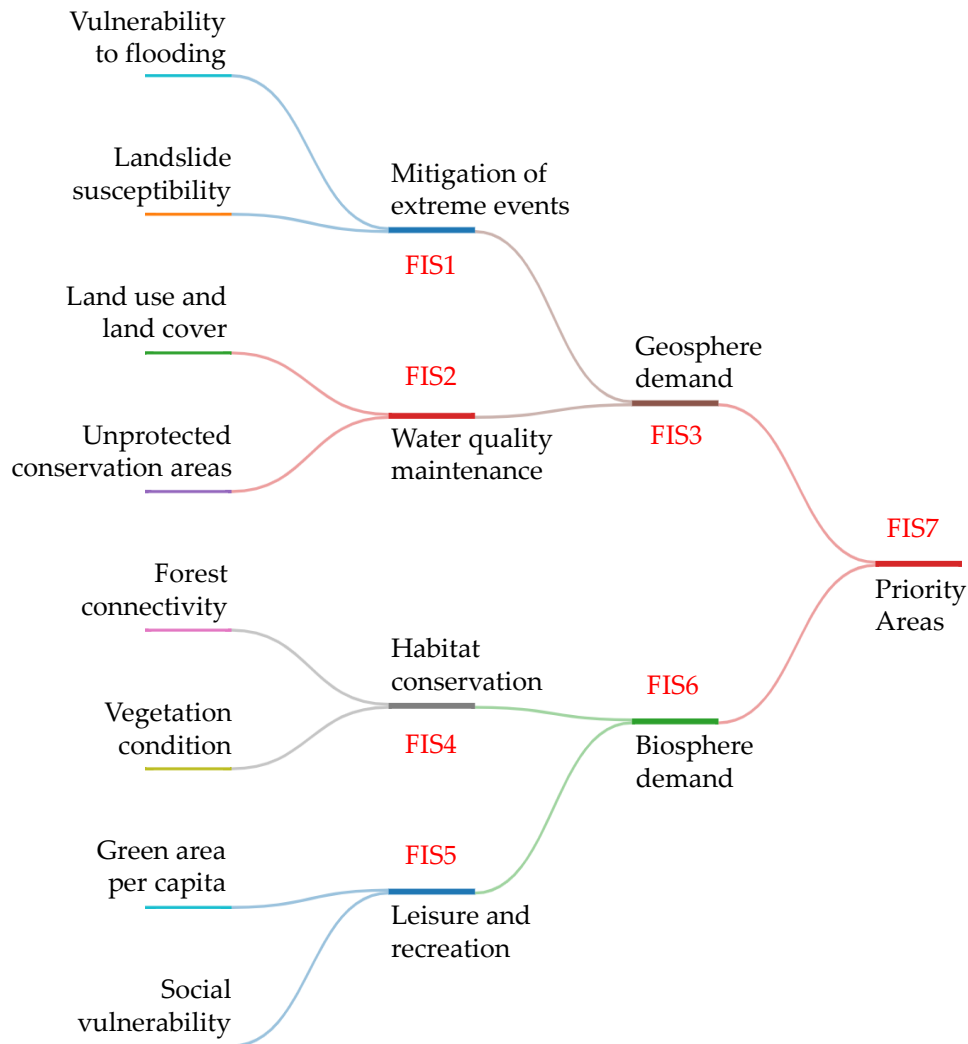


Figure 4. FIS-based framework proposed to identify priority areas for UGI planning.

The input data for the FIS framework were obtained from multiple public and institutional sources. Land use and land cover (LULC) data were derived from remote sensing classification of Sentinel-2 imagery (10 m resolution) using supervised classification techniques validated against field points. Flood and landslide susceptibility maps were obtained from the Brazilian Geological Survey (CPRM) based on topographic and lithological models [32]. Social vulnerability indicators were derived from census tract data provided by the Brazilian Institute of Geography and Statistics [33], including variables related to housing quality, income, and infrastructure. Riparian buffer conditions and vegetation states were assessed using high-resolution aerial imagery and vegetation indices (e.g., NDVI), processed via QGIS. All spatial layers were resampled to a common grid resolution (30 m), normalized to a 0–1 scale, and clipped to the study area using a standardized urban watershed boundary. Reclassification routines were applied based on thresholds from the literature to assign fuzzy linguistic values (low, medium, high). These preprocessing steps ensured data consistency and spatial comparability across all FIS modules.

The variables used in the FIS were selected based on their relevance to the multidimensional demands of UGI planning. These criteria—such

as flood vulnerability, water quality, vegetation condition, and social vulnerability—were chosen through a review of the scientific literature and urban planning guidelines, prioritizing indicators commonly used to assess geosphere and biosphere pressures [34,35]. Each input variable was normalized to a continuous scale from 0 to 1, following a standard fuzzy logic preprocessing approach that ensures compatibility with membership functions and rule-based reasoning [29]. The normalization procedure assigned 0 to the least critical condition (lowest demand) and 1 to the most critical (highest demand), with intermediate values of 0.25, 0.5, and 0.75 used to represent graduated levels of intensity. The specific criteria for mapping raw data to this standardized scale were adapted from existing methods in environmental modeling. For example:

- Flood and landslide vulnerability: derived from multi-criteria risk indices incorporating slope, soil, and hydrological data [32];
- Water quality demand: inferred from land use categories and vegetation cover in riparian areas [34,36];
- Habitat connectivity and vegetation condition: classified based on ecological fragmentation and forest succession stage [10,37];
- Social vulnerability: scored using spatial census indicators for infrastructure, income, and human capital [35].

The initial system (FIS1) is dedicated to identifying areas that require urgent interventions to mitigate extreme events, taking into account factors such as vulnerability to flooding and landslide susceptibility. FIS2 focuses on evaluating regions demanding water quality maintenance, utilizing LULC data and the proximity to unprotected conservation areas as primary criteria. Subsequently, FIS3 synthesizes the outputs from FIS1 and FIS2 to prioritize areas based on geosphere-related needs, while FIS4 integrates criteria associated with forest connectivity and vegetation condition to address habitat maintenance requirements. FIS5 assesses potential locations for leisure and recreation, considering the green area per capita and social vulnerability indicators. The outputs of these systems are further analyzed by FIS6 to derive priorities based on biosphere demands. Ultimately, FIS7 integrates the findings to identify priority areas for UGI implementation, considering both biosphere and geosphere demands.

It is important to note that the resulting priority areas are not assumed to be spatially homogeneous across all UGI typologies. Instead, the framework identifies dominant demands (e.g., flood mitigation, water quality, recreation) and recommends typologies based on these primary needs. As such, each area may be associated with different UGI categories depending on the prevailing environmental and social indicators. In some locations, overlapping demands may lead to multifunctional infrastructure recommendations. This approach reflects the heterogeneity of urban environments and the necessity of place-based planning strategies.

In the quantification of demands related to flood vulnerability and landslide susceptibility, this study incorporates indices developed by [32], which consider a range of environmental factors including slope, soil type, riverbed characteristics, terrain morphology, amplitude, and the density of structural lineaments. This comprehensive approach facilitates a nuanced assessment, where the severity of conditions is stratified on a scale from 0 (least critical) to 1 (most critical), with intermediary conditions assigned values of 0.25, 0.5, and 0.75, respectively.

For evaluating the necessity of water quality maintenance, LULC data were scrutinized to determine the prevalence of impervious surfaces, following the methodology proposed by [34]. The categorization of demand was based on the degree of urbanization, with built-up areas denoted as high demand (scored as 1), and a descending order of priority given to exposed soil (0.8), herbaceous or shrub cover (0.6), tree cover (0.4), and wetland areas (0.2), culminating with water bodies (0) as the lowest demand.

The study also explores the impact of vegetation cover absence on sediment transport into water channels, which may result in siltation affecting water flow and quality, as described by [36]. The retention capabilities of riparian forests for pollutants are compromised in the absence of adequate vegetation cover, necessitating the assessment of unprotected conservation areas. Different ground cover states within riparian buffer zones are evaluated, ranging from no vegetation (1), indicating the highest demand for intervention, to advanced secondary growth or forested savanna (0), signifying the lowest. Intermediate states such as pioneer vegetation (0.75), early secondary growth (0.5), and mid-secondary growth (0.25) are scored accordingly, reflecting varying levels of water quality maintenance demand.

Forest connectivity is determined by prioritizing strategic areas for the maintenance of biodiversity and the promotion of ecosystem services [38]. According to [37] there are eight categories representing degrees of forest connectivity urgency, ranging from minimum to maximum. In the present study, these categories are scored as lower (0) and higher (1) demand, with intermediate categories scored as 0.15, 0.3, 0.45, 0.60, 0.75, and 0.9, respectively. Likewise, the vegetation condition considers the stage of forest regeneration, where absent vegetation is considered the most critical situation, or, in other words, there is a higher demand for UGI (scored as 1), followed by pioneer vegetation (0.75), early secondary growth (0.5), wooded savanna or mid-secondary growth (0.25), and forested savanna or advanced secondary growth (0), as proposed by [39].

The per capita green area is calculated as the percentage obtained by dividing the vegetated area by the total population. A ratio of 15 m² per inhabitant is considered as a reference according to the literature [40]; therefore, areas with this ratio equal to or greater than this are scored as lower demand (0). In turn, social vulnerability encompasses infrastructure and the urban environment, human capital, income and employment, and housing dimensions [35]. The most critical condition corresponds to 100% of people living in vulnerable conditions, i.e., higher demand (scored as 1), followed by 60 to 90% (0.9), 30 to 60% (0.75), 10 to 30% (0.5), 0 to 10% (0.25), and 0% scored as 0.

As described above, for each demand indicator variable, the reference values from the literature were standardized, using a scale ranging from 0 to 1. Then, in the variable fuzzification stage, each FIS assigns three linguistic values to input variables, classifying areas as having lower, medium, or greater demand. These demand categories are modeled using triangle-shaped membership functions (Table 2).

Table 2. Fuzzy triangle-shaped membership function.

	demand	parameters (a, b, c)*
demand indicator variable	lower	(0, 0, 0.5)
	medium	(0, 0.5, 1)

greater (0.5, 1, 1)

* parameters ' a ' and ' c ' locate the base and the ' b ' locates the peak of the triangle-shaped membership function.

Triangular membership functions were selected for this study due to their computational efficiency, simplicity, and proven effectiveness in applications where data are limited or where interpretability is essential [29,31]. These functions are particularly suitable when expert knowledge is the primary source for defining fuzzy sets, as they require only three parameters and allow for straightforward rule construction and tuning [30]. Moreover, in environmental and spatial decision-making contexts such as UGI planning—where data uncertainty is common—triangular functions offer a practical balance between expressiveness and transparency [10,41]. Regarding parameter determination, the values for (a, b, c) were defined based on the standardized scales of input indicators and refined through iterative expert consultation, consistent with participatory FIS design methodologies [14]. Specifically, endpoints 'a' and 'c' delineate the lower and upper bounds of each linguistic category (e.g., “low”, “medium”, “high”), while 'b' represents the peak (maximum membership value). The adopted configuration—(0, 0, 0.5) for “low”, (0, 0.5, 1) for “medium”, and (0.5, 1, 1) for “high”—reflects an even distribution across the normalized range [0–1], allowing symmetric overlap between categories and ensuring continuity in the fuzzification process. This structure also aligns with prior FIS applications in environmental modeling, enhancing comparability and replicability [10].

In turn, the fuzzy rule base was developed using a knowledge-driven approach, relying on expert elicitation and established domain literature to define the logical relationships between input and output variables. Specifically, for each FIS module, fuzzy rules were formulated based on how combinations of demand indicators—such as flood vulnerability and vegetation cover—correlate with the need for UGI interventions. This approach is consistent with methodologies adopted in participatory environmental modeling, where rules are defined to reflect qualitative expert knowledge in the absence of large training datasets [31]. Each rule in the base follows the standard IF–THEN format, such as: IF flood vulnerability is high AND vegetation condition is poor, THEN the priority is very high. The linguistic values used (e.g., low, medium, high) correspond to the triangular membership functions defined in Table 2. Rule combinations were selected to reflect realistic environmental interactions and spatial patterns, ensuring that they are both interpretable and applicable to real-world urban conditions. For example, in FIS1 (extreme event mitigation), areas with both high slope and poor drainage were prioritized more heavily than those meeting only one of these criteria. The rule base structure was reviewed in iterative sessions with domain specialists in urban planning, hydrology, and ecology, ensuring consistency, plausibility, and alignment with planning practices. Additionally, a parsimonious design principle was followed to avoid unnecessary rule proliferation, using three linguistic categories for inputs to limit the total number of rules while preserving decision quality [29].

The construction of fuzzy rule sets, while grounded in domain knowledge and literature, is inherently subject to expert judgment and may introduce cognitive or institutional biases. These biases can affect the weighting of certain criteria, the interpretation of linguistic thresholds, or

the prioritization logic embedded in the rules. To mitigate these effects, this study employed a multi-pronged strategy: (i) triangulation of rules with scientific literature and regulatory standards; (ii) validation of preliminary rules through a workshop involving municipal planners, ecologists, and engineers; and (iii) consistency checks against empirical data distributions for each input variable. This approach enhances the objectivity and contextual relevance of the fuzzy inference process.

The output variables can take on five linguistic values, categorizing areas as having very small, small, moderate, large, or very large priority (Figure 5). When this output enters a subsequent FIS, a new fuzzification occurs using three linguistic values. This is done to prevent a significant increase in the number of rules resulting from the combination of these values, thereby avoiding unnecessary computational processing costs. The rule base that guides the inference engine is shown in Table 3.

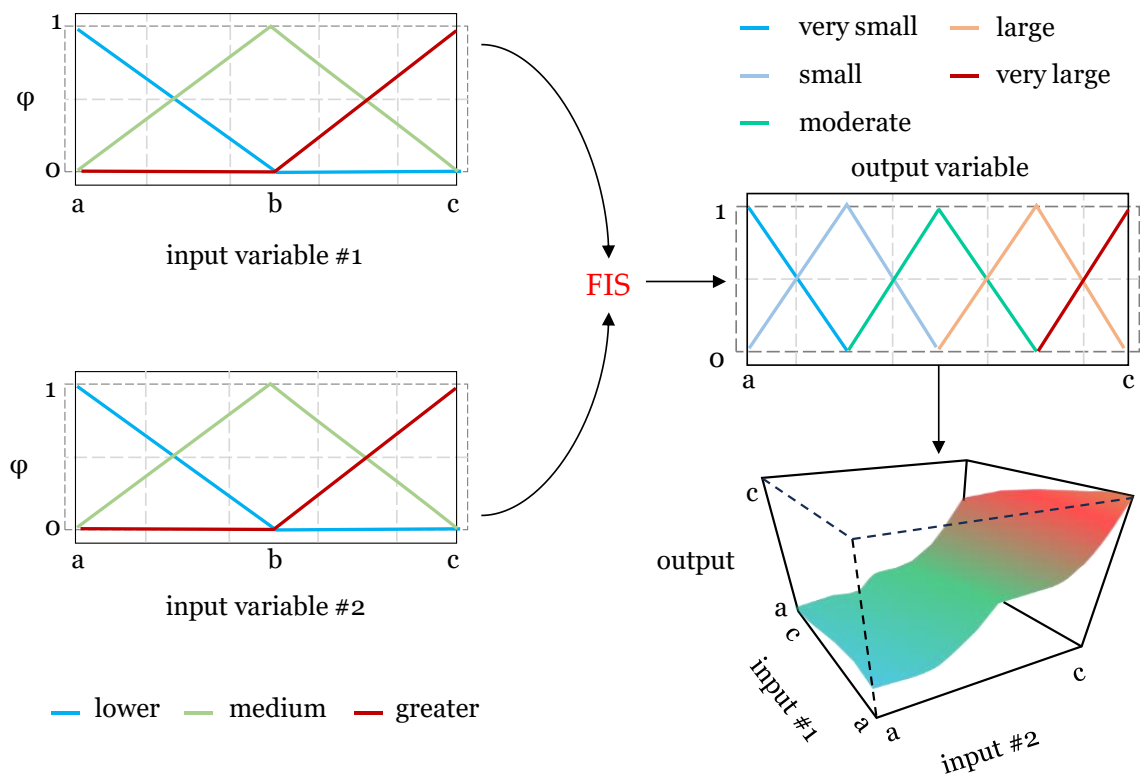


Figure 5. Fuzzification of input and output variables into linguistic values.

Table 3. Rule basis of fuzzy inference system.

Input #1	Input #2	Output
	lower	very small
lower	medium	small
	greater	moderate
	lower	small
medium	medium	moderate
	greater	large
	lower	moderate
greater	medium	large
	greater	very large

After classifying urban areas based on their priority using the FIS7 output, specific green infrastructure typologies are recommended by the proposed framework according to the preceding FIS outputs (Table 4). For instance, if the high-priority level is due to the need for mitigating extreme events, a suggested green infrastructure typology could be the implementation of sustainable drainage systems (SDSs). SDSs are designed to effectively manage stormwater runoff, reducing the risk of flooding and erosion in urban areas.

Table 4. Recommendations for mainstreaming green infrastructure.

demand	data-driven decision-making
FIS1: Mitigation of extreme events	(i) Sustainable Drainage Systems: including retention basins, permeable pavements, and rain gardens to effectively manage stormwater runoff and reduce flooding; (ii) Natural Retaining Walls: using vegetation and engineering techniques to create natural barriers against landslides and erosion; (iii) Wildlife Refuges: native vegetation areas that provide safe habitats for wildlife, aiding in biodiversity preservation; (iv) Coastal Vegetation Belts: planting coastal vegetation like mangroves and dunes to protect against coastal erosion and storms; (v) Urban Infiltration Parks: green spaces designed to absorb rainwater and recharge groundwater, mitigating urban flooding.
FIS2: Water quality maintenance	(i) Constructing Wetlands: artificial wetland systems that naturally filter and purify water, improving its quality; (ii) Bioretention Swales: channels planted with vegetation to capture and treat stormwater runoff before it enters water bodies; (iii) Floating Treatment Wetlands: floating islands with aquatic plants that help remove pollutants from water bodies; (iv) Riparian Buffer Zones: planting native vegetation along water bodies to reduce runoff and filter contaminants; (v) Stormwater Ponds: engineered ponds designed to detain and treat stormwater, enhancing water quality before release.
FIS4: Habitat conservation	(i) Green Roofs: rooftop gardens with native plants to provide habitat for birds and insects; (ii) Pollinator Gardens: planted with native flowers to support pollinators like bees and butterflies; (iii) Wildlife Corridors: linear green spaces that connect natural habitats, facilitating wildlife movement; (iv) Artificial Nesting Structures: installing birdhouses and bat boxes to support urban wildlife; (v) Aquatic Habitats: creating ponds or small water bodies for amphibians and aquatic species in urban areas.
FIS5: Leisure and recreation	(i) Community Parks: multi-use parks with playgrounds, sports facilities, and picnic areas for diverse recreational activities; (ii) Botanical Gardens: showcasing a variety of plant species and providing a serene environment for relaxation; (iii) Green Trails: pedestrian and cycling paths with lush greenery for a pleasant outdoor experience; (iv) Outdoor Fitness Zones: equipped with exercise stations and open spaces for fitness enthusiasts; (v) Plaza Gardens: small urban plazas transformed into green spaces for leisure and social gatherings.

This includes structures like stormwater ponds, permeable pavements, green roofs, and rain gardens, which help control rainfall and minimize damage from extreme weather events. Such green infrastructure significantly contributes to urban resilience in the face of adverse climate events [42].

To provide greater clarity and usability for urban planning, the green infrastructure typologies recommended by the framework are grouped into four functional categories: (i) hydrological systems (e.g., sustainable drainage systems, wetlands, stormwater ponds); (ii) ecological connectivity and habitat support (e.g., wildlife corridors, green roofs, aquatic habitats); (iii) recreational and social green spaces (e.g., parks, green trails, botanical gardens); and (iv) environmental quality interventions (e.g., riparian buffers, bioretention swales, permeable pavements). This classification reflects their intended roles in urban systems and facilitates integration with spatial planning instruments, enabling decision-makers to align infrastructure investments with specific urban needs.

Conversely, if the demand is for leisure and recreational spaces, a recommended green infrastructure typology could be the establishment of urban parks and recreational zones. These areas are designed to offer spaces for relaxation, physical activity, and community gatherings, featuring amenities such as playgrounds, sports facilities, walking trails and picnic areas. Mainstreaming such UGI can enhance the quality of life for urbanites, promote physical and mental well-being, and foster a sense of community engagement. As cities continue to grow and face various challenges, prioritizing and expanding UGI contribute significantly to the overall health and happiness of urban residents, while also serving essential ecological functions, such as maintaining the hydrological cycle and providing ecological corridors for the gene flow of fauna and flora.

To ensure the robustness and applicability of the proposed FIS framework for UGI planning, an expert validation process was conducted. This process aimed to assess the relevance of the selected indicators, the coherence of the model's inference process, and the applicability of the results to real-world urban planning scenarios. The validation was performed through a structured consultation with a panel of 18 experts selected based on their experience and expertise in environmental sciences, urban sustainability, and infrastructure planning. The expert panel included: (i) academics and researchers from universities and research institutes specializing in environmental studies and sustainability; (ii) public and private sector professionals, including environmental engineers, urban planners, and government officials from state environmental agencies; and (iii) multidisciplinary experts, such as project supervisors and environmental managers from private companies and public administration bodies.

The consultation was conducted via an online survey using the Google Forms platform. The survey covered three key dimensions:

Relevance of the indicators—experts were asked to evaluate the coherence and suitability of the indicators used in the model to identify priority areas for UGI implementation;

Suggestions for inclusion or modification of indicators—experts were given the opportunity to propose additional indicators or suggest modifications to existing ones;

Evaluation of model coherence and applicability—experts assessed the overall structure, inference process, and the validity of the results obtained from the case study application.

5. Application of the Proposed Framework

To validate the proposed FIS-based framework, we conducted a case study in the city of São José dos Campos, located in the eastern region of the state of São Paulo, Brazil. The urban watersheds of this municipality were selected due to their representativeness of rapid urbanization, environmental variability, and high relevance in regional sustainability planning. Additionally, the city holds ISO 37120, 37122, and 37123 certifications as a smart city, ensuring the availability of high-quality spatial and socio-environmental data, which is essential for implementing and evaluating data-driven planning models. Its urban fabric encompasses ecologically sensitive zones, dense urban cores, and socially vulnerable areas—conditions that are suitable for testing the framework’s capacity to reconcile conflicting geosphere and biosphere demands. Although the indicators used are context-specific, the modularity and adaptability of the framework support its transferability to other urban contexts, provided that locally relevant data are available. This area offers a diverse set of conditions that are ideal for testing the framework’s ability to integrate and prioritize conflicting geosphere and biosphere demands. Figure 6 illustrates the geographic boundaries and spatial configuration of the selected urban watersheds that served as the spatial domain for FIS application.

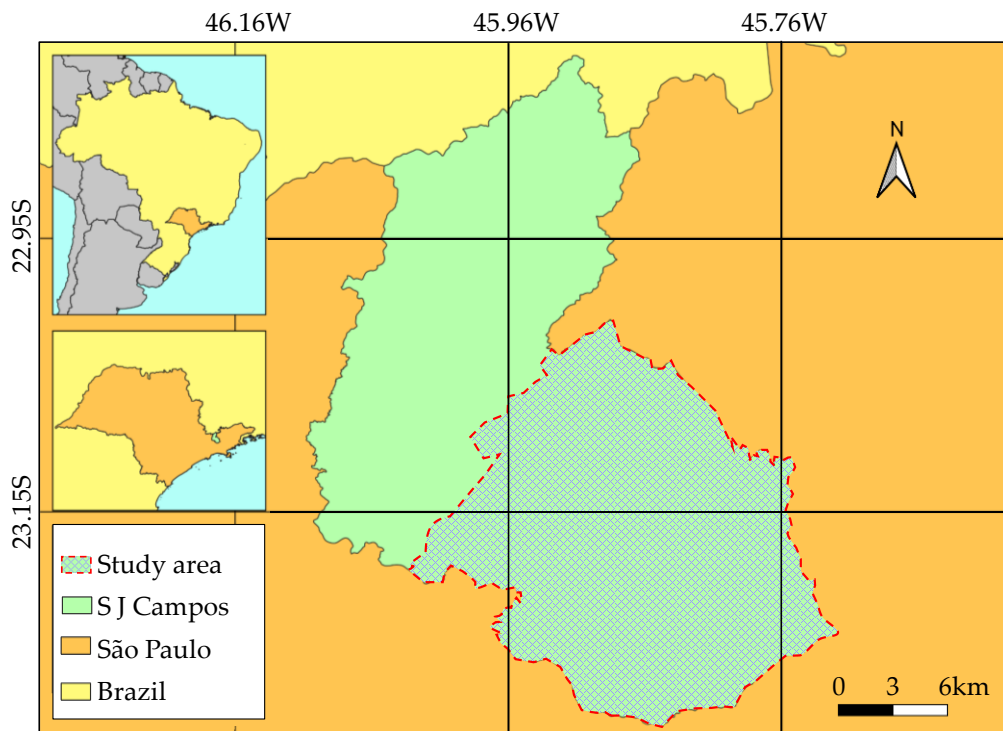


Figure 5. The study area - urban watersheds of São José dos Campos, Brazil.

The municipality comprises 737,310 inhabitants (in 2023) and covers a total area of 1099.409 km², with 11.73% designated as urbanized zones. It boasts 94.7% of urban households along public roads adorned with trees, while 66.4% enjoy adequate sanitary infrastructure. When compared with other cities in Brazil, it ranks 961st for road afforestation and 125th out of 5570 for proper sanitary infrastructure [33].

Taking into account factors such as technological advancements, urban economy, quality of life, sustainability, and response capability to face natural disasters, São José dos Campos has been certified as the first smart

city in Brazil [43], complying with the conformity indicators established by the International Organization for Standardization—ISO. It fully adheres to ISO 37120, focusing on quality of life and sustainability, ISO 37122, which pertains to technology, and ISO 37123, which deals with the city's economy and its capacity for prevention and action in the face of natural disasters [44,45,46].

The proposed fuzzy model can be considered a strategic tool for UGI planning, particularly due to its ability to handle uncertainty and generate diverse scenarios by varying the values of the gamma operator. This flexibility allows adjusting the prioritization approach according to different time horizons, optimizing the allocation of resources and efforts. Figure 7 presents the identification of priority areas through the integrated assessment of all indicator parameters derived from preceding analyses considering a short-term horizon ($\gamma = 1$), in which the focus can be on prioritizing a smaller quantity of areas with more urgent demands, addressing immediate needs. In the medium term ($\gamma = 0.5$), the model would provide the capacity to establish an intermediate scenario. This allows for a more balanced approach, addressing areas with significant demands but with a more extended implementation perspective. In the long term ($\gamma = 0$), the model could be adjusted to prioritize a larger quantity of areas, encompassing existing but less urgent demands.

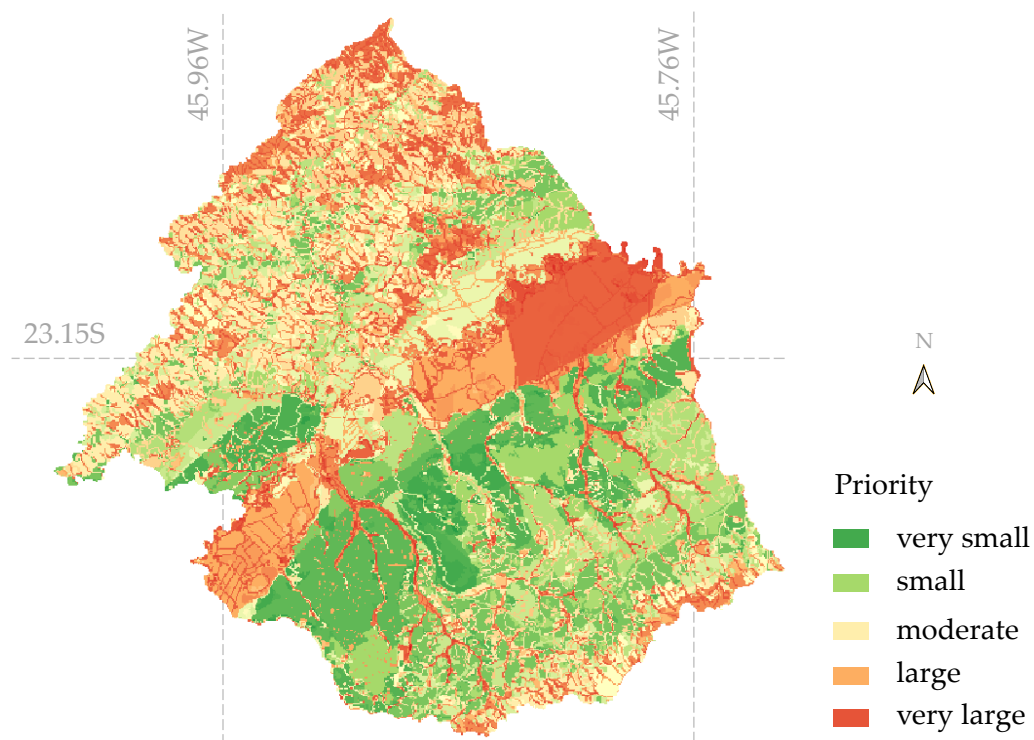


Figure 7. Urban areas prioritized for implementing UGI in a short-term horizon.

The selection of γ values is grounded in the operational mechanics of the GAMMA operator in fuzzy inference. When $\gamma = 1$, the output is driven by the fuzzy algebraic sum, producing a more permissive aggregation—suitable for identifying critical areas in short-term planning. When $\gamma = 0$, the output is based on the algebraic product, leading to more stringent prioritization and wider coverage, ideal for long-term, inclusive interventions. The intermediate value $\gamma = 0.5$ balances these extremes. This parameterization enables planners to tailor spatial priorities to

different implementation timeframes by adjusting the sensitivity of the decision rules. The temporal flexibility enables efficient resource management, considering the gradual evolution of urban conditions. In addition, it also allows for a comprehensive and sustainable vision, considering the gradual transformation of the urban environment over time. Thus, the model not only provides a dynamic approach to current demands but also becomes an adaptable tool for strategic urban planning across different time horizons.

From the results, it is evident that the proposed tool effectively classified the study areas concerning demands related to extreme event mitigation, water quality maintenance, habitat conservation, and spaces for leisure and recreation. This comprehensive classification provides an evidence-based understanding of urban green infrastructure (UGI) demands, enabling targeted and effective planning.

For example, in areas where habitat conservation emerged as the primary demand for prioritization, the recommended green infrastructure typologies, such as green roofs, pollinator gardens, wildlife corridors, artificial nesting structures, and aquatic habitats, as listed in Table 4, align with the ecological needs of the area. This promotes biodiversity and enhances the overall health of the urban ecosystem. Conversely, in areas where leisure and recreation were identified as the main demand, the FIS recommends typologies like community parks, botanical gardens, green trails, outdoor fitness zones, and plaza gardens. These interventions not only contribute to the physical and mental well-being of urban residents but also foster a sense of community engagement. The suggested UGI typologies align with the recreational needs of the area, promoting a healthier and more socially vibrant urban environment.

6. Expert Validation

The majority of experts rated the proposed indicators as “relevant” or “highly relevant” for identifying priority areas for UGI implementation (Figure 8). While some experts expressed minor concerns about specific indicators—such as the indirect role of vulnerability levels in decision-making—there was a strong consensus on maintaining all proposed indicators without exclusions.

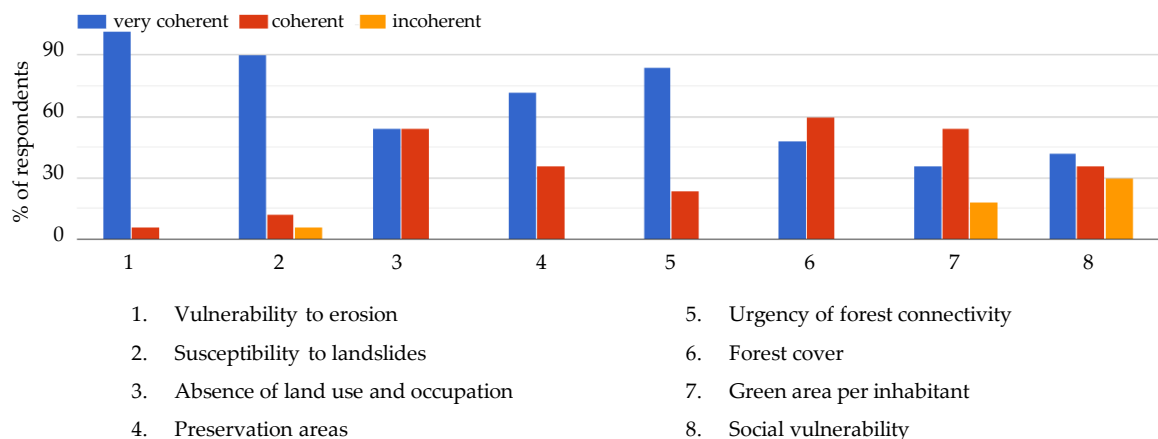


Figure 08. Experts' perception of the relevance of the proposed indicators.

Interestingly, when asked whether additional indicators should be included, most experts indicated that the current set of indicators was comprehensive and sufficient. However, a specific suggestion was made to consider an indicator related to resource prioritization under budget

constraints, highlighting the importance of financial feasibility in urban sustainability planning.

The coherence of the model's results was also positively evaluated (Figure 9). Most experts classified the model's outcomes as "highly coherent", with some responses indicating that results were simply "coherent" but never inconsistent or unreliable. The structured inference process and the ability of the model to classify urban areas into four priority categories—extreme event mitigation, water quality maintenance, habitat conservation, and leisure and recreation enhancement—were particularly well-received.

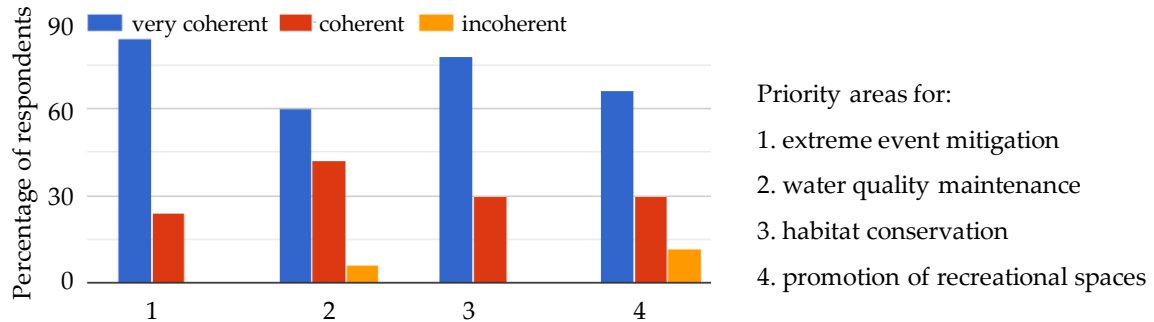


Figure 9. Experts' perception of the coherence of the results from the application of the proposed model in the study area.

When asked about potential improvements, most experts did not identify any critical weaknesses in the model. However, one recommendation was to incorporate an open-ended question in future validation forms, allowing respondents to provide qualitative insights beyond the structured survey format.

The expert validation process confirmed the scientific rigor and practical applicability of the proposed framework. The overwhelmingly positive feedback on indicator selection, model coherence, and inference accuracy suggests that the FIS-based approach is a viable tool for guiding urban green infrastructure planning. Moreover, the interaction with specialists provided valuable insights for future refinements, particularly regarding the integration of economic constraints into the decision-making process.

This validation reinforces the study's contributions to urban sustainability, demonstrating that data-driven methodologies can effectively support policy and planning decisions. Future research can build upon this foundation by expanding the expert panel, integrating financial optimization models, and applying the framework across diverse urban contexts to enhance its adaptability and scalability.

7. Limitations and Future Research Directions

While the proposed FIS-based framework has demonstrated both technical feasibility and conceptual robustness, several limitations should be considered and acknowledged to inform future research and support broader applicability.

First, the study did not include a comparative evaluation with alternative decision-support methodologies, such as Multi-Criteria Decision

Analysis, machine learning approaches, or GIS-only models. This omission reflects the study's primary aim of developing and validating a novel, expert-driven FIS architecture tailored to specific urban planning challenges. Nevertheless, benchmarking the framework against established methodologies is essential to strengthen its empirical foundation and should be prioritized in future research.

Second, the framework currently operates using static, secondary spatial data and expert-defined rule bases. While these choices ensure transparency and interpretability, they may not adequately reflect dynamic urban conditions. Incorporating real-time environmental monitoring and crowdsourced data sources would enhance the model's adaptability and responsiveness to temporal changes.

Third, although we employed expert validation to assess the coherence of the model and the relevance of its indicators, the framework does not yet integrate broader stakeholder engagement processes. The absence of participatory mechanisms, such as public input or multi-level institutional review, may limit its applicability within inclusive planning contexts.

Fourth, the framework was applied to a single case study—São José dos Campos, Brazil. While this city presents a relevant context of urban environmental complexity, the generalizability of the model to other urban systems with different socio-ecological and governance characteristics remains untested.

To advance the framework's utility and scope, future research should focus on benchmarking its performance against other UGI planning methods; applying it to diverse geographic and institutional settings; incorporating participatory and real-time data inputs; developing hybrid models that integrate fuzzy logic with optimization or predictive tools; and exploring its integration into municipal GIS platforms or digital twin systems to enable real-time planning support.

8. Conclusions

This study presents a fuzzy inference system (FIS)-based framework to identify priority areas for urban green infrastructure (UGI), addressing the complex demands of urban resilience and sustainability. Through seven interconnected modules, the model systematically integrates environmental and social indicators to classify urban areas and recommend tailored UGI typologies, such as sustainable drainage systems, riparian buffers, and community parks. Its application in São José dos Campos, Brazil, a smart city with diverse urban environmental conditions, demonstrates the framework's effectiveness in supporting targeted planning across multiple time horizons.

By enabling the adjustment of prioritization sensitivity via the gamma operator and adopting transparent, expert-informed rule bases, the framework accommodates uncertainties and promotes informed decision-making. Importantly, it offers a clear pathway for policymakers by aligning with municipal planning instruments—such as master plans and ecological zoning—while ensuring integration with commonly used GIS platforms. Furthermore, the framework provides a practical decision-

support pathway for policymakers by aligning its modular structure with existing urban planning instruments such as municipal master plans, ecological zoning, and resilience strategies. By utilizing accessible GIS platforms and transparent rule-based logic, the framework facilitates institutional adoption, allowing planners to integrate UGI prioritization seamlessly into regulatory processes and policy development. Although the model relies on secondary data and expert judgment, its modular structure and validation by multidisciplinary experts confirm its practical applicability. Future research should extend the framework to diverse urban contexts, integrate real-time data inputs, and explore participatory planning mechanisms to further its scalability and responsiveness. In doing so, this approach will strengthen the role of artificial intelligence in sustainable urban governance, contributing to climate adaptation and the long-term resilience of cities.

Referências

1. Wang, S.; Bai, X.; Zhang, X. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. *Nat. Food* **2021**, *2*, 183–191. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
2. Huang, S.; Xiao, X.; Tian, T.; Che, Y. Seasonal influences on preferences for urban blue-green spaces: Integrating land surface temperature into the assessment of cultural ecosystem service value. *Sustain. Cities Soc.* **2024**, *102*, 105237. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
3. Nieuwenhuijsen, N.J. Green Infrastructure and Health. *Annu. Rev. Public Health* **2021**, *42*, 317–328. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
4. Akomolafe, O.O.; Olorunsogo, T.; Anyanwu, E.C.; Osasona, F.; Ogugua, J.O.; Daraojimba, O.H. Air Quality and Public Health: A Review of Urban Pollution Sources and Mitigation Measures. *Eng. Sci. Technol. J.* **2024**, *5*, 259–271. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
5. Hansen, R.; Olafsson, A.S.; Van Der Jagt, A.P.; Rall, E.; Pauleit, S. Planning multifunctional green infrastructure for compact cities: What is the state of practice? *Ecol. Indic.* **2019**, *96*, 99–110. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Enssle, F.; Kabisch, N. Urban green spaces for the social interaction, health and well-being of older people—An integrated view of urban ecosystem services and socio-environmental justice. *Environ. Sci. Policy* **2020**, *109*, 36–44. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
7. Kamjou, E.; Scott, M.; Lennon, M. A Bottom-Up Perspective on Green Infrastructure in Informal Settlements: Understanding nature's benefits through lived experiences. *Urban For. Urban Green.* **2024**, *94*, 128231. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Marçal, J.; Shen, J.; Antizar-Ladislao, B.; Butler, D.; Hofman, J. Assessing inequalities in urban water security through geospatial analysis. *PLoS Water* **2024**, *3*, e0000213. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Bressane, A.; Garcia, A.J.D.S.; Castro, M.V.D.; Xerfan, S.D.; Ruas, G.; Negri, R.G. Fuzzy machine learning applications in environmental engineering: Does the ability to deal with uncertainty really matter? *Sustainability* **2024**, *16*, 4525. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
10. Guarini, M.R.; Sica, F.; Segura, A. Artificial Intelligence (AI) Integration in Urban Decision-Making Processes: Convergence and Divergence with the Multi-Criteria Analysis (MCA). *Information* **2024**, *15*, 678. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
11. Bressane, A.; Bagatini, J.A.; Biagolini, C.H.; Roveda, J.A.F.; Roveda, S.R.M.M.; Fengler, F.H.; Longo, R.M. Neuro-fuzzy modeling: A promising alternative for risk analysis in urban afforestation management. *Braz. For. Sci.* **2018**, *42*, e420106. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
12. Carvalho Maria, T.R.B.; Biondi, D.; Behling, A.; dos Reis, A.R.N.; Zamproni, K.; Ho, T.L. Application of artificial intelligence for tree risk assessment optimization in Itanhaém–São Paulo, Brazil. *Urban For. Urban Green.* **2023**, *81*, e127844. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
13. Lin, J.; Qiu, S.; Tan, X.; Zhuang, Y. Measuring the relationship between morphological spatial pattern of green space and urban heat island using machine learning methods. *Build. Environ.* **2023**, *228*, e109910. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]

14. Bressane, A.; Biagolini, C.H.; Mochizuki, P.S.; Roveda, J.A.F.; Lourenço, R.W. Fuzzy-based methodological proposal for participatory diagnosis in the linear parks management. *Ecol. Indic.* **2017**, *80*, 153–162. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
15. Zarei, F.; Nik-Bakht, M. Citizen engagement body of knowledge—A fuzzy decision maker for index-term selection in built environment projects. *Cities* **2021**, *112*, 103137. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Barbosa, A.; Martín, B.; Hermoso, V.; Arévalo-Torres, J.; Barbière, J.; Martínez-López, J.; Domisch, S.; Langhans, S.D.; Balbi, S.; Villa, F.; et al. Cost-effective restoration and conservation planning in Green and Blue Infrastructure designs. A case study on the Intercontinental Biosphere Reserve of the Mediterranean: Andalusia (Spain)—Morocco. *Sci. Total Environ.* **2019**, *652*, 1463–1473. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
17. Massaro, A.; Birardi, G.; Manca, F.; Marin, C.; Birardi, V.; Giannone, D.; Galiano, A.M. Innovative DSS for intelligent monitoring and urban square design approaches: A case of study. *Sustain. Cities Soc.* **2021**, *65*, e102653. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
18. Langemeyer, J.; Wedgwood, D.; McPhearson, T.; Baró, F.; Madsen, A.L.; Barton, D.N. Creating urban green infrastructure where it is needed: A spatial ecosystem service-based decision analysis of green roofs in Barcelona. *Sci. Total Environ.* **2020**, *707*, e135487. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
19. Gyani, J.; Ahmed, A.; Haq, M.A. MCDM and various prioritization methods in AHP for CSS: A comprehensive review. *IEEE Access* **2022**, *10*, 33492–33511. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
20. Mangan, P.; Pandi, D.; Haq, M.A.; Sinha, A.; Nagarajan, R.; Dasani, T.; Keshta, I.; Alshehri, M. Analytic hierarchy process based land suitability for organic farming in the arid region. *Sustainability* **2022**, *14*, 4542. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
21. Sekar, K.R.; AnulHaq, M.; Kumar, A.; Shalini, R.; Poojalaxmi, S. An improved ranking methodology for malignant carcinoma in multicriterion decision making using hesitant VIKOR fuzzy. *Theor. Comput. Sci.* **2022**, *929*, 81–94. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
22. Liu, X.; Niu, N.; Liu, X.; Jin, H.; Ou, J.; Jiao, L.; Liu, Y. Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data. *Int. J. Geogr. Inf. Sci.* **2018**, *32*, 738–756. [[Google Scholar](#)]
23. Nikiforova, A.A.; Fleis, M.E.; Kazantsev, N.N. Multi-scale soil-landscape maps as the basis of geographic information systems for soil melioration. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2019**, *368*, 12038. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Zhou, G.; Pan, Q.; Yue, T.; Wang, Q.; Sha, H.; Huang, S.; Liu, X. Vector and Raster Data Storage based on Morton Code. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* **2018**, *42*, 2523–2526. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. Mehryar, S.; Sliuzas, R.; Sharifi, A.; Reckien, D.; van Maarseveen, M. A structured participatory method to support policy option analysis in a social-ecological system. *J. Environ. Manag.* **2017**, *197*, 360–372. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Mohandes, S.R.; Kaddoura, K.; Singh, A.K.; Elsayed, M.Y.; Banihashemi, S.; Antwi-Afari, M.F.; Olawumi, T.O.; Zayed, T. Application of a hybrid fuzzy-based algorithm to investigate the environmental impact of sewer overflow. *Smart Sustain. Built Environ.* **2024**. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
27. Bačić, S.; Tomić, H.; Rogulj, K.; Andlar, G. Fuzzy decision-making valuation model for urban green infrastructure implementation. *Energies* **2024**, *17*, 5162. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Pedrycz, W.; Gomide, F. *Fuzzy Systems Engineering: Toward Human-Centric Computing*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2007. [[Google Scholar](#)]
29. Ross, T.J. *Fuzzy Logic with Engineering Applications*; John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA, 2005. [[Google Scholar](#)]
30. Zimmermann, H.J. *Fuzzy Set Theory—And Its Applications*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011. [[Google Scholar](#)]
31. Mendel, J.M. *Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems: Introduction and New Directions*, 2nd ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017. [[Google Scholar](#)]
32. Bitar, O.Y. *Susceptibility Charts to Gravitational Mass Movements and Floods: Explanatory Technical Note*; IPT/CPRM: São Paulo, Brazil, 2014. [[Google Scholar](#)]

33. Brazilian Institute of Geography and Statistics. Municipalities in Brazil-Overview. 2023. Available online: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-dos-campos/panorama> (accessed on 10 January 2025).
34. Hwang, S.A.; Hwang, S.J.; Park, S.R.; Lee, S.W. Examining the relationships between watershed urban land use and stream water quality using linear and generalized additive models. *Water* **2016**, *8*, 155. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
35. Spielman, S.E.; Tuccillo, J.; Folch, D.C.; Schweikert, A.; Davies, R.; Wood, N.; Tate, E. Evaluating social vulnerability indicators: Criteria and their application to the Social Vulnerability Index. *Nat. Hazards* **2020**, *100*, 417–436. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
36. Cordeiro, G.G.; Vasconcelos, V.; Salemi, L.F.; Nardoto, G.B. Factors affecting the effectiveness of riparian buffers in retaining sediment: An isotopic approach. *Environ. Monit. Assess.* **2020**, *192*, 735. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
37. Joly, C.A. BIOTA/FAPESP: The Biodiversity Virtual Institute—Translating Research on Biodiversity and Ecosystem Services into Policies in a Megadiverse Country. In *Applied Ecology and Human Dimensions in Biological Conservation*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2014; pp. 211–224. [[Google Scholar](#)]
38. Ribeiro, M.P.; de Mello, K.; Valente, R.A. How can forest fragments support protected areas connectivity in an urban landscape in Brazil? *Urban For. Urban Green.* **2022**, *74*, 127683. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
39. Mota MT, D.; Galvao AL, D.S.; Bressane, A.; Negri, R.G.; Roveda JA, F.; Roveda SR, M. A fuzzy-based methodological proposal for analysing green areas in urban neighborhoods. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* **2022**, *94* (Suppl. S4), e20210015. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Bressane, A.; Mochizuki, P.S.; Roveda, J.A.F.; Roveda, S.R.M.M.; de Medeiros, G.A.; Ribeiro, A.Í.; Martins, A.C.G. Management support system of urban green areas. *RevSbau* **2015**, *10*, 30–42. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
41. Bortolan, G.; Degani, R. A review of some methods for ranking fuzzy subsets. *Fuzzy Sets Syst.* **1985**, *15*, 1–19. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
42. Junqueira, J.R.; Serrao-Neumann, S.; White, I. Managing urban climate change risks: Prospects for using green infrastructure to increase urban resilience to floods. In *The Impacts of Climate Change*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2021; pp. 379–396. [[Google Scholar](#)]
43. Mello Torres, J.G.; de Andrade, N.; Neto, P.L.D.O.C. Analysis of the European and Brazilian Rankings of Smart Cities: A case study of São José dos Campos and Toulouse. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci.* **2019**, *6*, 91–115. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
44. ISO 37.120; Indicators for Urban Services and Quality of Life. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2014.
45. ISO 37.123; Indicators for Resilient Cities. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2019.
46. ISO 37.122; Indicators for Smart Cities. International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland, 2019.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou contribuir para o campo da gestão estratégica da infraestrutura verde urbana por meio do desenvolvimento e avaliação de um arcabouço metodológico baseado em lógica fuzzy, voltado à identificação, priorização e classificação de áreas para implementação de infraestrutura verde. A pesquisa avançou a discussão sobre o planejamento urbano sustentável ao integrar duas abordagens metodológicas complementares, abordando tanto a priorização espacial da infraestrutura verde urbana quanto a adaptação das soluções às demandas específicas do contexto urbano.

O primeiro estudo focou no desenvolvimento de um sistema de suporte à decisão baseado em lógica fuzzy, projetado para otimizar a seleção de áreas prioritárias para a implantação de infraestrutura verde. Os resultados demonstraram a eficácia da lógica fuzzy na modelagem de incertezas espaciais e sua aplicabilidade em um sistema de informação geográfica. A pesquisa reforçou a importância do uso de abordagens baseadas em dados para a sustentabilidade urbana, permitindo uma avaliação estruturada de indicadores ambientais e sociais para embasar a tomada de decisão.

O segundo estudo ampliou essa abordagem ao propor um arcabouço metodológico baseado em sistemas de inferência fuzzy, capaz de classificar áreas urbanas conforme suas demandas específicas e recomendar tipologias adequadas de infraestrutura verde. Essa abordagem superou a lacuna existente entre modelos teóricos de priorização e estratégias práticas de implementação, garantindo que as áreas selecionadas recebessem soluções ajustadas às suas condições ecológicas, sociais e econômicas.

Apesar das contribuições significativas, algumas limitações devem ser reconhecidas. A primeira delas diz respeito à disponibilidade e heterogeneidade dos dados espaciais, o que impôs desafios na integração de múltiplos indicadores ambientais e socioeconômicos. Embora a lógica fuzzy tenha se mostrado eficiente para

lidar com incertezas nos dados, pesquisas futuras podem explorar a incorporação de conjuntos de dados de maior resolução e o uso de monitoramento ambiental em tempo real, aprimorando a precisão do modelo.

Além disso, a validação do modelo foi realizada por meio da consulta a especialistas, o que forneceu insights qualitativos valiosos, mas poderia ser complementada por avaliações empíricas a partir do monitoramento de longo prazo de projetos de infraestrutura verde. Estudos futuros podem incluir análises comparativas em diferentes contextos urbanos para testar a escalabilidade e adaptabilidade do arcabouço proposto.

Outro aspecto relevante é a ausência de variáveis econômicas e institucionais no modelo, visto que a pesquisa focou principalmente nos critérios ambientais e espaciais. Assim, recomenda-se que futuras investigações integrem modelos de avaliação econômica e análises de políticas públicas, tornando o processo de planejamento da infraestrutura verde mais alinhado com as realidades financeiras e institucionais dos municípios.

Com base nos achados desta dissertação, recomenda-se que futuras pesquisas:

- Ampliem a aplicação do modelo para diferentes contextos urbanos, testando sua adaptabilidade a cidades com condições socioambientais e estruturas de governança diversas;
- Integrem técnicas de aprendizado de máquina e inteligência artificial para aprimorar a modelagem preditiva e automatizar processos de tomada de decisão;
- Incorporem restrições financeiras e institucionais no arcabouço de suporte à decisão, possibilitando um planejamento urbano mais abrangente e realista;
- Realizem validações empíricas do modelo, acompanhando a efetividade das intervenções de infraestrutura verde ao longo do tempo;
- Aprimorem a participação de stakeholders, utilizando metodologias de planejamento participativo para incluir a percepção da comunidade no processo decisório.

Os resultados desta pesquisa evidenciam o potencial da lógica fuzzy como uma ferramenta robusta para o planejamento urbano sustentável, especialmente na gestão da infraestrutura verde. A integração de análise multicritério, geoprocessamento e inteligência artificial proporcionou uma abordagem inovadora e estruturada para apoiar a gestão de cidades mais resilientes e sustentáveis. Os achados reforçam que metodologias orientadas por dados podem servir como ferramentas essenciais para tomadores de decisão, planejadores urbanos e gestores ambientais, auxiliando na construção de cidades que conciliem preservação ecológica, qualidade de vida e viabilidade econômica em seus processos de crescimento e desenvolvimento urbano.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *Certificado de Conformidade nº 564.001/22*. Rio de Janeiro, 2022.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 37.120: Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida*. Rio de Janeiro, 2020a.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 37.122: Cidades e comunidades sustentáveis – Indicadores para cidades inteligentes*. Rio de Janeiro, 2021.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR ISO 37.123: Cidades e comunidades sustentáveis - Indicadores para cidades resilientes*. Rio de Janeiro, 2020b.

ALVARENGA, D. N.; RESCHILIAN, P.R.; GUERRA, R. Local de Moradia e Vulnerabilidade Social na Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte e em São José dos Campos – SP. *Oculum Ensaios*, v. 15, n. 1, p. 149 – 169, 2018

ANDRADE, D. J.; SOUZA, A. A. M. Análise Temporal da Expansão Urbana nos Municípios do Vale do Paraíba. *Mercator*, v.18, 2019.

ARTMANN, M.; BASTIAN, O.; GRUNEWALD, K. Using the concepts of green infrastructure and ecosystem services to specify Leitbilder for compact and green cities – the example of the landscape plan of Dresden. *Sustainability*, v.9, n.2, p. 198, 2017.

BENEDICT, M. A.; MCMHON, E. T. *Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities*. Washington, DC: Island Press, 2006.

BRAGUETTA, M. B.; NAGAI, R.; TRUITE, R. N.; GALVÃO, D. S. P.; TOLEDO, L. A. A Decisão Estratégica da Localização e o Surgimento dos Tecnopolos: o Caso de São José dos Campos. *Revista de Administração Mackenzie*, v. 7, n. 3, p 11-31, 2017.

BRESSANE, A.; BAGATINI, J. A.; BIAGOLINI, C. H.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M.; LONGO, R. W.; FENGLER, F. H. Neuro-fuzzy modeling: a promising

alternative for risk analysis in urban afforestation management. *Journal of Brazilian Forest Science*, v. 42, n. 1, p. 1 – 10, 2018b.

BRESSANE, A.; BIAGOLINI, C. H., MOCHIZUKI, P. S.; ROVEDA, J. A. F.; LOURENÇO, R. W. Fuzzy-based methodological proposal for participatory diagnosis in the linear parks management. *Ecological Indicators*, v. 80, p. 153-162, 2017.

BRESSANE, A.; FENGLER, F. H.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M.; MARTINS, A. C. G. Arboreal identification supported by fuzzy modeling for trunk texture recognition. *Trends in Applied and Computation Mathematics*, v. 19, p. 111-126, 2018a.

BRESSANE, A.; GOULART, A. P. G.; MELO, C. P.; GOMES, I. G.; LOUREIRO, A. I. S.; NEGRI, R. G.; MORUZZI, R.; REIS, A. G.; FORMIGA, J. K. S.; SILVA, G. H. R.; THOME, R. F. A Non-Hybrid Data-Driven Fuzzy Inference System for Coagulant Dosage in Drinking Water Treatment Plant: Machine-Learning for Accurate Real-Time Prediction. *Water*, v. 15, p. 1126, 2023a.

BRESSANE, A.; MOCHIZUKI, P. S.; CAIRAM, R. M.; ROVEDA, J. A. F. A system for evaluation the impact of noise pollution on the population's health. *Reports in Public Health*, v. 32, n. 5, p. 1-11, 2016a.

BRESSANE, A.; MOTA, M.T.; FENGLER, F. H.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M.; MEDEIROS, G. A.; RIBEIRO, A. I. Alternative scenario simulation for urban sprawl based on population dynamics: A methodological proposal. *Fronteiras*, v. 8, n. 1, p. 265-281, 2019.

BRESSANE, A.; ROSA, G. C. S.; GOMES, I. G.; BRANDELIK, C. C. M.; SILVA, M. B.; SIMINSKI, A.; NEGRI, R. G. Computer-aided classification of successional stage in subtropical Atlantic Forest: a proposal based on fuzzy artificial intelligence. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 195, p. 184, 2023b.

BRESSANE, A.; SILVA, P. M.; FIORE, F. A.; CARRA, T. A.; EWBANK, H.; DE-CARLI, B. P.; MOTA, M. T. Fuzzy-based computational intelligence to support screening

decision in environmental impact assessment: a complementary tool for a case-by-case project appraisal. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 85, p. 106 – 446, 2020.

BRESSANE, A.; SPALDING, M.; ZWIRN, D.; LOUREIRO, A. I. S.; BANKOLE, A. O.; NEGRI, R. G.; BRITO JUNIOR, I.; FORMIGA, J. K. S.; MEDEIROS, L. C. C.; BORTOLOZO, L. A. P.; MORUZZI, R. Fuzzy Artificial Intelligence - Based Model Proposal to Forecast Student Performance and Retention Risk in Engineering Education: An Alternative for Handling with Small Data. *Sustainability* **JCR**, v. 14, p. 14071, 2022.

CANIANI, D.; LABELLA, A.; LIOI, D. S.; MANCINI, I. M.; MASI, S. Habitat ecological integrity and environmental impact assessment of anthropic activities: A GIS-based fuzzy logic model for sites of high biodiversity conservation interest. *Ecological Indicators*, v. 31, n. 67, p. 238 – 249, 2016.

CHENG, T. J.; YU, X.; SU, Q. Surface-water Water Quality Evaluation Based on Fuzzy Pattern Recognition Model. *Trans. On Environment, Energy and Earth Science*, p. 1-6, 2016.

COSTA, Amanda; MOURA, Leandro. Desafios para a Integração entre Saúde e Sustentabilidade nas Cidades Brasileiras. *Revista Brasileira de Planejamento Urbano*, v. 18, n. 2, p. 55-72, 2023.

ENSSLE, F.; KABISCH, N. Urban green spaces for the social interaction, health and wellbeing of older people – An integrated view of urban ecosystem services and socio environmental justice. *Environ. Sci. Policy*, v. 109, p. 36-44, 2020.

FERRER, A. I. C.; THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, A. J. Sustainable urban infrastructure: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 128, p. 360 – 372, 2018.

FORLIN, L. G.; COSTA, S. M. F. Urbanização e segregação sócio-espacial na cidade de São José dos Campos-SP: o caso Pinheirinho. *Geosul*, v. 25, n. 49, p 123-158, 2010.

GILL, S. E.; HANDLEY, J. F.; ENNOS, A. R.; PAULEIT, S. Adapting cities for climate change: the role of green infrastructure. *Built Environment*, v. 33, n. 1, p. 115-133, 2007.

HANSEN, R.; OLAFSSON, A. S.; VAN DER JAGT, A. P. N.; RALL, E.; PAULEIT, S. Planning multifunctional green infrastructure for compact cities: What is the state of practice? *Ecological Indicators*, v. 96, p. 99-110, 2019.

KLOMPMAKER, J. O.; HOEK, G.; BLOEMSMA, L. D.; GEHRING, U.; STRAK, M.; WIJGA, A. H.; VAN DER BRINK, C.; BRUNEKREEF, B.; LEBRET, E.; JANSSEN, N. A. H. Green space definition affects associations of green space with overweight and physical activity. *Environ. Res*, v. 160, p. 531 – 702, 2018.

KOC, C. B.; OSMOND, P.; PETERS, A. Towards a comprehensive green infrastructure typology: a systematic review of approaches, methods, and typologies. *Urban Ecosyst*, v. 20 p. 15-35, 2017.

LEDDA, A.; DE MONTIS, A. Infrastructural landscape fragmentation versus occlusion: A sensitivity analysis. *Land use policy*, v. 83, p. 523-531, 2019.

LI, Xia; ZHOU, Wei; CHEN, Lin. Applications of Fuzzy Logic in Urban Environmental Planning: A Systematic Review. *Environmental Modelling & Software*, v. 157, p. 105458, 2022.

MACHADO, A. R.; CAVANI, A. C. M.; SOUZA, C. A.; SOLERA, M. L.; LONGO, M. H. C.; VELASCO, G. D. N.; IKEMATSU, P.; AMARAL, R. D. A. M. *Guia metodológico para implantação de infraestrutura verde*. São Paulo, IPT, 2020.

MEHRYAR, S.; SLIUZAS, R.; SHARIFI, A.; RECKIEN, D.; VAN MAARSEVEEN, M. A structured participatory method to support policy option analysis in a social-ecological system. *Journal of Environmental Management*, v.15, n. 197, p. 360 – 372, 2017.

MENEZES, Pedro; SOUZA, Ana; CASTRO, Felipe. Inteligência Artificial e Lógica Fuzzy: Aplicações Emergentes no Planejamento Urbano Sustentável. *Revista Brasileira de Inteligência Artificial*, v. 5, n. 1, p. 45-60, 2023.

NAÇÕES UNIDAS. Revision of World Urbanization Prospects. 2018. Disponível em: <https://population.un.org/wup/DataQuery/> Acessado: 02/05/2023.

NEFEDOV, V. Green Infrastructure integration in the urban periphery. *Urban Design and Planning*, v.170, p.47-58, 2017.

NIEUWENHUIJSEN, N. J. Green Infrastructure and Health. *Annu. Rev. Public Health*, v. 42, p. 317-328, 2021.

NIKIFOROVA, A. A.; FLEIS, M. E.; KAZANTSEV, N. N. Multi-scale soil-landscape maps as the basis of geographic information systems for soil melioration. *Earth and Environmental Science*, v. 368, p. 1-6, 2019.

OLIVEIRA, Fernanda; SOUSA, Carlos; LIMA, Roberta. Cidades Sustentáveis: Planejamento Urbano e Mudanças Climáticas. *Revista de Desenvolvimento Sustentável*, v. 14, n. 1, p. 101-118, 2022.

RAMELI, N.; RAMLI, F.; SALLEH, D. Urbanization and Quality of Life: A Comprehensive Literature. *J. of Social Transformation and Regional Development*, v.1, n.2, p.24-32, 2019.

RAMOS, Beatriz; DIAS, Marcelo. Planejamento de Infraestrutura Verde: Integração de Dados Espaciais com Lógica Fuzzy. *Cadernos de Geoprocessamento*, v. 19, n. 2, p. 89-104, 2024.

REANI, R. T.; MACHADO, R. P. P. A Influência do Meio no Planejamento Urbano: O Caso de São José dos Campos – SP. *Revista Geográfica de América Central*, p. 1-17, 2011.

SANTOS, M. F. N. dos; ENOKIBARA, M. Infraestrutura verde: conceitos tipologias e terminologia no Brasil. *Paisagem e Ambiente*, v. 32, n. 47, 2021.

SILVA, Mariana; PEREIRA, João. Cidades Saudáveis: Um Modelo para o Século XXI. *Saúde e Ambiente em Foco*, v. 9, n. 3, p. 203-220, 2021.

SINGH, Rajesh; KUMAR, Deepak; SHARMA, Alok. Fuzzy Logic Systems: Trends and Future Perspectives. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, v. 14, n. 6, p. 1234-1245, 2021.

SUN, Y.; DENG, L., PAN.; CHIANG, P.; SABLE, S. S.; SHAH, K. J. Integration of green and gray infrastructures for sponge city. *Water-Energy Nexus*, v.3, p. 29-40, 2020.

WANG, S.; BAI, X.; ZHANG, X. Urbanization can benefit agricultural production with large-scale farming in China. *Nat Food*, v.2, p. 183-191, 2021.

WCCD. The World Council on City Data. About the World Council on City Data Created by Cities, for Cities. Disponível em: <https://www.dataforcities.org/about-wccd>. Acessado em: 30 de fev de 2024.

YANG, Y.; TANG, D.; YANG, X. Investigating the spatio-temporal variations of the impact of urbanization on haze pollution using multiple indicators. *Stoch Environ Res Risk Assess*, v. 35, p. 703 – 717, 2021.

ZHANG, K.; ACHARI, G.; LI, H.; ZARGAR, A.; SADIQ, R. Machine learning approaches to predict coagulant dosage in water treatment plants. *Int. J. Assur. Eng. Manag.*, v.4, n.2, p. 205 – 214, 2013.

ZHOU, G.; PAN, Q.; YUE, T.; WANG, Q.; SHA, H.; HUANG, S.; LIU, X. Vector and raster data storage based on Morton code. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v.3, p. 2523-2526, 2018.