

Sistema Fuzzy de Apoio à Gestão da Infraestrutura Verde Urbana

Fuzzy-based Support System for Urban Green Infrastructure Management

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

^{*}Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, adriano.bressane@unesp.br

^{**}Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, leonardo.nomura@unesp.br

^{***}Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia de Sorocaba, felipe.fengler@facens.br

^{****}Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, lilium.medeiros@unesp.br

^{*****}Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Estadual Paulista, rogerio.negri@unesp.br

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v61i1.94098>

Resumo

Enfrentar desafios do rápido crescimento das cidades, enquanto se preserva os ecossistemas e a qualidade de vida humana, é um desafio complexo para o desenvolvimento urbano sustentável. Este estudo propõe um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para a gestão da Infraestrutura Verde Urbana (IVU). O SSD, desenvolvido com base em inteligência artificial fuzzy, foi projetado para lidar com incertezas inerentes à integração de dados geoespaciais no ambiente de um Sistema de Informação Geográfica. A seleção das variáveis e parâmetros foi realizada por meio de revisão da literatura e consulta a especialistas utilizando o método Delphi. Para verificar o potencial SSD, foi 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.

Palavras-chave:

Infraestrutura Verde, Cidades Sustentáveis, Lógica Fuzzy, Inteligência Artificial.

Abstract

Dealing with the challenges of rapid urban growth while preserving ecological ecosystems and human quality of life is a hard task and a cornerstone of sustainable urban development. This study proposes a Decision Support System (DSS) for the management of Urban Green Infrastructure (UGI). The DSS was developed using fuzzy artificial intelligence to address uncertainties inherent in the integration of geospatial data within the computational environment of a Geographic Information

System. The selection of variables and configuration parameters was based on a literature review and expert consultation through the Delphi method. To verify the potential of the DSS, a case study was developed in the Biological Reserve of Serra do Japi. The results indicate that the DSS serves as a promising tool for planners, policymakers, and researchers, capable of supporting data-driven recommendations through case-by-case analyses. Future research could explore the integration of additional indicators, enhance the inference mechanism, and extend the application of the DSS across diverse urban contexts to optimize its versatility and effectiveness in UGI management.

Keywords:

Green Infrastructure, Sustainable Cities, Fuzzy Logic, Artificial Intelligence.

I. INTRODUÇÃO

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 (BLASI et al., 2022; DEMIREL, 2023). Para essa transformação, emerge como estratégia a Infraestrutura Verde Urbana (IVU), que compreende uma rede de espaços naturais e seminaturais, incluindo fragmentos florestais, parques urbanos, jardins e corredores verdes, estrategicamente planejados e gerenciados para oferecer serviços ecossistêmicos essenciais. A IVU visa promover ambientes resilientes e habitáveis, além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, melhoria da qualidade do ar e água, e aumento da biodiversidade urbana (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; 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).

No presente estudo foi desenvolvido 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). Um SSD é uma ferramenta que auxilia na tomada de decisões complexas ao integrar dados, modelos analíticos

e regras lógicas. Esses sistemas são essenciais para a gestão eficiente da IVU, permitindo análises e simulações baseadas em múltiplas variáveis ambientais e urbanas. Existem diferentes tipos de SSD, incluindo aqueles baseados em inteligência artificial (IA), modelos estatísticos, e lógica fuzzy, cada um adequado a diferentes cenários de incerteza e complexidade de dados.

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 de representação (ZHOU et al., 2018), o SSD proposto neste estudo emprega a lógica fuzzy. Esta escolha deve-se à capacidade da lógica fuzzy de manejar incertezas e proporcionar uma modelagem mais intuitiva e adaptativa do raciocínio humano, facilitando a integração de dados complexos e a formulação de recomendações precisas para a gestão das IVU.

Em especial, devido a sua reconhecida capacidade em lidar com incertezas, a lógica fuzzy tem sido amplamente utilizada na construção de sistemas de gestão ambiental para suporte à tomada de decisões complexas, tais como a ponderação de impactos ambientais, diagnóstico participativo, planejamento de uso do solo, alocação e otimização de recursos, gestão de riscos ambientais etc. (BRESSANE et al., 2016; BRESSANE et al., 2017; MOTA et al., 2019; BRESSANE et al., 2020; EWBANK et al., 2020; BRESSANE et al., 2022; BRESSANE et al., 2023a; BRESSANE et al., 2023b).

Dessa forma, o objetivo desse estudo foi propor e avaliar a capacidade do SSD em apoiar a tomada de decisões relacionadas à gestão sustentável de espaços verdes urbanos, considerando variáveis ambientais, urbanísticas e sociais, para promover a resiliência urbana, melhorar a qualidade de vida das populações e mitigar os efeitos das mudanças climáticas nas cidades.

II. 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 envolveu 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*, *Science Direct* e *Scopus*, 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 (BRESSANE 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 (BRESSANE 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.

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

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.
Bressane 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.
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.

(Fonte: autor 1).

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.

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).

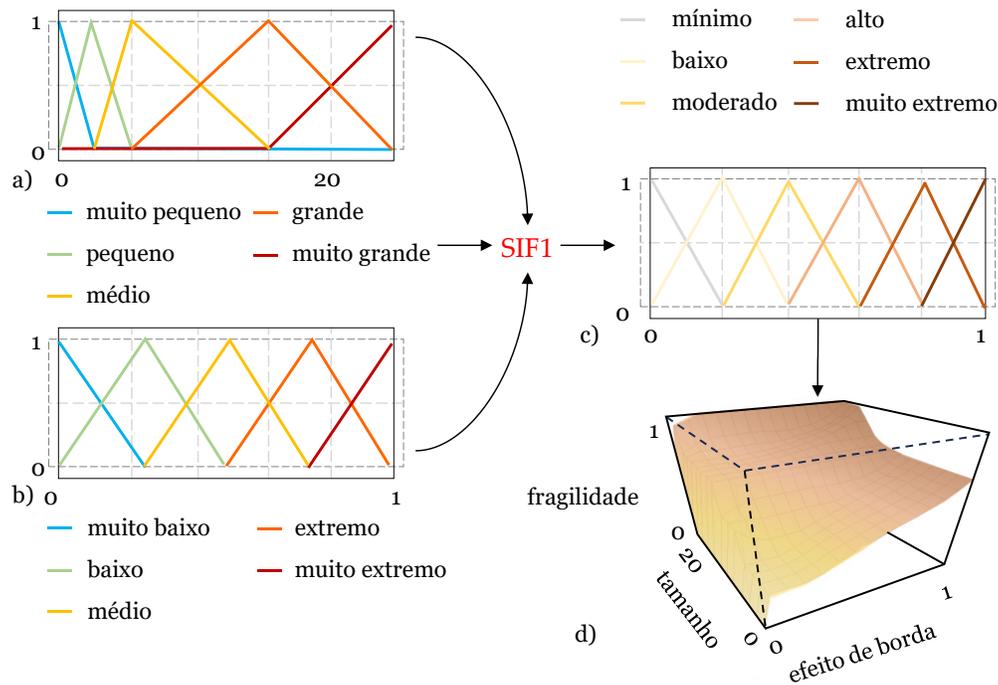


Figura 1 - SIF1: a) Tamanho; b) Efeito de borda; c) Índice de fragilidade; d) Superfície de decisão (Fonte: autor 1).

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

		Efeito de borda				
		muito baixo	baixo	médio	alto	muito alto

	muito pequeno	moderado	alto	extremo	muito extremo	muito extremo
Tamanho	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

(Fonte: autor 1).

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).

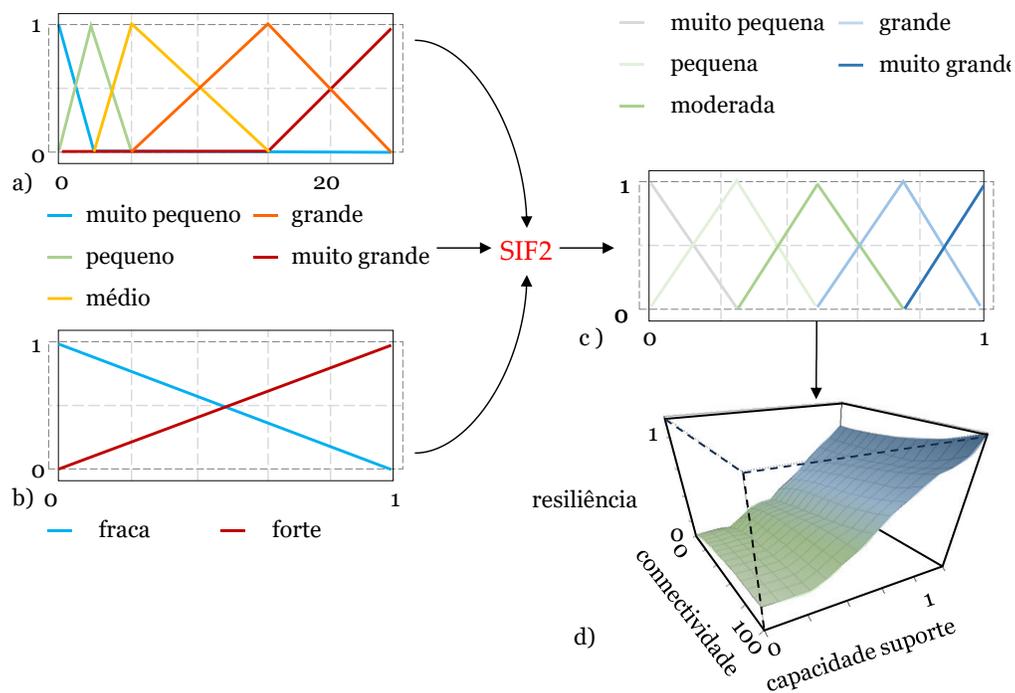


Figura 2 – SIF2: a) Conectividade; b) Capacidade suporte; c) Índice de resiliência; d) Superfície de decisão (Fonte: autor 1).

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

(Fonte: autor 1).

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 sobrepôr 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).

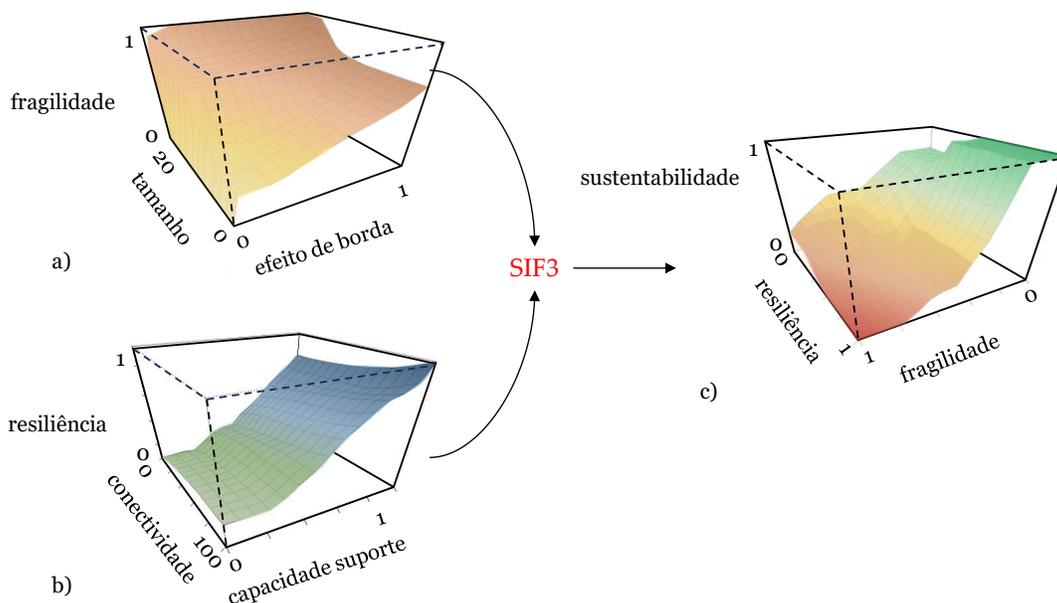


Figura 3 – SIF2: a) Índice de fragilidade; b) Índice de resiliência; c) Índice de sustentabilidade (Fonte: autor 1).

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

(Fonte: autor 1).

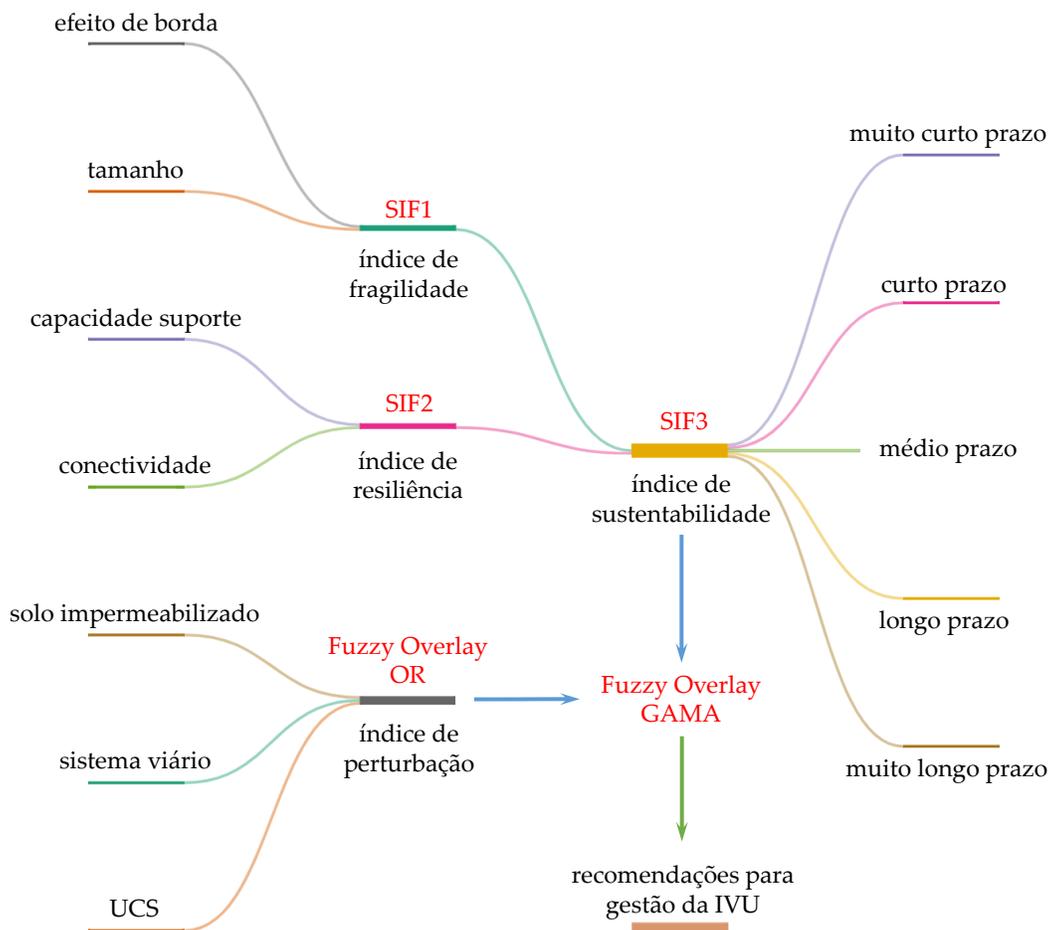


Figure 4 – Arquitetura do sistema de suporte à decisão baseado em inteligência artificial Fuzzy (Fonte: autor 1).

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.	(i) criar zonas de amortecimento ao redor da IVU para mitigar perturbações externas e salvaguardar sua integridade diante da expansão urbana; (ii) implementar monitoramento da biodiversidade para avaliar a saúde 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 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.
[0,6 0,8[IVU com sustentabilidade de longo prazo; sobre pouco efeito de perturbações, prevalecendo elementos de conservação.	(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.
[0,4 0,6[IVU com sustentabilidade de médio prazo; em estado impactado por perturbações, com conservação limitada.	(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.
[0,2 0,4[IVU com sustentabilidade de curto prazo; exibe características de forte efeito de fontes de perturbação.	(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.
[0,0 0,2[IVU com sustentabilidade de muito curto prazo; sob efeito extremo de fontes de perturbação.	(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 integram 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.

(Fonte: autor 1).

Para demonstrar e discutir seu potencial, o sistema proposto foi aplicado à análise da IVU na bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim, considerada uma parte integral da IVU, por compreender uma rede de espaços naturais e seminaturais, capazes de oferecer serviços ecossistêmicos, como regulação climática, purificação da água e do ar, e espaços para recreação e conservação da biodiversidade. Esta bacia está localizada na Reserva Biológica da Serra do Japi, na cidade de Jundiá, Estado de São Paulo (SP), Brasil, uma área de relevante interesse ambiental e urbano (Figura 5).

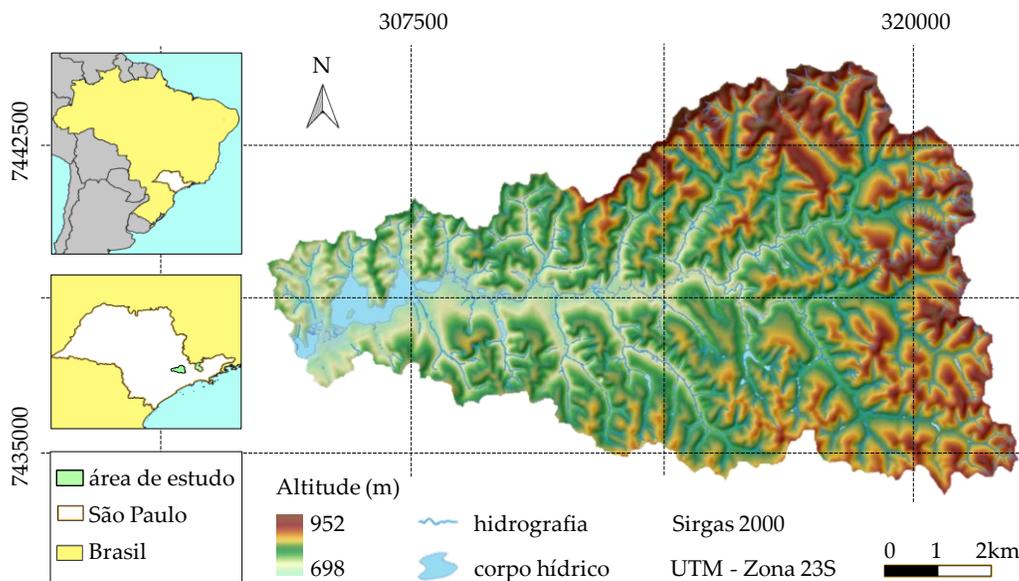


Figura 5 – Área de estudo – bacia hidrográfica do rio Jundiá-Mirim (Fonte: autor 1).

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 geospaciais 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, sendo as quais o efeito de borda e tamanho da área para análise da fragilidade da IVU, a capacidade suporte e a conectividade para análise da resiliência da

IVU, e pelo mapeamento das fontes de perturbação (solo impermeabilizado, sistema viário, uso e cobertura do solo) 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 (Fonte: autor 1).

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.

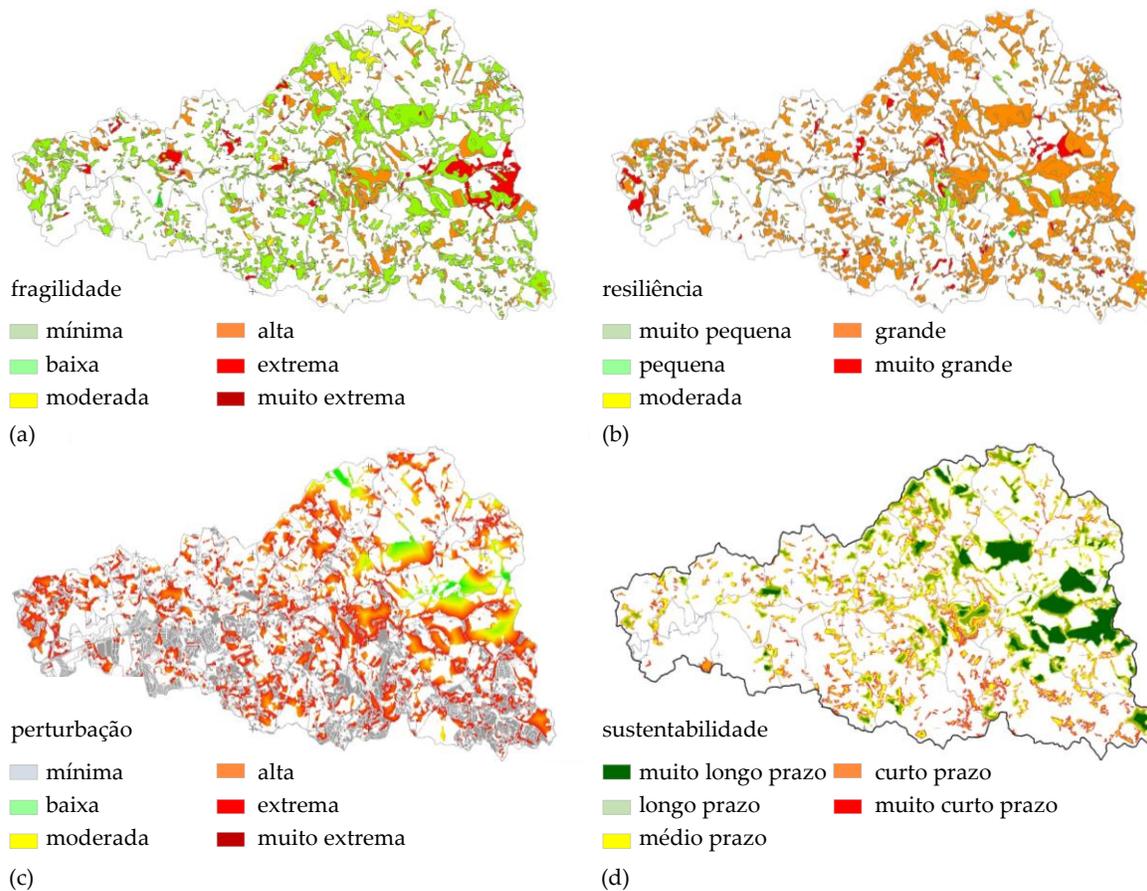


Figura 6 – IVU: (a) fragilidade baseada no SIF1, (b) resiliência baseada no SIF2, (c) perturbação baseada na sobreposição fuzzy - OR, e (d) sustentabilidade baseada no SIF3 (Fonte: autor 1).

A partir dos resultados da aplicação ao estudo de caso, 18 especialistas foram consultados para validar o SSD proposto, os quais foram selecionados pela experiência na área ambiental, incluindo acadêmicos, profissionais do setor público e privado, e especialistas com funções diversas. A validação ocorreu através de um formulário eletrônico que abordou a relevância e a sugestão de modificações dos indicadores, além da avaliação da coerência e aplicabilidade do modelo. A consulta indicou um consenso sobre a relevância dos indicadores e a adequação do modelo, apontando que os resultados foram gerados de forma coerente e eficaz. Assim, os resultados proporcionados pelo SSD proposto foram considerados 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.

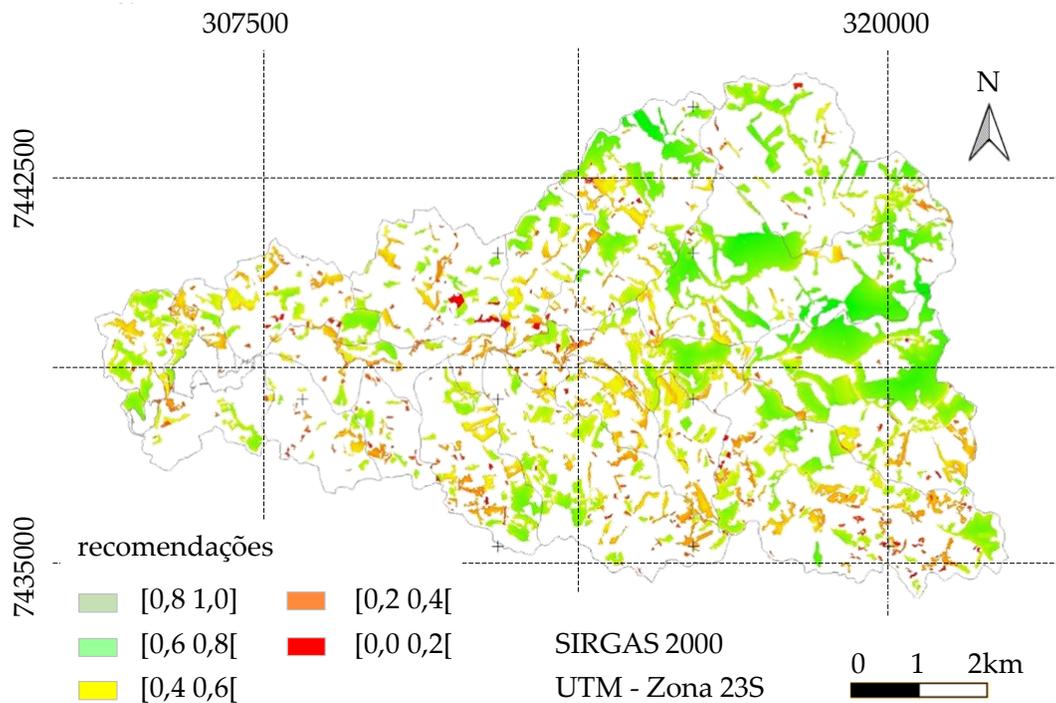


Figura 7 - Recomendações para gestão sustentável da IVU na área de estudo (Fonte: autor 1).

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. Entretanto, algumas fragilidades podem ser identificadas, como apontado a seguir.

Como uma limitação atual, o SSD foi validado por meio de consulta a especialistas baseada em um único estudo de caso. Essa abordagem de validação, embora rigorosa, limita a capacidade de generalizar o

desempenho do SSD em diferentes cenários urbanos. Estudos futuros devem buscar implementar o SSD em uma variedade de cenários urbanos. Essa aplicação mais ampla ajudará a verificar seu desempenho e robustez em configurações urbanas diversas, melhorando sua adaptabilidade e eficácia em diferentes condições ambientais e urbanas.

A integração de dados de múltiplas fontes, uma necessidade comum em estudos ambientais urbanos, envolve desafios relacionados à precisão, escala e atualidade dos dados. Essas questões podem impactar significativamente a precisão e a confiabilidade das análises. É crucial abordar esses desafios comparando o SSD com outros modelos ou métodos já estabelecidos. Tais comparações poderiam fornecer mais evidências da confiabilidade e aplicabilidade prática do sistema. Atualizar e verificar continuamente as fontes de dados também será essencial para manter a precisão e relevância do SSD.

Embora as validações iniciais sejam promissoras, há necessidade de testes e refinamentos contínuos para garantir que as decisões baseadas no SSD sejam confiáveis e aplicáveis na prática em cenários reais. Implementar o SSD em projetos reais e monitorar continuamente seus resultados fornecerá insights práticos e ajudará no aprimoramento do sistema. Colaborações com urbanistas e gestores ambientais poderiam facilitar essas implementações, proporcionando feedback direto dos usuários finais e das partes interessadas.

IV. CONCLUSÕES

Este estudo visou contribuir para o desafio complexo da gestão sustentável IVU. O SSD baseado em IA fuzzy emergiu como uma ferramenta promissora, facilitando a tomada de decisões orientada por dados ao fornecer recomendações estratégicas através de análises caso a caso. Portanto, é razoável concluir que o sistema proposto tem potencial para orientar urbanistas e formuladores de políticas públicas na promoção de ambientes urbanos que mantenham o equilíbrio ecológico enquanto promovem o bem-estar social e a prosperidade econômica.

Estudos futuros poderiam ampliar o escopo do SSD integrando novos indicadores e fontes de dados adicionais. Essa expansão permitiria uma análise mais abrangente da dinâmica da IVU e forneceria uma base mais rica para a tomada de decisões. Refinar os sistemas de inferência fuzzy existentes, considerando relações mais intrincadas entre variáveis, poderia melhorar a precisão e relevância das recomendações. Aprofundar-se nas interações entre fatores ecológicos, sociais e econômicos pode proporcionar insights mais matizados. Estender a aplicação do SSD a diferentes contextos urbanos contribuiria para consolidar sua validação, demonstrando sua eficácia e versatilidade em diversos cenários. Essa aplicação mais ampla também testaria a

adaptabilidade e robustez do SSD, fornecendo feedback valioso para refinamentos adicionais. A implementação eficaz das recomendações do SSD requer forte integração de políticas e engajamento ativo das partes interessadas. Desenvolver parcerias com governos locais, organizações comunitárias e agências ambientais será crucial para traduzir as percepções do SSD em estratégias de planejamento urbano acionáveis. Estabelecer mecanismos para monitoramento contínuo e feedback pode ajudar a ajustar dinamicamente as estratégias com base em dados em tempo real e condições urbanas em evolução. Essa abordagem de gestão adaptativa será essencial para manter a relevância e eficácia do SSD no planejamento urbano e ambiental de longo prazo.

Ao abordar essas direções futuras, o SSD pode evoluir para uma ferramenta ainda mais robusta, não apenas para avaliar e gerenciar os aspectos ecológicos da IVU, mas também para integrar dimensões sociais e econômicas, apoiando verdadeiramente o desenvolvimento urbano sustentável.

V. REFERÊNCIAS

- ABREU, K. M. P.; COUTINHO, L. M. Sensoriamento remoto aplicado ao estudo da vegetação com ênfase em índice de vegetação e métricas da paisagem. *Revista Vértices*, v. 16, n. 1, 2014, p. 177-202.
- ASSEDE, E. S.; OROU, H.; BIAOU, S. S.; GELDENHUYS, C. J.; AHONONGA, F. C.; CHIRWA, P. W. Understanding drivers of land use and land cover change in Africa: a review. *Current Landscape Ecology Reports*, 2023, p. 1-11.
- BARBOSA, A.; MARTÍN, B.; HERMOSO, V.; ARÉVALO-TORRES, J.; BARBIÈRE, J.; MARTÍNEZ-LÓPEZ, J.; IGLESIAS-CAMPOS, A. 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, 2019, p. 1463-1473.
- BIBRI, S. E. 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, 2021, p. 100047.
- 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, 2022, p. 103793.
- BRESSANE, A.; GOMES, I. G.; DA ROSA, G. C. S.; 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, n. 1, 2023a, p. 184.
- BRESSANE, A.; GOULART, A. P. G.; MELO, C. P.; GOMES, I. G.; LOUREIRO, A. I. S.; NEGRI, R. G.; THOMÉ, 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, n. 6, 2023b, p. 1126.
- BRESSANE, A.; MOCHIZUKI, P. S.; CARAM, R. M.; ROVEDA, J. A. F. A system for evaluating the impact of noise pollution on the population's health. *Cadernos de saúde pública*, 2016, v. 32.
- BRESSANE, A.; SPALDING, M.; ZWIRN, D.; LOUREIRO, A. I. S.; BANKOLE, A. O.; NEGRI, R. G.; 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*, v. 14, n. 21, 2022, p. 14071.

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, 2017, p. 153-162.

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. *Revista Árvore*, 2018, v. 42.

BRESSANE, A.; DA SILVA, P. M.; FIORE, F. A.; CARRA, T. A.; EWBANK, H.; DE-CARLI, B. P.; DA 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, 2020, p. 106446.

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 Forestry & Urban Greening*, v. 81, 2023, p. 127844.

CHENG, H.; PARK, C. Y.; CHO, M.; PARK, C. Water requirement of Urban Green Infrastructure under climate change. *Science of The Total Environment*, v. 893, 2023, p. 164887.

CUI, J.; ZHU, M.; LIANG, Y.; QIN, G.; LI, J.; LIU, Y. 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, 2022, p. 163.

DEMIREL, D. 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, 2023, p. 21582440231184971.

EWBANK, H.; FRUTUOSO ROVEDA, J. A.; MONTEIRO MASALSKIENE ROVEDA, S. R.; RIBEIRO, A. L.; BRESSANE, A.; HADI-VENCHEH, A.; WANKE, P. 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, 2020, p. 1059-1076.

FLORES, C. C.; VIKOLAINEN, V.; CROMPVOETS, J. 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, 2021, p. 103331.

GUARIZ, H. R.; GUARIZ, F. R. 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, 2020, p. 2193-2153.

HALDER, B.; BANDYOPADHYAY, J.; AL-HILALI, A. A.; AHMED, A. M.; FALAH, M. W.; ABED, S. A.; YASEEN, Z. M. Assessment of urban green space dynamics influencing the surface urban heat stress using advanced geospatial techniques. *Agronomy*, v. 12, n. 9, 2022, p. 2129.

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

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

KARIUKI, R. W.; MUNISHI, L. K.; COURTNEY-MUSTAPHI, C. J.; CAPITANI, C.; SHOEMAKER, A.; LANE, P. J.; MARCHANT, R. 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, 2021, p. e0245516.

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. *Science of the total environment*, v. 707, 2020, p. 135487.

LIMA, C. E. S.; DA SILVA, M. V. M.; ROCHA, S. M. G.; SILVEIRA, C. D. S. Anthropogenic 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, 2022, p. 12176.

LIMA, L. Z. B.; DOS SANTOS BATISTA, M.; FERRARETTO, T. R. G.; AUGUSTO, V. F. Pressure-state-response model for assessing environmental impacts in Serra do Japi. *Journal of Interdisciplinary Debates*, v. 4, n. 03, 2023, p. 119-127.

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. *Building and Environment*, v. 228, 2023, p. 109910.

LIU, X.; NIU, N.; LIU, X.; JIN, H.; OU, J.; JIAO, L.; LIU, Y. Characterizing mixed-use buildings based on multi-source big data. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 32, n. 4, 2018, p. 738-756.

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. *Sustainable Cities and Society*, v. 65, 2021, p. 102653.

MOTA, M. T. D.; BRESSANE, A.; ROVEDA, J. A. F.; ROVEDA, S. R. M. M. Classification of successional stages in Atlantic forests: a methodological approach based on a fuzzy expert system. *Ciência Florestal*, v. 29, 2019, p. 519-530.

NÄSCHEN, K.; DIEKKRÜGER, B.; EVERS, M.; HÖLLERMANN, B.; STEINBACH, S.; THONFELD, F. 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, 2019, p. 7083.

NASSARY, E. K.; MSOMBA, B. H.; MASELE, W. E.; NDAKI, P. M.; KAHANGWA, C. A. 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, 2022, p. 114786.

NIKIFOROVA, A. A.; FLEIS, M. E.; KAZANTSEV, N. N. 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, J. A. P.; BELLEZONI, R. A.; SHIH, W. Y.; BAYULKEN, B. Innovations in Urban Green and Blue Infrastructure: Tackling local and global challenges in cities. *Journal of Cleaner Production*, v. 362, 2022, p. 132355.

SILVA, A. L. D.; LONGO, R. M.; BRESSANE, A.; CARVALHO, M. F. H. D. Classification of urban forest fragments based on landscape metrics. *Ciência Florestal*, v. 29, 2019, p. 1254-1269.

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

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

ZHANG, D.; PEE, L. G.; PAN, S. L.; CUI, L. Big data analytics, resource orchestration, and digital sustainability: A case study of smart city development. *Government information quarterly*, v. 39, n. 1, 2022, p. 101626.

ZHENG, F.; XIAO, C.; FENG, Z. Impact of armed conflict on land use and land cover changes in global border areas. *Land Degradation & Development*, v. 34, n. 3, 2023, p. 873-884.

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. 42, 2018, p. 2523-2526.

ZHU, H.; SHEN, LIYIN; REN, Y. How can smart city shape a happier life? The mechanism for developing a Happiness Driven Smart City. *Sustainable cities and society*, v. 80, 2022, p. 103791.
