



**IV CONGRESSO INTERNACIONAL
AMBIENTE & SUSTENTABILIDADE**

**Saúde única planetária e suas relações
com as mudanças climáticas**

E-BOOK



**Alba Regina Azevedo Arana
Maria Eulaidia de Araújo
(Orgs.)**



científica digital



CIENTÍFICA DIGITAL EDITORIAL LTDA

Barueri - São Paulo - Brasil
www.cientificadigital.org - contato@cientificadigital.org

Diagramação e Arte	Edição © 2025 Científica Digital
Diego Santos	Texto © 2025 Os Autores
Diogo Lima	1ª Edição - 2025
Imagens da Capa	Acesso Livre - Open Access
IV CIAS - 2025	

© COPYRIGHT - TODOS OS DIREITOS RESERVADOS. A editora detém os direitos autorais sobre a edição e o projeto gráfico, enquanto os autores mantêm os direitos autorais de seus respectivos textos. Esta obra está licenciada sob a Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional, permitindo o download e compartilhamento integral ou parcial, desde que a fonte seja devidamente citada e os créditos atribuídos aos autores. É obrigatório que a obra permaneça em formato de Acesso Livre (Open Access), sem qualquer alteração. A catalogação em plataformas de acesso restrito ou com fins comerciais é estritamente proibida.



Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Q1 IV Congresso Internacional Ambiente e Sustentabilidade (IV CIAS 2025) / Organização de Alba Regina Azevedo Arana, Maria Eulaídia de Araujo. – Guarujá-SP: Científica Digital, 2025.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui Bibliografia
ISBN 978-65-5360-987-7
DOI 10.37885/978-65-5360-987-7

1. Sustentabilidade e meio ambiente - Eventos. I. Arana, Alba Regina Azevedo (Organizadora). II. Araujo, Maria Eulaídia de (Organizadora). III. Título.

CDD 363.7

Elaborado por Janaína Ramos – CRB-8/9166

Índice para catálogo sistemático:

I. Sustentabilidade e meio ambiente - Eventos

E-BOOK

ACESSO LIVRE ON LINE - IMPRESSÃO PROIBIDA

2025

Alba Regina Azevedo Arana
Maria Eulaidia de Araújo
(Orgs.)

**IV CONGRESSO INTERNACIONAL
AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE
(IV CIAS 2025)**

1ª EDIÇÃO



científica digital

2025 - BARUERI - SP

CONSELHO EDITORIAL

Prof. Dr. André Cutrim Carvalho
Prof. Dr. Antônio Marcos Mota Miranda
Prof^a. Ma. Auristela Correa Castro
Prof. Dr. Carlos Alberto Martins Cordeiro
Prof. Dr. Carlos Alexandre Oelke
Prof^a. Dra. Caroline Nóbrega de Almeida
Prof^a. Dra. Clara Mockdece Neves
Prof^a. Dra. Claudia Maria Rinhel-Silva
Prof^a. Dra. Clecia Simone Gonçalves Rosa Pacheco
Prof. Dr. Cristiano Marins
Prof^a. Dra. Cristina Berger Fadel
Prof. Dr. Daniel Luciano Gevehr
Prof. Dr. Diogo da Silva Cardoso
Prof. Dr. Ernane Rosa Martins
Prof. Dr. Everaldo dos Santos Mendes
Prof. Dr. Fabricio Gomes Gonçalves
Prof^a. Dra. Fernanda Rezende
Prof. Dr. Flávio Aparecido de Almeida
Prof^a. Dra. Francine Náthalie Ferraresi Queluz
Prof^a. Dra. Geuciane Felipe Guerim Fernandes
Prof. Dr. Humberto Costa

Prof. Dr. Joachin Melo Azevedo Neto
Prof. Dr. Jónata Ferreira de Moura
Prof. Dr. José Aderval Aragão
Prof. Me. Julianno Pizzano Ayoub
Prof. Dr. Leonardo Augusto Couto Finelli
Prof. Dr. Luiz Gonzaga Lapa Junior
Prof. Me. Marcelo da Fonseca Ferreira da Silva
Prof^a. Dra. Maria Cristina Zago
Prof^a. Dra. Maria Otília Zangão
Prof. Dr. Mário Henrique Gomes
Prof. Dr. Marcus Fernando da Silva Praxedes
Prof. Dr. Nelson J. Almeida
Prof. Dr. Pedro Afonso Cortez
Prof. Dr. Reinaldo Pacheco dos Santos
Prof. Dr. Rogério de Melo Grillo
Prof^a. Dra. Rosenery Pimentel Nascimento
Prof. Dr. Rossano Sartori Dal Molin
Prof. Me. Silvio Almeida Junior
Prof^a. Dra. Thays Zigante Furlan Ribeiro
Prof. Dr. Wescley Viana Evangelista
Prof. Dr. Willian Carboni Viana
Prof. Dr. Willian Douglas Guilherme

Acesse a lista completa dos Membros do Conselho Editorial em www.editoracientifica.com.br/conselho

Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem esta obra passaram por avaliação do Conselho Editorial e revisão por pares externos (*Peer Review*), recebendo a devida recomendação para publicação.

Nota: Esta obra é fruto de um processo colaborativo, configurando-se como uma coletânea na qual os direitos autorais permanecem resguardados para os respectivos autores. Alguns capítulos podem ter origem em trabalhos anteriormente apresentados em eventos acadêmicos; no entanto, os autores foram orientados a adotar o devido rigor na prevenção do autoplágio. A responsabilidade pelo conteúdo de cada capítulo, assim como pela originalidade e integridade das informações publicadas, é inteiramente dos respectivos autores e autoras. O conteúdo da obra não reflete, necessariamente, a opinião da editora, dos organizadores ou dos membros do conselho editorial.

APOIO



REALIZAÇÃO



PARCEIROS



EVENTOS INTEGRADOS

Nacionais



Internacionais

EVENTOS INTEGRADOS AO IV CIAS 2025 INTERNACIONAIS E NACIONAIS

Evento	Universidade/Instituição	Coordenadores
I Encontro do meio ambiente e sustentabilidade	Universidade Pedagógica de Maputo - Faculdade de Ciências da Terra e Ambiente - Moçambique	Francisca Ludovina Salomao Langa Gina Amélia Albino Sitoe
Workshop: Metodología para la elaboración de cartografía crítica de diagnóstico socio ecológico en comunidades vulnerables	Universidad Politécnica Salesiana - Sede Guayaquil - Ecuador	Maria Fernanda Viteri Palomeque
Meia Jornada França - Brasil-Haïti - África	CEFREPADE	Pascale Martel Naquin Julien Prieur
SIMEA - IV Simpósio Internacional de Meio Ambiente	UNOESTE - Presidente Prudente - SP - Brasil	Alba Regina Azevedo Arana
SInTeL - III Simpósio Internacional De Tecnologias Limpas	UniCesumar - Maringá - Paraná - Brasil	Márcia Aparecida Andreazzi Aline Lopes
II Encontro de Psicologia e Relações Humano Ambientais.	LERHA/UNIFOR - Fortaleza-Ceará - Brasil	Karla Patrícia Martins Ferreira Renata Bezerra de Holanda Bessa
I Workshop “Mudanças climáticas, segurança alimentar e florestas” - Assessoria Especializada na Articulação dos ODS - Uema, Projeto Floresta+Amazônia, o Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente - Uniceuma e Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias	UEMA - São Luís - Maranhão - Brasil	Ariadne Enes Rocha Claudia Costa e Silva
I Seminário Saúde Global das Populações do Campo, da Floresta e das Águas- (PopFlora)	Universidade do Estado do Amazonas - Manaus - Amazônia - Brasil	Socorro de Fátima Moraes Nina
III Seminário: Biodança e políticas públicas: uma abordagem integrativa para saúde mental e ambiental	ABRAÇA - Associação Brasileira de Facilitadores de Biodança - Brasília - Brasil	Wanderléia Coelho Maria Eulaidia de Araujo
Workshop: Justiça Climática e ODS: Construindo um Futuro Sustentável e Inclusivo	UNIVALI - Universidade do Vale do Itajaí, Campus Itajaí - Florianópolis Santa Catarina - Brasil	Camille Rebeca Bruns Gisele Victor Batista
II Simpósio Internacional de Meio Ambiente e Promoção da Saúde - (SIMApS) - Programa de Pós Graduação em Promoção de Saúde	Universidade de Franca UNIFRAN - Pró-reitoria de Pós-graduação CSED - UNIFRAN, UNICID e UDF - Franca - SP - Brasil	Marisa Brunherotti Liziane Marcal

PREFÁCIO

Saúde Única Planetária e Sustentabilidade: Reflexões e Conexões Interdisciplinares

É com grande satisfação que apresentamos ao público esta obra, compilação dos trabalhos e debates que nortearam o **IV Congresso Internacional Ambiente e Sustentabilidade (IV CIAS 2025)**. Este livro não é apenas uma coletânea de artigos, é o reflexo de um compromisso multidisciplinar e internacional com o mais urgente desafio de nossa era: garantir um planeta saudável e justo para as gerações presentes e futuras.

O conceito de Saúde Única Planetária emerge como um farol neste contexto, iluminando a inextricável ligação entre o bem-estar humano, a saúde animal e a integridade dos ecossistemas. As mudanças climáticas não são uma ameaça distante, mas uma realidade visceral que amplifica crises sanitárias, alimentares, hídricas e sociais, expondo com crude as desigualdades do nosso tempo. O **IV CIAS 2025** se propõe a ir além do diagnóstico, assumindo uma postura proativa na busca por soluções sistêmicas e colaborativas.

A abrangência geográfica e temática deste congresso – com contribuições de Argentina, Benin, Colômbia, Espanha, França, Guayaquil - Equador, Guiné-Bissau, Inglaterra, Itália, Moçambique, Panamá, e de diversos cantos do Brasil – enriquece profundamente nossa compreensão. Traz à tona vozes plurais, experiências diversificadas e saberes tradicionais e científicos que, quando integrados, formam o mosaico completo necessário para enfrentar problemas complexos. Os eixos temáticos que estruturam nosso debate – das mudanças climáticas e saúde global ao racismo ambiental, das inovações tecnológicas às políticas públicas – foram cuidadosamente escolhidos para fomentar uma análise crítica e construtiva.

Os capítulos que se seguem são fruto deste espírito colaborativo. Eles representam a vanguarda da pesquisa e da prática em suas respectivas áreas, cada um contribuindo com uma peça vital para esse quebra-cabeça multidimensional. Convidamos você, leitor, a percorrer estas páginas não como um mero observador, mas como um participante ativo nesta conversa global. Que os conhecimentos aqui compartilhados inspirem novas perguntas, fortaleçam ações concretas e reforcem nosso senso de responsabilidade compartilhada.

A presente obra financiada pela Capes, por meio do Projeto Paep 2025, reúne contribuições científicas que iluminam os desafios contemporâneos das mudanças climáticas e suas inter-relações com a saúde única planetária. O livro reflete a riqueza de perspectivas interdisciplinares e o compromisso da comunidade acadêmica com a construção de sociedades mais justas, resilientes e sustentáveis.

Coletivamente, estes capítulos formam um mosaico robusto e interdisciplinar que perfeitamente se alinha com a proposta do IV CIAS 2025. Eles transitam desde a microescala da saúde mental em ambientes urbanos até a macroescala do monitoramento global de carbono florestal, sempre mantendo o fio condutor da Saúde Única Planetária.

Cada capítulo é uma peça fundamental neste mosaico de reflexões:

1. Mapeamento da vegetação urbana por sensoriamento remoto e aprendizagem de máquina: uma revisão do estado da arte – Apresenta um panorama metodológico atualizado, evidenciando o papel das geotecnologias e da inteligência artificial no monitoramento da vegetação urbana, essencial para o planejamento ambiental e a mitigação das mudanças climáticas. O estudo realiza uma revisão sistemática das abordagens metodológicas aplicadas ao mapeamento da vegetação urbana por meio de sensoriamento remoto e técnicas de aprendizagem de máquina, incluindo tanto métodos tradicionais (*shallow learning*) quanto redes neurais profundas (*deep learning*). A principal contribuição é a identificação das metodologias mais recorrentes, suas limitações e as perspectivas para futuras pesquisas.

2. O verde também polui: uma sequência didática baseada na abordagem CTS para discutir os impactos ambientais da energia solar – Debate os paradoxos da sustentabilidade ao propor práticas pedagógicas que desmistificam a ideia de tecnologias verdes como soluções isentas de impactos, estimulando uma visão crítica e cidadã. O objetivo foi ampliar a discussão sobre os impactos socioambientais da geração de energia solar com estudantes da 3ª série do Ensino Médio em uma escola da rede estadual do Rio Grande do Sul.

3. Climate Change: Truths and Fallacies – O estudo identifica verdades comprovadas sobre o aquecimento global e seus impactos ambientais, ao mesmo tempo em que desmascara falácias sustentadas por argumentos pseudocientíficos ou ideológicos. Busca preencher uma lacuna ao contrastar

sistematicamente as principais verdades científicas com as falácias mais recorrentes, oferecendo um referencial analítico para compreender a desinformação climática e promover maior engajamento público e político. Ao examinar a instrumentalização política dos discursos negacionistas, o artigo evidencia os riscos da desinformação na formulação de políticas públicas e na mobilização social diante da crise climática. Fundamentado em autores de referência e modelos reconhecidos, ressalta que, embora a ciência do clima seja complexa, mantém consenso em aspectos cruciais. Conclui que a compreensão crítica dos fatos é essencial para enfrentar os desafios das mudanças climáticas de forma ética, científica e responsável.

4. Vegetação Arbórea Urbana sob Pressão Climática: Análise Espacial em Viamão-RS (2023-2024) – faz uma análise analisar especial da perda de cobertura arbórea em Viamão-RS entre 2023 e 2024, um período marcado por desastres climáticos extremos, relacionando-a com expansão urbana e a maior susceptibilidade a inundações. Este trabalho é um estudo de caso emblemático para praticamente todos os eixos do congresso, especialmente “Mudanças climáticas e saúde global”, “Racismo ambiental e justiça climática” e “Ação ambiental nos espaços urbano e rural”. Ele demonstra concretamente como a perda de infraestrutura verde natural (vegetação) aumenta a vulnerabilidade de um território aos desastres climáticos, afetando diretamente a saúde e a segurança das populações. A metodologia empregada oferece uma ferramenta robusta para o planejamento urbano sustentável e ações de adaptação baseadas em evidências.

5. Externalidades da energia eólica no Brasil: uma análise à luz do Teorema de Coase – Discute os benefícios e os efeitos colaterais da expansão da energia eólica, relacionando teoria econômica, conflitos socioambientais e políticas públicas para uma transição energética mais justa. O artigo investiga se tais externalidades podem ser internalizadas por meio de negociações privadas, utilizando o Teorema de Coase como referencial teórico. A partir de uma revisão bibliográfica e de uma análise comparativa com a experiência alemã, constata-se que, apesar da eficácia teórica da solução coasiana, fatores como insegurança fundiária, assimetria de informação e altos custos de transação dificultam acordos puramente privados no contexto brasileiro.

6. A systematic review over machine and deep learning applications on remote sensing forest carbon monitoring – Apresenta uma revisão sobre o uso de inteligência artificial no monitoramento do carbono florestal, reforçando o papel dessas tecnologias no combate às mudanças climáticas. Esta revisão

sistemática analisou 59 estudos publicados em bases como Scopus, Web of Science, Google Scholar e SciELO, selecionados por meio de estratégias estruturadas de busca booleana, que aplicaram técnicas de machine learning e deep learning ao monitoramento do carbono florestal. Os resultados apontam crescimento exponencial das publicações a partir de 2019, com destaque para a concentração de estudos na Ásia, no Brasil e na América do Norte. O algoritmo Random Forest aparece como o mais utilizado em diferentes tipos de sensores, seguido pelas abordagens de Support Vector Machine, sendo que os estudos locais com sensores multiespectrais são predominantes devido à necessidade de validação com inventários florestais.

7. Mapeamento arbóreo urbano a partir de imagens de sensoriamento remoto usando aprendizagem de máquina – Aplica algoritmos de classificação supervisionada para analisar a distribuição da arborização urbana, trazendo contribuições práticas para a gestão de cidades sustentáveis. Este trabalho propõe o mapeamento espaço-temporal de regiões arbóreas urbanas em imagens multiespectrais PlanetScope com algoritmos supervisionados de aprendizagem de máquina.

8. Envelhecimento sustentável integrado aos jardins terapêuticos: estratégias de cuidado para pessoas idosas com demência - O estudo analisou o papel das florestas urbanas como soluções baseadas na natureza para enfrentar mudanças climáticas e promover o envelhecimento saudável em cidades. A partir de uma revisão integrativa (2020–2025), que selecionou 14 artigos de 1.092 inicialmente encontrados, identificaram-se seis fatores-chave: preservação da biodiversidade, qualidade do ar, regulação térmica, bem-estar, coesão social e engajamento comunitário. Aplicado ao caso do Parque Raquel de Queiroz (Fortaleza–CE), observou-se que esses espaços favorecem a mobilidade ativa, a socialização e o contato com a natureza da população idosa. Conclui-se que florestas urbanas são estratégicas para cidades mais resilientes às mudanças climáticas e ao envelhecimento populacional.

9. Técnicas de Sensoriamento Remoto para Detecção de Feições Erosivas Em Áreas Verdes Urbanas: Uma Revisão Crítica - Apresenta uma revisão crítica e detalhada das técnicas de sensoriamento remoto, do tradicional ao *deep learning*, para detectar e monitorar processos erosivos em áreas verdes urbanas, essenciais para a saúde dos solos e a regulação hídrica. Este capítulo é fundamental para os eixos “Ação ambiental nos espaços urbano e rural: adaptação e mitigação” e “Resiliência e mitigação climática”. A erosão do solo é intensificada por eventos climáticos extremos (chuvas torrenciais) e pela

impermeabilização urbana. Monitorar e mitigar a erosão é crucial para proteger a infraestrutura verde urbana, que desempenha um papel vital na adaptação climática (drenagem, redução de ilhas de calor) e na saúde dos ecossistemas urbanos.

10. Estado de conservação de vegetação adjacente a córregos urbanos no sudeste de Goiás – Brasil – Apresenta um diagnóstico sobre a degradação e presença de espécies exóticas em matas ciliares urbanas, propondo estratégias de restauração ecológica em áreas de Cerrado.

11-Avanços na modelagem de nicho ecológico de espécies de áreas úmidas: contribuições para a sustentabilidade e gestão ambiental - Este estudo revisou 50 trabalhos publicados entre 2017 e 2024 e identificou quatro eixos principais: uso de dados edáficos e climáticos, estratégias para espécies pouco amostradas, integração de fatores bióticos e amplitude do nicho hidrológico em espécies amazônicas. Embora modelos como MaxEnt, GAM e SVM apresentem alta acurácia, ainda enfrentam limitações como viés amostral e falta de validação empírica. A incorporação de sensoriamento remoto, atributos funcionais e dados genéticos aumenta a robustez dos modelos. Conclui-se que os ENMs são promissores para a conservação e gestão sustentável de áreas úmidas tropicais, mas requerem avanços na qualidade de dados e no uso de abordagens multivariadas.

12- Direito à cidade, extensão universitária e os ODS: uma análise crítica da literatura - Este estudo tem como objetivo realizar uma análise crítica da literatura para compreender de que forma a extensão universitária pode promover o direito à cidade e contribuir para o cumprimento das metas da Agenda 2030, com ênfase no ODS 11. Os achados revelam que a extensão universitária, compreendida como prática social e política, favorece a participação cidadã, a inclusão social e a construção de cidades mais democráticas e sustentáveis.

13- Neurourbanismo, Envelhecimento Ativo e Saúde Mental: Possibilidades Contemporâneas para a Construção de Cidades Salutogênicas - Procura investigar como o design urbano, sob a perspectiva do neurourbanismo, pode influenciar positivamente o envelhecimento ativo e a saúde mental da população idosa, propondo critérios para a criação de cidades salutogênicas. Este capítulo conecta-se diretamente ao eixo “Mudanças climáticas e saúde global: humana, animal e ambiental” e “Políticas públicas e privadas, educação e mudanças climáticas”. Ele aborda a saúde mental em ambientes urbanos, que são intensamente afetados pelas mudanças climáticas. A proposta de cidades mais saudáveis e resilientes, que promovam o bem-estar biopsicossocial, é fundamental

para adaptação climática e a promoção da Saúde Única, que integra o bem-estar humano à saúde do ambiente urbano.

14- Envelhecimento Sustentável Integrado às Florestas Urbanas: Proposições Baseadas na Natureza Responsivas às Mudanças Climáticas - O estudo analisa os desafios do envelhecimento populacional diante das vulnerabilidades sociais e da crise climática, com foco nas pessoas idosas com demência. Por meio de uma revisão integrativa (2015–2025), que selecionou 12 artigos de 4.865 inicialmente encontrados, investigou-se a relação entre objetivos terapêuticos e qualidades projetuais de jardins sensoriais. Como resultado, foi proposto um modelo de diretrizes terapêutico-sensoriais aplicáveis ao espaço urbano. Conclui-se que jardins sensoriais bem planejados favorecem a saúde mental e funcionalidade de pessoas com demência, ao mesmo tempo em que contribuem para a sustentabilidade urbana e a mitigação do estresse térmico, promovendo cidades mais inclusivas e adaptadas ao envelhecimento.

Esses capítulos inauguram a obra com temas diversos, mas interligados pelo compromisso com a sustentabilidade, a justiça ambiental e inovação científica. Juntos, constroem um espaço de diálogo interdisciplinar que valoriza tanto a produção acadêmica quanto sua aplicação social, reafirmando a ciência como instrumento de transformação para um futuro mais resiliente e inclusivo.

Esta coletânea não apenas reflete a evolução histórica e a construção metodológica participativa do evento, mas também oferece contribuições tangíveis e baseadas em evidências para a construção de futuros mais sustentáveis, resilientes e saudáveis para todos. Que este livro sirva como um catalisador para a mudança e um testemunho do poder da cooperação internacional e interdisciplinar. O futuro da saúde está em nossas mãos, e ele começa com o cuidado com a nossa única casa: a Terra.

Alba Regina Azevedo Arana

Maria Eulaidia de Araujo

Organizadoras do IV CIAS 2025

APRESENTAÇÃO

É com grande satisfação que apresentamos esta obra resultante dos trabalhos selecionados para compor a publicação oficial do IV Congresso Internacional Ambiente e Sustentabilidade (IV CIAS 2025). O congresso, que se consolida como um espaço plural, democrático e interdisciplinar de produção científica, tem como tema central **Saúde Única Planetária e suas relações com as mudanças climáticas**, refletindo o compromisso de repensar os desafios globais sob uma perspectiva sistêmica e integrada.

O IV CIAS 2025 insere-se em uma caminhada progressiva, construída ao longo de experiências anteriores, que marcaram a evolução histórica de um evento multi e interdisciplinar. Ao reunir pesquisadores e instituições de diferentes continentes, como Moçambique, Equador, França, Espanha, Argentina, Chile e Brasil, o congresso se fortalece como uma rede internacional de saberes e práticas, que se renova a cada edição com metodologias participativas, trocas culturais e olhares diversos sobre as questões socioambientais.

Este livro reúne 14 artigos científicos, cuidadosamente selecionados, que expressam a pluralidade temática e metodológica do evento. As pesquisas abordam questões contemporâneas sobre a relação entre meio ambiente, saúde, ciência e sociedade, articulando-se diretamente com os cinco eixos estruturantes do congresso: Mudanças climáticas e saúde global: humana, animal e ambiental; Racismo ambiental e justiça climática: contribuições dos ODS para a sustentabilidade da saúde global; Ação ambiental nos espaços urbano e rural: adaptação e mitigação; Resiliência e mitigação climática, inovações e tecnologias ambientais; Políticas públicas e privadas, educação e mudanças climáticas: desafios e oportunidades.

A relevância desta publicação se evidencia em diferentes dimensões: Científica, pela qualidade e diversidade dos artigos, que trazem pesquisas inéditas, metodologias inovadoras e análises críticas, indo além do diagnóstico para também propor soluções, tecnologias e políticas públicas.

Acadêmica e institucional, por integrar universidades, centros de pesquisa e redes colaborativas nacionais e internacionais, promovendo a circulação de ideias, a troca de experiências e o fortalecimento da produção de conhecimento interdisciplinar.

Social e global, por articular ciência, tecnologia e inovação em favor dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com destaque para os ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), 4 (Educação de Qualidade), 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), 12 (Consumo e Produção Responsáveis), 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) e 15 (Vida Terrestre).

Destacamos, ainda, que a realização desta obra contou com o financiamento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), por meio do Projeto Paep 2025, o que reforça sua relevância acadêmica e institucional, além de ampliar as possibilidades de difusão científica e de internacionalização do conhecimento.

A obra, portanto, valoriza o trabalho de seus autores e autoras – pesquisadores de diferentes áreas e níveis de formação – e se destina não apenas à comunidade científica, mas também a gestores, educadores, profissionais e sociedade civil, fortalecendo a ciência cidadã e ampliando os horizontes da reflexão ambiental.

Mais do que um registro das reflexões do IV CIAS 2025, este livro é um convite à ação e à mobilização coletiva. Sua leitura inspira a compreensão de que a sustentabilidade exige responsabilidade compartilhada, compromisso intergeracional e cooperação internacional. Que esta obra possa contribuir para a construção de um futuro mais justo, saudável e sustentável para todos os seres vivos e ecossistemas do planeta.

Alba Regina Azevedo Arana

Maria Eulaidia de Araujo

Organizadoras do IV CIAS 2025

Os organizadores

SUMÁRIO

Capítulo 01

MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO URBANA POR SENSORIAMENTO REMOTO E APRENDIZAGEM DE MÁQUINA: UMA REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Vagner Souza Machado; Gleison Marrafon ; Lucas Prado Osco; José Marcato Junior; Ana Paula Marques Ramos

 10.37885/250920132 18

Capítulo 02

O VERDE TAMBÉM POLUI: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA NA ABORDAGEM CTS PARA DISCUTIR OS IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR

Marcelo Martin Heinrichs; Divina Elaine da Cunha; Gabriel Andrade de Melo Silva; Aline Locatelli

 10.37885/250920134 39

Capítulo 03

CLIMATE CHANGE: TRUTHS AND FALLACIES

Abdon Baptista de Paula Filho

 10.37885/250920129 53

Capítulo 04

VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA SOB PRESSÃO CLIMÁTICA: ANÁLISE ESPACIAL EM VIAMÃO-RS (2023-2024)

Lediane Aparecida Nery Maciel ; Vagner Souza Machado; Lucas Prado Osco; Ana Paula Marques Ramos

 10.37885/250920136 81

Capítulo 05

EXTERNALIDADES DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: UMA ANÁLISE À LUZ DO TEOREMA DE COASE

Rafael Medeiros Hespanhol; Alba Regina Azevedo Arana; Maíra Rodrigues Uliana

 10.37885/250920125 98

Capítulo 06

A SYSTEMATIC REVIEW OVER MACHINE AND DEEP LEARNING APPLICATIONS ON REMOTE SENSING FOREST CARBON MONITORING

Alessandra de Oliveira Alves Correia; Vagner Souza Machado; Ana Paula Marques Ramos; Lucas Prado Osco

doi 10.37885/250920123 115

Capítulo 07

MAPEAMENTO ARBÓREO URBANO A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Isabelly Martins de Sá; Alessandra de Oliveira Alves Correia; Vagner Souza Machado; Lucas Prado Osco; Ana Paula Marques Ramos

doi 10.37885/250920131 129

Capítulo 08

ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO AOS JARDINS TERAPÊUTICOS: ESTRATÉGIAS DE CUIDADO PARA PESSOAS IDOSAS COM DEMÊNCIA

Ciro Férrer Herbster Albuquerque

doi 10.37885/250920126 160

Capítulo 09

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA DETECÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS EM ÁREAS VERDES URBANAS: UMA REVISÃO CRÍTICA

Kezia Soares Barros; Salomão Tibcherani; Beatriz de Mello Massimino; Ana Paula Marques Ramos; Lucas Prado Osco

doi 10.37885/250920122 182

Capítulo 10

ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE VEGETAÇÃO ADJACENTE A CÓRREGOS URBANOS NO SUDESTE DE GOIÁS - BRASIL

Aristides Dutra De Oliveira; Isadora Lopes Pires; Erikson Leonardo Santos De Miranda; Ismael Martins Pereira; Vagner Santiago do Vale

doi 10.37885/250920130 207

Capítulo 11**AVANÇOS NA MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICOS DE ESPÉCIES DE ÁREAS ÚMIDAS: CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE E GESTÃO AMBIENTAL**

Aline Lopes; Lilian Cristine Camillo; Paula Polastri; Giuliette Barbosa Mano; Maria Teresa Fernandez Piedade

doi 10.37885/250920121 225

Capítulo 12**DIREITO À CIDADE, EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA E OS ODS: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA**

Yeda Ruiz Maria; Máira Rodrigues Uliana; Lucas Prado Osco

doi 10.37885/250920128 238

Capítulo 13**ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO ÀS FLORESTAS URBANAS: PROPOSIÇÕES BASEADAS NA NATUREZA RESPONSIVAS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS**

Ciro Férrer Herbster Albuquerque; Ana Luiza Bezerra Guerreiro; Zilsa Maria Pinto Santiago

doi 10.37885/250920127 254

Capítulo 14**NEUROURBANISM, ACTIVE AGING AND MENTAL HEALTH: CONTEMPORARY POSSIBILITIES FOR BUILDING SALUTOGENIC CITIES**

Ciro Férrer Herbster Albuquerque; Zilsa Maria Pinto Santiago

doi 10.37885/250920124 277

SOBRE AS ORGANIZADORAS 300

ÍNDICE REMISSIVO 301

MAPEAMENTO DA VEGETAÇÃO URBANA POR SENSORIAMENTO REMOTO E APRENDIZAGEM DE MÁQUINA: UMA REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

Vagner Souza Machado

Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil

Gleison Marrafon

Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus de Presidente Prudente, SP, Brasil

Lucas Prado Osco

Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, SP, Brasil

José Marcato Junior

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, campus de Campo Grande, MS, Brasil

Ana Paula Marques Ramos

Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho', Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus de Presidente Prudente, SP, Brasil

RESUMO

Objetivo: Este estudo realiza uma revisão sistemática das abordagens metodológicas aplicadas ao mapeamento da vegetação urbana por meio de sensoriamento remoto e técnicas de aprendizagem de máquina, incluindo tanto métodos tradicionais (*shallow learning*) quanto redes neurais profundas (*deep learning*). A principal contribuição é a identificação das metodologias mais recorrentes, suas limitações e as perspectivas para futuras pesquisas. **Métodos:** A pesquisa bibliográfica foi conduzida na base *Web of Science*, abrangendo publicações entre janeiro de 2007 e junho de 2024. Foram utilizados termos-chave relacionados a “vegetação urbana”, “sensoriamento remoto” e “inteligência artificial”. **Resultados:** Foram identificados 161 artigos, com crescimento acentuado a partir de 2020. As abordagens variam quanto à plataforma de aquisição (orbital, aérea e terrestre), tipo de dado (imagem ou nuvem de pontos), sensor utilizado (RGB, multiespectral e hiperespectral) e técnica de processamento (tradicional ou baseada em IA). Observa-se predominância do uso de imagens multiespectrais orbitais processadas por algoritmos de aprendizagem rasa, embora, a partir de 2019, as redes neurais profundas tenham ganhado destaque devido à sua capacidade de extrair características relevantes para análises mais detalhadas, como classificação por espécie e estimativas dendrométricas. Avanços recentes indicam esforços na adaptação da arquitetura das redes para aumentar a acurácia do mapeamento com dados de alta resolução espacial. **Conclusão:** A combinação de sensoriamento remoto e técnicas de *machine learning* tem se mostrado eficaz para o mapeamento e monitoramento da vegetação urbana, embora desafios persistam, sobretudo relacionados à heterogeneidade espectral e espacial do ambiente urbano. A aprendizagem rasa apresenta vantagens em termos de menor exigência de dados, sendo útil para tarefas de separação geral da vegetação. No entanto, aplicações mais complexas — como a distinção entre vegetação arbórea e rasteira — requerem arquiteturas profundas, cujo uso demanda conjuntos de dados mais robustos. Isso evidencia a necessidade de desenvolver modelos de *deep learning* com maior capacidade de generalização e menor dependência de grandes volumes de dados.

Palavras-chave: Geotecnologias; Inteligência Artificial; Áreas Verdes; Mapeamento; Planejamento Urbano.

INTRODUÇÃO

O mapeamento e monitoramento da vegetação urbana desempenham um papel crucial no planejamento de cidades sustentáveis, na gestão ambiental e na formulação de políticas públicas eficazes. As áreas urbanas estão em constante expansão, e a vegetação urbana, além de oferecer diversos serviços ecossistêmicos, desempenha um papel vital no combate aos efeitos das mudanças climáticas, como a redução da temperatura, a mitigação de poluentes e a promoção da saúde mental e física da população (ENDRENY, 2018; LUMNITZ, 2019). Dessa forma, a capacidade de monitorar e mapear de forma eficiente a vegetação nas cidades tornou-se uma necessidade urgente. Nesse contexto, o sensoriamento remoto (SR) emergiu como uma geotecnologia de destaque por oferecer uma forma eficiente de coletar dados sobre grandes áreas de forma rápida, sistemática e econômica (DEMATTE *et al.*, 2017).

Historicamente, o mapeamento de vegetação urbana foi amplamente realizado utilizando técnicas tradicionais de sensoriamento remoto, como a classificação supervisionada de imagens orbitais. Mais recentemente, técnicas baseadas em aprendizagem de máquina (*Machine Learning* - ML), ganharam destaque nesse contexto. Os algoritmos de ML são classificados em aprendizagem rasa (*shallow learning*) e aprendizagem profunda (*Deep Learning* - DL). A aprendizagem rasa é amplamente utilizada no processamento de dados de sensoriamento remoto para estudo da vegetação devido à sua eficácia na classificação de pixels individuais, e ao fato de exigirem uma quantidade relativamente pequena de dados de treinamento (PU *et al.*, 2014). Diferentemente das técnicas convencionais, que dependem da definição explícita de regras para a classificação, os algoritmos de ML, a exemplo do *Support Vector Machine* (SVM), do *Decision Tree* (DT), e do *Random Forest* (RF), aprendem automaticamente com os dados, identificando padrões complexos sem intervenção humana direta. Esses métodos mostraram-se particularmente úteis em áreas urbanas com vegetação homogênea, especialmente quando combinados com índices espectrais, como o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI), que permite diferenciar vegetação de outras coberturas do solo (Zhu *et al.*, 2017).

No entanto, devido à alta complexidade das paisagens urbanas e maior disponibilização de imagens de alta resolução espacial, sobretudo, a partir

dos anos 2000, com o lançamento do satélite IKONOS, essas abordagens de aprendizagem rasa começaram a apresentar limitações, exigindo métodos ainda mais avançados. As áreas urbanas são caracterizadas por uma diversidade de tipos de vegetação, espécies e estruturas, o que dificulta a segmentação de elementos individuais, como as copas das árvores. Além disso, os métodos de classificação baseados em pixels não consideram as relações espaciais e contextuais entre os objetos na imagem, o que pode resultar em uma maior taxa de erros em ambientes urbanos densos e heterogêneos (Huang *et al.*, 2024).

Para superar essas limitações, foram desenvolvidas abordagens avançadas baseadas em uma subárea de ML que é o *deep learning*, permitindo uma análise mais sofisticada dos dados de sensoriamento remoto para atender a contextos mais desafiadores. Em particular, modelos baseados em Redes Neurais Convolucionais (CNNs) têm revolucionado esse campo ao possibilitar a análise de grandes volumes de dados de alta resolução espacial, espectral e temporal (Cheng *et al.*, 2020). Essas redes não apenas aprimoram a precisão da classificação de vegetação, como também conseguem segmentar elementos individuais, como copas de árvores, considerando as relações espaciais entre eles (Sudha & Aji, 2021).

A aplicação de algoritmos de ML, incluindo DL, no mapeamento da vegetação urbana oferece vantagens importantes. Essas abordagens são capazes de lidar com a complexidade dos ambientes urbanos, proporcionando uma precisão superior ao trabalhar com imagens de alta resolução (ZHANG *et al.*, 2023). Além disso, algoritmos de DL podem processar imagens multiespectrais e dados Light Detection and Ranging (LiDAR) simultaneamente, possibilitando uma análise mais detalhada da vegetação, incluindo informações tridimensionais, como altura e volume das árvores (CHEN *et al.*, 2019). Outro benefício do aprendizado profundo é a maior capacidade de generalização dos modelos, fundamental para cenários urbanos dinâmicos e em constante transformação (Zhu *et al.*, 2017).

Diante desse panorama, torna-se essencial a realização de uma revisão de literatura que permita compreender a evolução das abordagens aplicadas ao mapeamento da vegetação urbana. Tal revisão possibilita a categorização da produção técnico-científica existente, a síntese dos avanços mais recentes e a identificação de lacunas e tendências futuras na área.

Nesse contexto, este estudo tem como objetivo caracterizar o estado da arte dos trabalhos disponíveis em bases de dados científicas, com ênfase nas principais técnicas empregadas, suas limitações e as perspectivas de pesquisa e inovação relacionadas ao uso de dados de sensoriamento remoto combinados a métodos de aprendizagem de máquina, sejam eles baseados em algoritmos tradicionais (*shallow learning*) ou redes neurais profundas (*deep learning*), no mapeamento da vegetação urbana.

MÉTODOS

Realizamos uma busca na base de dados *Web of Science* (WOS), que é uma base que indexa uma vasta gama de publicações científicas desde 1900 até à atualidade. O recorte temporal adotado nesse estudo é de janeiro de 2007 a junho de 2024. Para tanto, preparou-se uma chave de busca avançada visando levantar os trabalhos científicos publicados em periódicos sobre o uso de dados de sensoriamento remoto no mapeamento da vegetação em ambientes urbanos com abordagens de aprendizagem de máquina rasa e aprendizagem profunda. Para fins didáticos, nesse trabalho, utilizaremos o termo '*ML*' para nos referirmos aos algoritmos de aprendizagem rasa, e o termo '*DL*' para a abordagem de aprendizagem profunda.

A chave de busca avançada foi constituída por três grupos de critérios. No primeiro grupo, constam os termos comumente usados no estudo da vegetação urbana (veja o destaque na cor amarelo na Figura 1). No segundo grupo de busca foram utilizados termos referentes ao uso de dados de sensoriamento remoto (destaque azul na Figura 1), já no terceiro e último grupo foram utilizados termos encontrados em estudos baseados em ML e DL (destaque cinza na Figura 1).

Figura 1 – Termos de busca utilizados.

((("Urban Forest" OR "Urban Forestry" OR "Urban Vegetation" OR "Urban Tree" OR "Urban Trees" OR "Urban Greenness" OR "Urban Green Spaces") AND ("Remote Sensing" OR "Orbital Image" OR "Aerial Image" OR "Satellite Image" "LiDAR" OR "Unmanned Aerial Vehicle" OR "UAV" OR "Optical Image" OR "RGB Image" OR "Hyperspectral Image" OR "Multispectral Image") AND ("Machine Learning" OR "Random Forest" OR "Decision Tree" OR "Support Vector Machine" OR "Multilayer Perceptron" OR "K-Nearest Neighbors" OR "Artificial Neural Network" OR "Deep Learning" OR "Deep Neural Network" OR "Convolutional Neural Network" OR "Recurrent Neural Network" OR "Long-Short Term Memory" OR "Generative Adversarial Network" OR "Vision Transformer"))

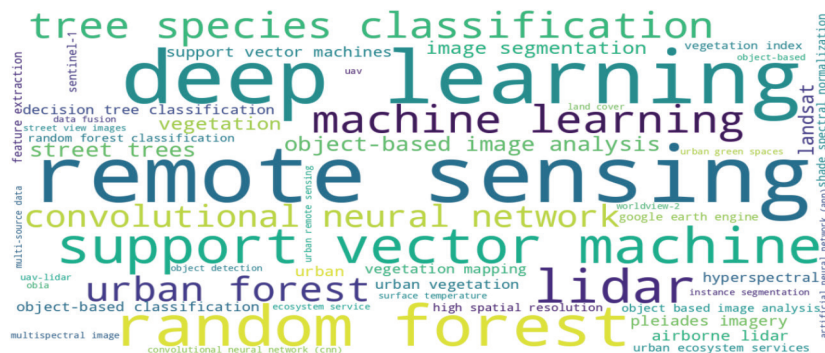
Fonte: Autores (2025).

Foram identificados 161 artigos, dos quais 4 correspondem a revisões de literatura. As informações desses trabalhos foram extraídas e organizadas em planilha, contemplando os seguintes campos: autores, título, ano de publicação, objetivo, técnicas de pré-processamento aplicadas, tipo de algoritmo utilizado, alvo mapeado (por exemplo, vegetação geral ou árvores), plataforma de aquisição, tipo de sensor, país do estudo e resolução espacial das imagens. Com base nesse levantamento, foi possível caracterizar o estado da arte sobre o tema. Os resultados são apresentados e discutidos na seção a seguir.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como avaliação inicial, foi gerada uma nuvem de palavras (Figura 2) a partir dos 161 artigos analisados, destacando os termos mais recorrentes em estudos sobre o mapeamento da vegetação urbana com o uso de sensoria-mento remoto e algoritmos de *machine learning*. Os termos mais frequentes incluem: *remote sensing*, *deep learning*, *random forest*, *support vector machine*, *LiDAR*, *machine learning* e *urban forest*, refletindo as principais abordagens e tecnologias adotadas na literatura.

Figura 2 - Nuvem de palavras representando os principais termos abordados na literatura sobre mapeamento da vegetação em ambientes urbanos por sensoriamento remoto e abordagens de ML e DL.

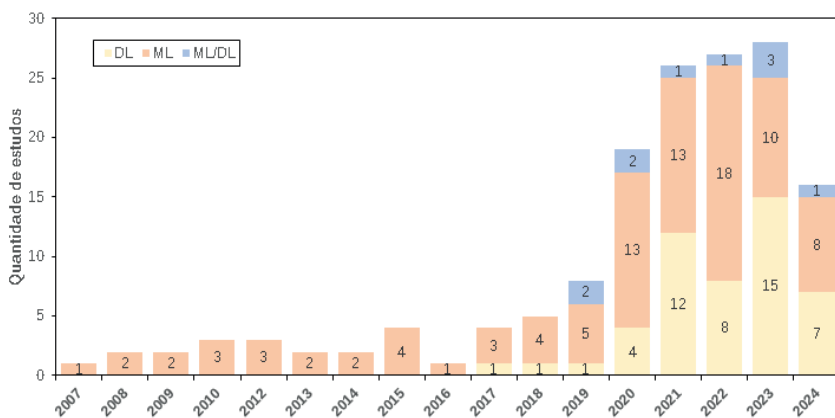


Fonte: Autores (2025).

Dos 161 artigos analisados, cinco não aplicaram qualquer técnica de aprendizagem de máquina. O primeiro estudo a empregar algoritmos de *machine learning* no mapeamento de áreas verdes urbanas com dados de sensoriamento remoto foi publicado em 2007 (Figura 3).

A Figura 3 também revela que o uso de algoritmos de *deep learning* teve início em 2017, enquanto a integração entre ML e DL apareceu pela primeira vez em 2019. Observa-se que os estudos que utilizaram exclusivamente ML (n = 94) são aproximadamente o dobro daqueles que utilizaram apenas DL (n = 49). Essa diferença se deve, em parte, ao fato de que o uso de DL no sensoriamento remoto ganhou relevância somente a partir de 2015, especialmente com a adoção de redes neurais convolucionais (CNNs) para a classificação de imagens de alta resolução. Assim, considerando o intervalo analisado (2007 a 2024), as abordagens baseadas em aprendizagem profunda estão presentes em apenas metade do período, o que ajuda a explicar sua frequência menor em relação aos métodos de aprendizagem rasa.

Figura 3 - Evolução temporal das publicações científicas em ML, DL e ML/DL (até 06/2024).



Fonte: Autores (2025).

A Figura 3 também evidencia um crescimento progressivo no número de publicações ao longo dos anos, com destaque para o aumento expressivo a partir de 2020. Embora o gráfico indique uma aparente redução no número de trabalhos em 2024, é importante considerar que o recorte temporal se limita até junho daquele ano. Como o total de publicações já ultrapassa 50% do volume registrado em 2023, é possível inferir a continuidade da tendência de alta na produção científica sobre o tema.

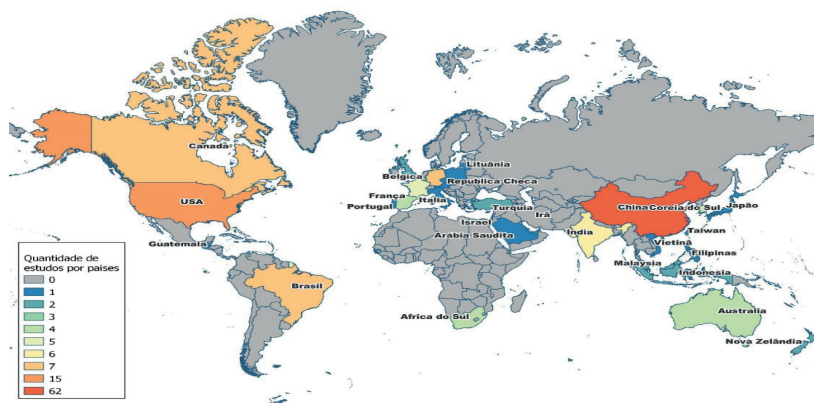
Entre os artigos analisados, o trabalho de Feng *et al.* (2015) apresentou o maior número de citações ($n = 358$). Nesse estudo, os autores propuseram uma abordagem híbrida que combina o algoritmo *Random Forest* com análise de texturas, com o objetivo de diferenciar áreas de solo exposto e vegetação urbana em cidades chinesas.

O aprendizado de máquina é uma área da Inteligência Artificial (IA) que utiliza algoritmos para extrair padrões a partir de dados e realizar previsões, sem a necessidade de programação explícita para cada situação (GOODFELLOW *et al.*, 2016). A aprendizagem profunda, por sua vez, é uma subárea do aprendizado de máquina, caracterizada pelo uso de redes neurais profundas, que possibilitam a modelagem de relações complexas e maior capacidade de generalização (KAMILARIS *et al.*, 2018).

A Figura 4 indica que a maioria dos estudos analisados foi conduzida na China ($n = 62$), seguida pelos Estados Unidos ($n = 15$), Brasil ($n = 7$) e Canadá

(n = 7). Esses dados evidenciam o protagonismo da pesquisa chinesa na área, bem como o crescente interesse da comunidade científica internacional no desenvolvimento de técnicas avançadas para o mapeamento de áreas verdes urbanas com base em dados de sensoriamento remoto.

Figura 4 - Distribuição geográfica dos artigos científicos publicados de 2007 a junho de 2024 sobre o mapeamento da vegetação urbana usando ML e/ou DL e sensoriamento remoto.



Fonte: Autores (2025).

Plataformas de aquisição e algoritmos de aprendizagem de máquina

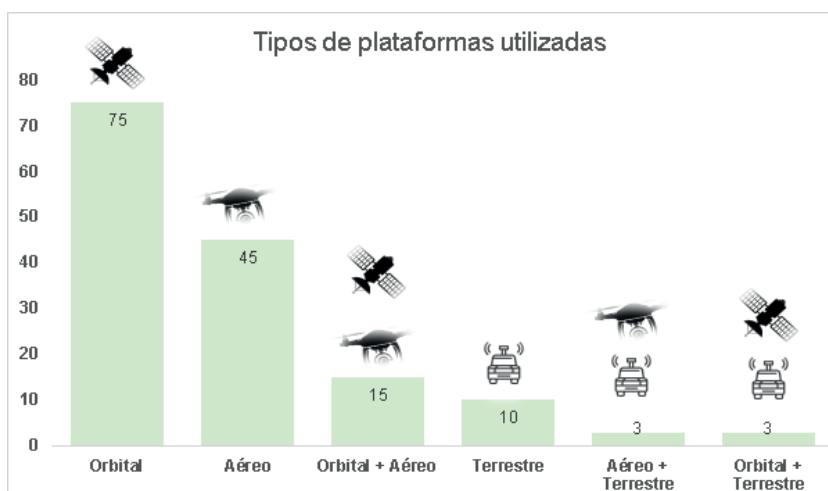
A análise da relação entre os tipos de plataformas e os tipos de algoritmos de aprendizado de máquina utilizados no mapeamento da vegetação urbana por sensoriamento remoto revela tendências interessantes. A Figura 5 demonstra a predominância no uso de dados orbitais, que aparecem em 75 dos estudos analisados (total de 161) no período 2007 a junho de 2024. As plataformas aéreas, que incluem aviões e Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs, popularmente conhecidos como drones), aparecem como a segunda opção mais utilizada (n=45) nessa tarefa de mapeamento da vegetação urbana.

Embora os sensores embarcados em VANTs geralmente forneçam dados com alta resolução espacial, essas plataformas apresentam limitações operacionais, como baixa autonomia de voo, o que demanda maior tempo de campo para cobrir áreas extensas. Ainda assim, destaca-se o uso de sensores LiDAR acoplados a VANTs, que permitem a geração de nuvens densas de pontos tridimensionais, viabilizando análises detalhadas da vegetação, incluindo

a extração de variáveis dendrométricas. Parâmetros como o DAP (Diâmetro à Altura do Peito), altura total, volume e área basal são essenciais para a caracterização arbórea e podem ser estimados com alta precisão a partir de dados LiDAR aerotransportado (POPESCU, 2007).

Além disso, observa-se um número de estudos que empregam a fusão de diferentes plataformas, como "Orbital + Aérea" (n = 15), "Aérea + Terrestre" (n = 3) e "Orbital + Terrestre" (n = 3). Essa combinação de fontes sugere uma tendência crescente na integração de dados multisensoriais para aprimorar a acurácia e o nível de detalhamento na análise da vegetação urbana.

Figura 5 - Frequência de uso das plataformas de sensoriamento remoto mapeamento da vegetação urbana usando ML e/ou DL e sensoriamento remoto.



Fonte: Autores (2025).

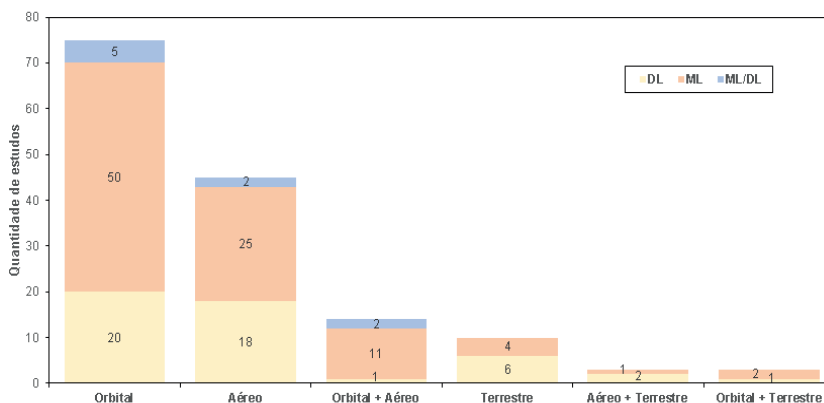
A Figura 6 mostra que, entre 2007 e junho de 2024, os algoritmos de *machine learning* foram mais frequentemente aplicados a dados orbitais, com 50 ocorrências, enquanto o uso de *deep learning* com esse tipo de dado foi identificado em apenas 20 estudos. Em contrapartida, observa-se uma crescente adoção de DL na análise de imagens de alta resolução espacial e dados LiDAR aerotransportados.

Estudos como os de Zhu *et al.* (2017) e Sudha & Aji (2021) destacam que arquiteturas baseadas em redes neurais convolucionais têm se mostrado promissoras na segmentação da vegetação urbana, em razão da sua capacidade

de extrair automaticamente padrões espaciais e espectrais complexos. Isso se reflete nos dados da Figura 6, em que 20 estudos aplicaram DL a dados orbitais e outros 18 a dados aerotransportados.

O menor número de aplicações de *deep learning*, em comparação aos algoritmos de aprendizagem rasa, pode ser atribuído a fatores como o elevado custo computacional e a necessidade de grandes volumes de dados rotulados para treinamento (CHENG *et al.* 2020). Além disso, como mencionado anteriormente, as aplicações de DL concentram-se na segunda metade do período analisado, o que contribui para sua menor representatividade em relação aos métodos de ML.

Figura 6 - Relação entre tipo de plataforma de aquisição e técnica de aprendizado de máquina utilizada.



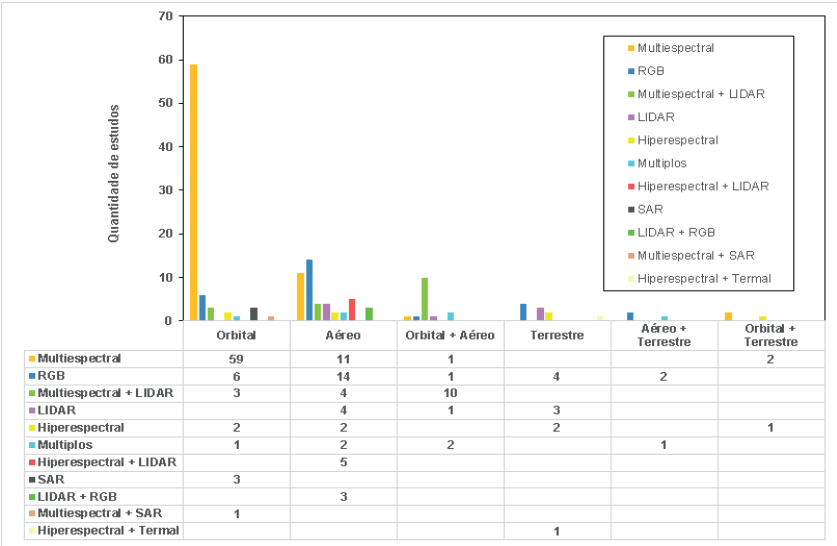
Fonte: Autores (2025).

Quando há a combinação de dados orbitais e aerotransportados, os algoritmos de *machine learning* (contexto de aprendizagem rasa) continuam sendo a abordagem predominante, com 11 das 13 ocorrências identificadas. Essa prevalência pode ser atribuída a fatores como o menor custo computacional desses métodos e sua eficácia mesmo com conjuntos de dados limitados. Por outro lado, o uso de *deep learning* ainda enfrenta barreiras, como a baixa interpretabilidade dos modelos — o que dificulta sua adoção em aplicações operacionais — e a escassez de bases de dados rotuladas em volume suficiente para o treinamento eficaz das redes profundas (SUDHA & AJI, 2021).

Plataformas de aquisição e tipos de sensores

A análise da relação entre as plataformas utilizadas e os tipos de sensores empregados (Figura 7) revela padrões que merecem destaque. As plataformas orbitais são majoritariamente associadas a sensores multiespectrais, representando 59 dos estudos analisados. Por outro lado, as plataformas aéreas — como aviões e VANTs — apresentam maior diversidade de sensores, com destaque para o uso de sensores RGB (n = 14) e multiespectrais (n = 11).

Figura 7 – Relação entre plataformas de aquisição e tipos de sensores utilizados no mapeamento da vegetação urbana usando ML e/ou DL e sensoriamento remoto.



Fonte: Autores (2025).

Os sensores de radar de abertura sintética (*Synthetic Aperture Radar* – SAR) aparecem com menor frequência, sendo utilizados exclusivamente em plataformas orbitais. Isso se justifica pela capacidade dessas plataformas de realizar monitoramento contínuo e sistemático em escala regional e global. O sensor SAR, por ser ativo, utiliza ondas de radar para gerar imagens detalhadas da superfície terrestre, operando independentemente das condições de iluminação ou clima — inclusive à noite ou sob cobertura de nuvens, chuva e neblina (Jense, 2011).

Quanto aos sensores LiDAR, embora seu uso isolado seja relativamente raro ($n = 8$), eles aparecem com frequência em combinação com sensores de imageamento, como multiespectrais ($n = 17$) e RGB ($n = 3$). Essa combinação evidencia o papel do LiDAR na modelagem tridimensional da vegetação, permitindo a extração de informações estruturais importantes, como altura e volume das copas.

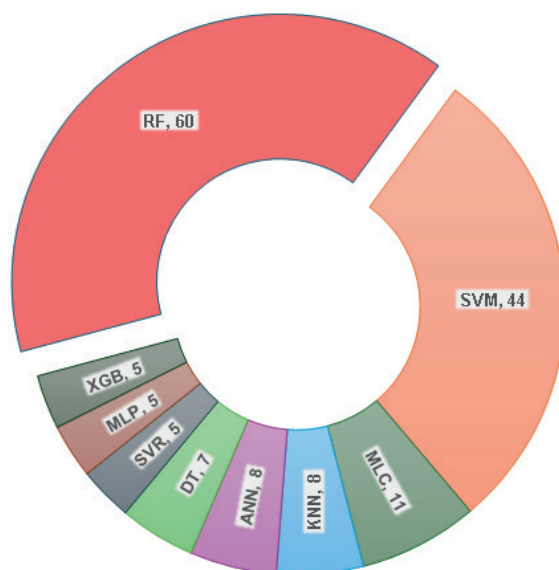
Esses resultados indicam que a escolha da plataforma e do sensor está diretamente relacionada à escala e ao nível de detalhe exigido pela aplicação. Sensores multiespectrais embarcados em satélites são preferidos para o monitoramento de grandes áreas, enquanto sensores RGB e LiDAR, acoplados a VANTs, são mais indicados para estudos locais com alta resolução espacial. Além disso, observa-se uma tendência crescente na fusão de dados provenientes de múltiplas plataformas e sensores, com o objetivo de superar limitações individuais e aumentar a precisão no mapeamento da vegetação urbana.

Tipos de sensores e algoritmos de aprendizagem de máquina

A análise dos algoritmos de *machine learning* aplicados (Figura 8) revela que o *Random Forest* (RF) é a técnica mais utilizada, com 60 ocorrências, seguido pelo *Support Vector Machine* (SVM), com 44 registros. Outros algoritmos, como *Maximum Likelihood Classification* (MLC), *Artificial Neural Network* (ANN), *K-Nearest Neighbor* (KNN), *Decision Tree* (DT), *Support Vector Regression* (SVR), *Multi-Layer Perceptron* (MLP) e *Extreme Gradient Boosting* (XGB), apresentam frequência moderada, variando entre 4 e 8 ocorrências.

Algoritmos com baixa frequência ($n \leq 3$) não foram incluídos na Figura 8 para melhor clareza na representação gráfica. No entanto, o levantamento identificou um total de 50 ocorrências envolvendo algoritmos diversos e variações nominais, o que evidencia uma diversidade metodológica entre os estudos, embora concentrada em um número reduzido de técnicas amplamente consolidadas.

Figura 8 - Algoritmos de ML mais utilizados (n>=4).

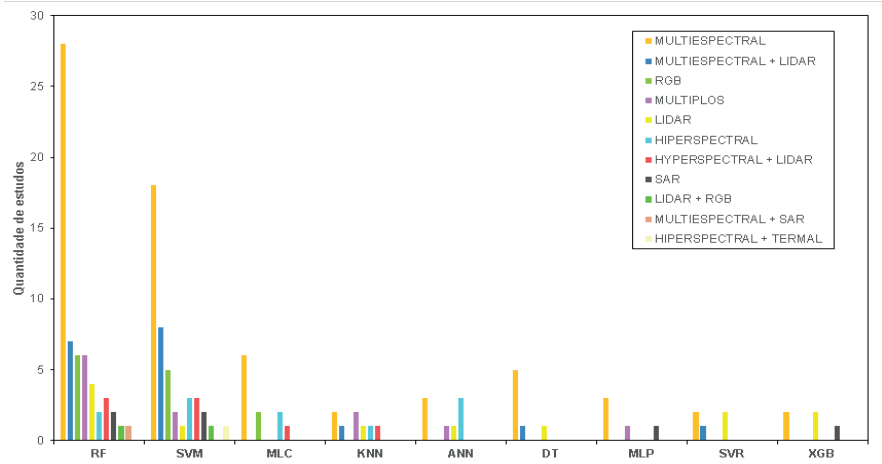


Fonte: Autores (2025).

A análise da relação entre os tipos de sensores empregados e os algoritmos de aprendizado de máquina com mais de quatro ocorrências (Figura 9) revela a predominância do uso de sensores multiespectrais nos estudos revisados. Essa preferência é especialmente evidente em combinação com os algoritmos RF e SVM, que apresentam desempenho robusto mesmo em conjuntos de dados heterogêneos e com classes espectralmente similares. Tais algoritmos também se destacam por demandarem menos ajustes paramétricos e oferecerem elevada acurácia em tarefas de classificação (Zhang *et al.*, 2020; Khurana *et al.*, 2023).

Além do desempenho técnico, a ampla disponibilidade de imagens multiespectrais de média e alta resolução, muitas delas de acesso gratuito e com cobertura global, contribui para sua adoção em estudos urbanos em larga escala.

Figura 9 - Relação entre algoritmos de ML e tipos de sensores.



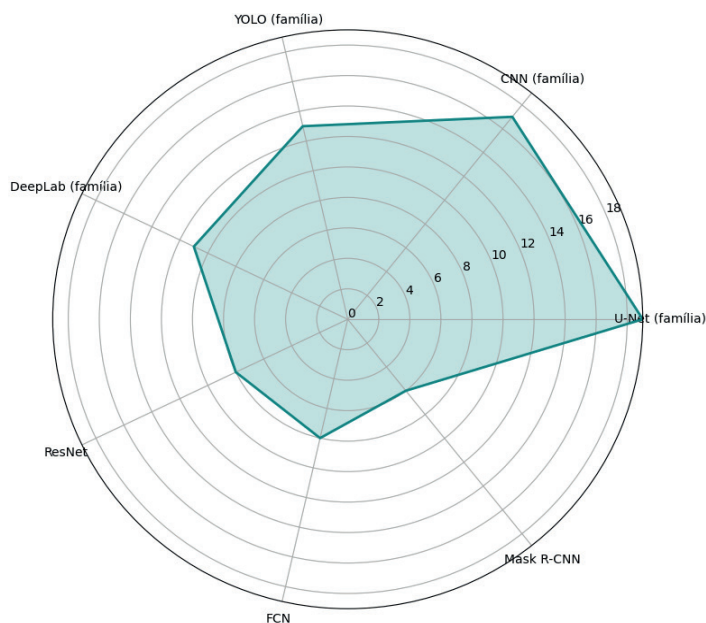
Fonte: Autores (2025).

A Figura 9 evidencia que os algoritmos RF e SVM foram aplicados a dados provenientes de uma maior diversidade de sensores, o que reforça a versatilidade e adaptabilidade dessas técnicas em diferentes contextos de sensoriamento remoto. Esses algoritmos também predominam nos estudos que utilizam combinações de sensores, como *Multispectral + LiDAR* ou *Hiperespectral + LiDAR*, indicando sua robustez em cenários multissensoriais.

Em contraste, algoritmos como *Extreme Gradient Boosting* (XGB), *Multi-Layer Perceptron* (MLP) e *Support Vector Regression* (SVR) apresentam menor frequência de uso e estão associados a um número mais restrito de tipos de sensores, o que pode refletir limitações em sua aplicação ou menor consolidação na literatura voltada ao mapeamento da vegetação urbana.

A análise dos algoritmos de *deep learning* demonstrou a predominância de arquiteturas recorrentes em tarefas de segmentação e classificação de imagens, aplicadas a dados de sensoriamento remoto voltados ao mapeamento da vegetação urbana. Essa tendência pode ser observada na Figura 10, que apresenta os algoritmos de DL mais utilizados ($n \geq 4$) nas publicações analisadas.

Figura 10 - Algoritmos de Deep Learning mais utilizados ($n \geq 4$).



Fonte: Autores (2025).

As arquiteturas baseadas em *Convolutional Neural Networks* (CNNs), identificadas pela presença da sigla “CNN” em seus nomes — como CNN7, 1D-CNN, 3D-CNN, 3D-1D-CNN e 3D-2D-CNN — foram observadas em 17 estudos, evidenciando seu papel como base estrutural para diversas arquiteturas profundas. Além dessas, outras redes que também derivam de CNNs, mas com nomes específicos, como U-Net, YOLO, DeepLab, ResNet, FCN e Mask R-CNN, foram amplamente identificadas.

A U-Net e suas variantes — U-Net++, ResU-Net e SD-U-Net — foram as mais recorrentes ($n = 19$) no mapeamento de vegetação urbana entre 2007 e junho de 2024. Essas redes seguem uma arquitetura *encoder-decoder* e destacam-se por sua eficiência em tarefas de segmentação semântica, sendo particularmente adequadas para a extração de feições vegetais em imagens de alta resolução.

Em terceiro lugar, a rede YOLO e suas variantes ($n = 13$) demonstram o crescente interesse em algoritmos de detecção de objetos em tempo

real, especialmente aplicados a inventários florestais urbanos e contagem de copas arbóreas.

A arquitetura DeepLab, incluindo variantes como DeepLabv3+ e DeepLabv2, foi identificada em 11 estudos. Seu diferencial está no uso de *convoluções dilatadas*, que permitem segmentar feições mantendo a resolução espacial das imagens. As redes ResNet e *Fully Convolutional Network* (FCN), cada uma com 8 ocorrências, também foram empregadas principalmente em tarefas de classificação e segmentação.

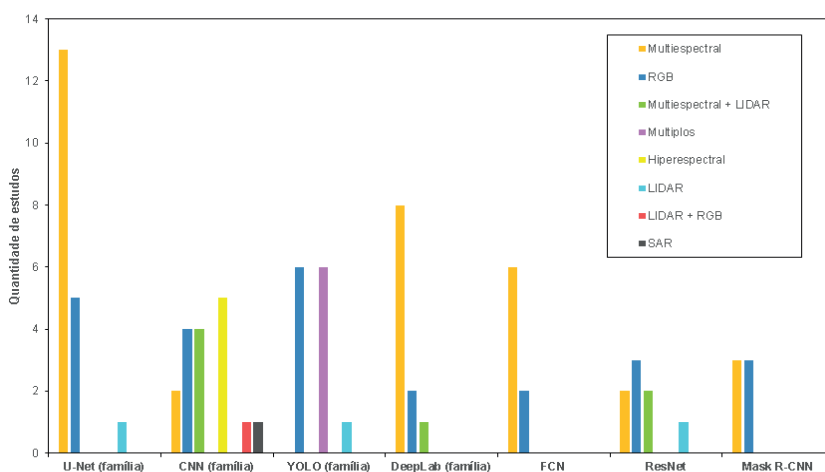
O algoritmo Mask R-CNN ($n = 6$) representa uma abordagem mais avançada, combinando detecção de objetos e segmentação de instâncias. Essa técnica tem se mostrado eficaz para identificar, classificar e delimitar individualmente feições, sendo especialmente útil em áreas urbanas densamente arborizadas ou edificadas, onde se busca a identificação de árvores isoladas (He *et al.*, 2017).

Adicionalmente, foram identificadas 24 ocorrências de algoritmos com menor recorrência ou aplicação mais específica, como SegNet, PSPNet, SSL, DCCN, entre outros. Esses algoritmos não foram incluídos na Figura 10 por motivos de representação gráfica, mas sua presença indica um campo em constante experimentação e evolução arquitetural.

A Figura 11 apresenta a relação entre algoritmos de *deep learning* e os tipos de sensores empregados nos estudos analisados. Destaca-se a rede U-Net (e suas variantes), aplicada majoritariamente a sensores multiespectrais ($n = 13$) e RGB ($n = 5$), demonstrando sua ampla adoção em segmentação semântica de imagens urbanas (Zhu *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2021).

As arquiteturas agrupadas na categoria CNN (família) apresentaram a maior diversidade de aplicação entre os sensores, com ocorrências distribuídas em todas as categorias identificadas nos estudos — com exceção da categoria “múltiplos”, que refere-se à combinação de mais de dois sensores. Essa diversidade de aplicações reforça a flexibilidade e adaptabilidade das CNNs em diferentes contextos e tipos de dados no mapeamento da vegetação urbana.

Figura 11 - Relação entre algoritmos de DL e tipos de sensores



Fonte: Autores (2025).

O uso da rede YOLO (e suas variantes) foi identificado em 13 estudos, sendo aplicada principalmente ao processamento de dados obtidos por sensores RGB ($n = 6$), por combinações de múltiplos sensores (categoria “Múltiplos”, $n = 6$), e, em menor escala, por dados LiDAR ($n = 1$).

Já a família DeepLab (incluindo variantes como DeepLabv2 e DeepLabv3+) apresentou 11 ocorrências, com predominância no uso com sensores multiespectrais ($n = 8$). Também foram observadas aplicações em dados RGB ($n = 2$) e em combinação de sensores Multiespectral + LiDAR ($n = 1$).

Esses resultados indicam um certo grau de especialização das arquiteturas conforme o tipo de dado de entrada. A família YOLO, por ser voltada à detecção de objetos em tempo real, tem se mostrado mais adequada ao uso com sensores RGB e combinações multissensoriais, especialmente em tarefas como a identificação e contagem de copas arbóreas em áreas urbanas. Por outro lado, a família DeepLab, voltada à segmentação semântica de alta precisão, é preferencialmente aplicada a dados multiespectrais, cuja riqueza espectral favorece a segmentação detalhada de diferentes classes de vegetação. A associação dessas arquiteturas aos respectivos tipos de sensores reflete escolhas metodológicas coerentes com suas capacidades técnicas, demonstrando uma tendência de alinhamento entre o tipo de sensor e a complexidade da tarefa de mapeamento da vegetação urbana.

CONCLUSÃO

A presente revisão evidenciou a evolução metodológica no uso de técnicas de aprendizado de máquina tradicional (*shallow learning*) e aprendizado profundo (*deep learning*) aplicadas ao mapeamento da vegetação urbana por meio de dados de sensoriamento remoto. Desde o primeiro estudo com ML identificado em 2007 até a consolidação das técnicas de DL a partir de 2017, observou-se um crescimento constante no interesse científico pela temática, intensificado com a integração entre ambas as abordagens a partir de 2019.

A maioria dos estudos concentra-se em tarefas de classificação da vegetação urbana, com ampla predominância dos algoritmos *Random Forest* e *Support Vector Machine*, especialmente em combinação com sensores multiespectrais embarcados em plataformas orbitais. Por sua vez, os algoritmos de DL, embora menos frequentes, vêm ganhando destaque em aplicações que requerem maior detalhamento espacial — como aquelas que utilizam dados de VANTs ou sensores LiDAR — sendo as arquiteturas U-Net, DeepLab e Mask R-CNN as mais recorrentes em tarefas de segmentação semântica e de instâncias.

A análise também revelou um avanço no uso de estratégias de fusão de dados, que combinam plataformas orbitais e aerotransportadas para ampliar a acurácia e resolver limitações específicas de cada sensor. Essa tendência reflete um amadurecimento metodológico da área, com ênfase crescente em abordagens integradas e adaptáveis.

Do ponto de vista geográfico, a liderança da China em número de publicações, seguida por Estados Unidos, Brasil e Canadá, demonstra o esforço internacional no aprimoramento das tecnologias de monitoramento da vegetação urbana, com aplicações que variam desde a simples detecção de cobertura vegetal até análises mais complexas voltadas à estrutura arbórea, saúde vegetal e serviços ecossistêmicos urbanos.

Em síntese, embora os métodos clássicos de ML ainda predominem, o avanço das arquiteturas de DL — impulsionado pela crescente disponibilidade de dados de alta resolução e pelo aumento da capacidade computacional — deve intensificar sua adoção nos próximos anos. Nesse contexto, destaca-se como desafio central o desenvolvimento de modelos mais explicáveis, generalizáveis e eficientes, capazes de operar em diferentes realidades geográficas e

condições temporais, representando uma das principais fronteiras de pesquisa no mapeamento urbano por sensoriamento remoto aliado à inteligência artificial.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e incentivo à ciência. Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro mediante os processos 305814/2023-0; 403213/2023-1; 135614/2024-4 e 308481/2022-4.

REFERÊNCIAS

- Chen, L. C., e al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV), 801-818. 2018.
- Cheng, G. *et al.* Remote Sensing Image Scene Classification Meets Deep Learning: Challenges, Methods, Benchmarks, and Opportunities. arXiv:2005.01094. 2020.
- DEMATTÊ, J. AM *et al.* Soil class and attribute dynamics and their relationship with natural vegetation based on satellite remote sensing. *Geoderma*, v. 302, p. 39-51. 2017.
- ENDRENY, T. A. Strategically growing the urban forest will improve our world. *Nature Communications*, 9(1):1-3, ISSN 2041-1723. doi:10.1038/s41467-018-03622-0. 2018.
- GOODFELLOW, I. *et al.* Deep learning. MIT press, 2016.
- HE, K. *et al.* Mask R-CNN. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2961-2969. 2017.
- Huang, Y. *et al.* Deep learning in urban green space extraction in remote sensing: a comprehensive systematic review. *International Journal of Remote Sensing*, 46(3), 1117-1150. 2024.
- KAMILARIS, A. *et al.* Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and electronics in agriculture*, v. 147, p. 70-90, 2018.
- KHURANA, M. *et al.* Urban land cover classification using Sentinel-2 data and SVM approach. *Earth Science Informatics*, 16, 1015-1029. 2023.
- LUMNITZ, S. Mapping Urban Trees With Deep Learning And Streetlevel Imagery. Thesis for Master of Science in Forestry, The University of British Columbia, Vancouver, 149p. 2019.
- PU, R. *et al.* Assessing the Impact of Training Sample Size on Urban Land Cover Classification Accuracy Using Remotely Sensed Imagery. *Remote Sensing*, 6(2), 964-983. 2014.

POPESCU, S. C. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy*, 31(9), 646–655. 2007.

Sudha, S. K., & Aji, S. An analysis on deep learning approaches: addressing the challenges in remote sensing image retrieval. *International Journal of Remote Sensing*, 42(24), 9405-9441. 2021.

Zhang, C., *et al.* Urban vegetation mapping using high-resolution satellite imagery and deep learning approaches. *Remote Sensing*, 13(3), 550. 2021.

ZHANG, X. *et al.* Comparison of machine learning algorithms for vegetation mapping using Sentinel-2 and Landsat-8 data. *Remote Sensing*. 2020.

ZHANG, X. *et al.* Individual tree detection and classification in urban areas using high-resolution imagery and deep learning. *Computers, Environment and Urban Systems*. 2023.

Zhu, X. X. *et al.* Deep learning in remote sensing: a review. *arXiv preprint arXiv:1710.03959*. 2017.

O VERDE TAMBÉM POLUI: UMA SEQUÊNCIA DIDÁTICA BASEADA NA ABORDAGEM CTS PARA DISCUTIR OS IMPACTOS AMBIENTAIS DA ENERGIA SOLAR

Marcelo Martin Heinrichs

UPF - Universidade de Passo Fundo

Divina Elaine da Cunha

UPF - Universidade de Passo Fundo

Gabriel Andrade de Melo Silva

UPF - Universidade de Passo Fundo

Aline Locatelli

UPF - Universidade de Passo Fundo



RESUMO

Este artigo descreve a aplicação de uma sequência didática estruturada com base na abordagem CTS, intitulada “O verde também polui”, cujo objetivo foi ampliar a discussão sobre os impactos socioambientais da geração de energia solar. A proposta foi desenvolvida com estudantes da 3ª série do Ensino Médio em uma escola da rede estadual do Rio Grande do Sul. A sequência foi organizada em cinco etapas, conforme as indicações de Aikenhead, e os dados produzidos foram analisados por meio da técnica de análise de conteúdo, aludida por Bardin. A análise foi estruturada em duas categorias: “concepções iniciais” e “deslocamentos conceituais”. Os resultados indicam que, inicialmente, predominava entre os estudantes uma visão positiva e simplificada da energia solar como uma fonte “totalmente limpa”; contudo, após a intervenção pedagógica, emergiu um pensamento crítico, ampliando a reflexão ética sobre os impactos das chamadas energias “verdes” e evidenciando a necessidade de transformação dos atuais padrões de produção e consumo

Palavras-chave: Ciência-Tecnologia-Sociedade (cts); Energia Solar; Impactos Ambientais.

INTRODUÇÃO

A história da humanidade é marcada por grandes descobertas e invenções, como a do fogo e da roda. A contribuição da ciência e da tecnologia para a sociedade é inegável (Bazzo, 1998), no entanto, diversos eventos ambientais de grande impacto, como por exemplo o desastre de Chernobyl (1986) e o acidente nuclear de Fukushima, no Japão (2011) e o rompimento da barragem de Mariana (2015) evidenciam os riscos de um desenvolvimento tecnológico desenfreado, sem a devida consideração de suas implicações sociais e ambientais.

A proliferação de inovações como as pesquisas em engenharia genética e a crescente utilização da inteligência artificial trazem à tona a necessidade de uma reflexão profunda sobre os limites da intervenção humana na natureza e os impactos sociais dessas inovações, nesta direção Pinheiro, Silveira e Bazzo (2007, p. 72) afirmam que:

Torna-se cada vez mais necessário que a população possa, além de ter acesso às informações sobre o desenvolvimento científico-tecnológico, ter também condições de avaliar e participar das decisões que venham a atingir o meio onde vive. É necessário que a sociedade, em geral, comece a questionar sobre os impactos da evolução e aplicação da ciência e tecnologia sobre seu entorno e consiga perceber que, muitas vezes, certas atitudes não atendem à maioria, mas, sim, aos interesses dominantes.

Um invento que transformou profundamente todas as esferas da vida humana foi a energia elétrica, no entanto, sua produção causa impactos ambientais que podem ser em maior ou menor grau, dependendo da fonte utilizada.

Neste contexto, a de se considerar que o Brasil é destaque mundial na geração de energia, isto devido à sua matriz elétrica que é baseada em fontes renováveis de energia. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética - EPE¹, em 2022, 86,1% da energia produzida no Brasil tinha origem em fontes

¹ A Empresa de Pesquisa Energética – EPE tem por finalidade prestar serviços ao Ministério de Minas e Energia (MME) na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, cobrindo energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados e biocombustíveis. Acesse no link <https://www.epe.gov.br/pt>

renováveis, enquanto que, em escala mundial, apenas 29,5% da energia gerada tinha essa origem.

Embora as energias renováveis sejam frequentemente vistas como soluções limpas e sustentáveis para a crise climática, tendo em vista que reduzem significativamente as emissões de gases de efeito estufa, essa visão esconde uma série de impactos socioambientais e contradições, pois a produção e instalação de equipamentos, como painéis solares e turbinas eólicas, também geram impactos ambientais.

A base material dessas energias depende da extração de minérios estratégicos como o silício, a prata e o alumínio para a produção de painéis solares, além de lítio, cobalto e níquel para baterias de armazenamento. Entre os problemas associados pode-se citar a mineração intensiva, que consome grandes volumes de água e energia, a contaminação de solos e rios por resíduos tóxicos e o descarte inadequado de painéis solares que contêm metais pesados perigosos ao meio ambiente e à saúde.

Diante dessas considerações, é importante mencionar que o termo “limpa” é, muitas vezes, tecnicamente impreciso e ideologicamente carregado. Nenhuma fonte energética é completamente isenta de impacto, a questão central refere-se ao custo ecológico, social e político envolvido. A energia “limpa” deve ser entendida em termos de graus de impacto, e não como uma oposição binária à chamada “energia suja”.

Assim, a produção energética, mesmo renovável, deve ser pensada juntamente com mudanças nos padrões de consumo, no uso racional da energia e na promoção da justiça ambiental.

Nesse contexto, com o objetivo de ampliar a discussão sobre os impactos da geração de energia solar na sociedade, foi desenvolvida uma sequência didática intitulada “O verde também polui”, aplicada a estudantes da 3ª série do Ensino Médio de uma escola da rede estadual do Rio Grande do Sul. A proposta foi estruturada com uma abordagem CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), visando favorecer, no contexto educacional, um processo de construção do conhecimento no qual:

“[...] os currículos correspondem a uma integração entre educação científica, tecnológica e social, em que conteúdos científicos e tecnológicos são estudados considerando seus aspectos históricos,

éticos, políticos e socioeconômicos, visando a formação da cidadania” (SANTOS, 2011, p. 303).

Conforme destaca Santos (2011, p. 304):

“[...] essa educação incorpora ao currículo discussões de valores e reflexões críticas que possibilitem desvelar a condição humana. Não se trata de uma educação contra o uso da tecnologia e nem para o seu uso, mas educação de reflexão sobre a condição existencial no mundo frente aos desafios postos pela ciência e tecnologia”.

A sequência didática² construída pode ser classificada como Enxerto CTS (Lopes, 1996), uma vez que busca introduzir um tema CTS nas disciplinas da área de Ciências da Natureza e suas Tecnologias, sem alterar significativamente o ensino tradicional que ocorre na escola. As atividades foram planejadas de acordo com as concepções de Aikenhead (1994), o qual propõe um modelo de ensino baseado na inter-relação entre problemas sociais, tecnologia e ciência, promovendo uma aprendizagem integrada e crítica.

Desta forma as atividades foram organizadas com base nas etapas propostas por Aikenhead (1994): 1) Introdução de um problema social; 2) Análise da tecnologia relacionada ao tema; 3) Estudo do conteúdo científico definido em função do tema social e da tecnologia introduzida; 4) Estudo da tecnologia correlata em função do conteúdo apresentado; 5) Discussão da questão social original. Esse modelo visa desenvolver a capacidade dos estudantes de analisar problemas reais sob múltiplas perspectivas, estimulando a reflexão crítica e a tomada de decisões informadas. No Quadro 1 estão descritas as atividades desenvolvidas.

² Acesse a sequência didática em <https://drive.google.com/file/d/1uo8umpiLBbelXLmC4pNqFIJpVI3O3OV6/view?usp=sharing>

Quadro 1. Estruturação das etapas da sequência didática segundo Aikenhead.

Etapas segundo Aikenhead (1994)	Atividades desenvolvidas
1) Introdução de um problema social	Provocação inicial e diagnóstico das concepções prévias dos estudantes sobre a energia solar e suas possíveis implicações ambientais.
2) Análise da tecnologia relacionada ao tema	Apresentação aos estudantes de impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de placas solares, promovendo a análise crítica da tecnologia envolvida.
3) Estudo do conteúdo científico definido em função do tema social e da tecnologia introduzida	Produção de um texto pelos estudantes com o título: “A Energia Solar é mesmo verde?”, mobilizando conhecimentos científicos relacionados à energia solar e seus impactos.
4) Estudo da tecnologia correlata em função do conteúdo apresentado	Conversão dos textos produzidos pelos estudantes em arquivos de áudio do tipo podcast, utilizando a Inteligência Artificial “Notebooklm”, explorando assim novas formas tecnológicas de expressão.
5) Discussão da questão social original	Socialização dos podcasts com a turma e com a comunidade escolar, promovendo a discussão das principais descobertas e reflexões dos estudantes sobre o tema.

Fonte: Os autores (2025).

DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DA APLICAÇÃO DA SEQUÊNCIA DIDÁTICA

A aula iniciou (Etapa 1 - introdução de uma problema social) com a apresentação das matrizes energética e elétrica do Brasil, destacando a participação da energia solar e a presença das usinas nucleares no país, gerando curiosidade e questionamentos dos alunos. Em seguida, foram apresentadas propagandas sobre energia solar, estimulando o debate. Utilizou-se o aplicativo Mentimeter para verificar as concepções dos alunos sobre a energia solar ser ou não totalmente limpa, revelando opiniões diversas e contraditórias. Essas contradições foram utilizadas como ponto de partida para aprofundar a discussão, funcionando como uma questão geradora “*A energia solar gera ou não desmatamento? Gera ou não poluição?*”

Na etapa 2 (Análise da tecnologia relacionada ao tema), a partir das dúvidas dos alunos, iniciou-se a análise dos componentes e da cadeia produtiva

das placas solares, da fabricação e mineração à exploração de metais pesados, erosão do solo e desmatamento. Foi apresentado o funcionamento das placas solares off-grid e discutido o uso de baterias para armazenamento e os elementos poluentes presentes. Abordou-se também o descarte problemático das placas, destacando o envio de equipamentos usados de países desenvolvidos para países em desenvolvimento e os impactos sociais e ambientais decorrentes.

Na Etapa 3 (Estudo do conteúdo científico definido em função do tema social e da tecnologia introduzida) foram apresentados os principais componentes das placas solares e discutidas as implicações ambientais associadas à mineração de metais pesados. A cartilha do INCA - “Materiais Pesados, Câncer e os Riscos Ambientais”³ foi utilizada para aprofundar o estudo sobre os riscos à saúde humana relacionados aos materiais presentes nas placas solares, promovendo um olhar científico e crítico sobre os efeitos dos metais pesados. Nesta etapa os alunos realizaram a produção de textos onde respondiam a pergunta “*A Energia Solar é mesmo limpa?*”

Na Etapa 4 (Estudo da tecnologia correlata em função do conteúdo apresentado) a discussão se expandiu para temas correlatos, como a reflexão sobre as cadeias globais de produção e descarte de tecnologias, os desafios para mudar modelos de consumo estabelecidos e exemplos de mecanismos regulatórios como créditos de carbono e legislações sobre responsabilidade no descarte de plásticos. Essas análises permitiram aos alunos perceber como mudanças tecnológicas podem e devem estar acompanhadas de políticas públicas e regulamentações. Nesta etapa foram realizadas discussões sobre os textos produzidos e os mesmos foram convertidos em um áudio do tipo *podcast*⁴.

Por fim, a etapa final (Etapa 5 - Discussão da questão social original) consistiu-se na problematização ampliada sobre a temática, inicialmente foi compartilhado o *podcast* criado. Após os alunos foram questionados se a solução estaria apenas na tecnologia ou também em uma necessária mudança do

³ Cartilha do INCA disponível em:

⁴ <https://www.google.com/url?q=https://ninho.inca.gov.br/jspui/bitstream/123456789/15363/1/Metais%2520e%-2520Cancer.pdf&sa=D&source=docs&ust=1750086068704951&usg=AOvVaw31fkWxUQDjXufbMfZ5OYcd>

⁴ Acesse o podcast construído com a ferramenta Notebooklm no link <https://drive.google.com/file/d/1NAFbQprVZinWuJMMzO02mQyNXsCGkNgds/view?usp=sharing>

modelo de consumo, e ainda, a quem afeta mais intensamente as questões de exploração e descarte de materiais no contexto das energias renováveis como a energia solar. Essas provocações instigaram novas perguntas por parte dos alunos, aprofundando a reflexão e permitindo que eles compreendessem a complexidade dos aspectos sociais, ambientais e científicos envolvidos na produção e uso da energia elétrica.

MÉTODOS

A aplicação da sequência didática *“O verde também polui”* e a posterior análise dos dados produzidos configuram esta investigação como uma pesquisa qualitativa do tipo estudo de caso. É válido salientar que pesquisa qualitativa permite compreender significados atribuídos pelos sujeitos a determinada realidade, valorizando o contexto, as interações e a complexidade dos fenômenos educacionais. Como destacam Bogdan e Biklen (1994, p. 49), “pesquisa qualitativa é um termo guarda-chuva sob o qual se agrupam diversas abordagens que têm em comum o interesse pela compreensão do significado que as pessoas atribuem às suas experiências”.

Optou-se por um estudo de caso por se tratar de uma intervenção pedagógica desenvolvida em um grupo específico de estudantes, com o objetivo de analisar o processo de construção de conhecimento em torno de uma temática controversa. De acordo com Yin (2001, p. 32), o estudo de caso é uma estratégia de pesquisa que “investiga um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto da vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidos”.

Para a constituição do corpus da pesquisa, foram utilizadas como ferramentas de coleta de dados as respostas dos estudantes ao Mentimeter, aplicado na etapa diagnóstica (etapa 01), e os textos produzidos em grupo durante a etapa 03 da sequência didática. Tais produções permitiram analisar as concepções iniciais e os deslocamentos conceituais ocorridos ao longo da proposta pedagógica.

A análise dos dados foi realizada por meio da análise de conteúdo, conforme proposta por Bardin (2016), que visa identificar, sistematizar e interpretar núcleos de sentido presentes nos discursos. Os dados foram organizados em

duas categorias de análise: “concepções iniciais” e “deslocamentos conceituais”, construídas com base nos objetivos da sequência didática e nas recorrências temáticas emergentes nas falas e textos dos estudantes.

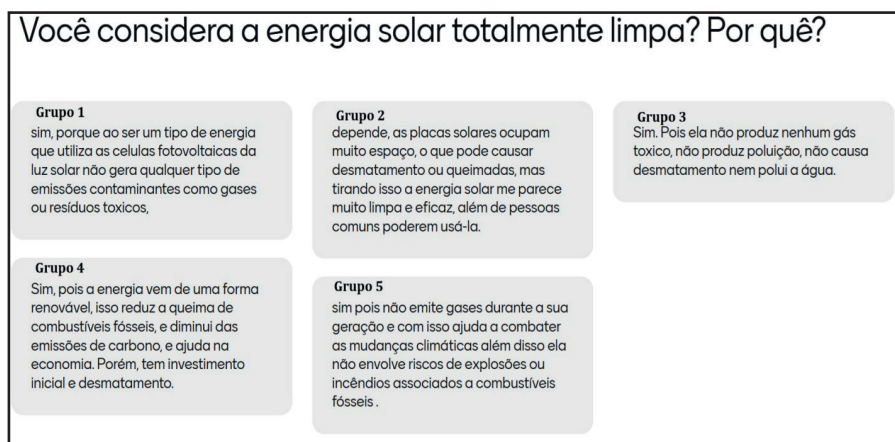
RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, apresentamos e analisamos os dados produzidos a partir da aplicação da sequência didática evidenciando as aprendizagens e deslocamentos conceituais observados ao longo da proposta pedagógica.

Categoria Concepções Iniciais

As concepções iniciais dos estudantes sobre a energia solar foram reveladas principalmente por meio das respostas ao Mentimeter, aplicado na etapa diagnóstica da sequência didática. Na figura 1 é possível observar as respostas dos estudantes.

Figura 1. Respostas dos estudantes ao mentimeter.



Fonte: Os autores (2025).

De modo geral, observou-se a predominância de uma visão positiva e simplificada da energia solar como uma fonte de energia “totalmente limpa”. A maioria das respostas expressa uma percepção inicial da energia solar como uma

fonte totalmente limpa, principalmente por não emitir gases tóxicos, resíduos ou causar poluição diretamente durante a geração de energia. Isso aparece com clareza nas respostas dos grupos 1, 3 e 5: *“não gera qualquer tipo de emissões contaminantes”* (grupo 1), *“não produz nenhum gás tóxico, não produz poluição”* (grupo 3); *“não emite gases durante a sua geração... ajuda a combater as mudanças climáticas”* (grupo 5).

Essas respostas indicam que, para os estudantes, “energia limpa” é sinônimo de ausência de emissões visíveis ou de resíduos diretos, desconsiderando outros aspectos como a cadeia produtiva, os processos de fabricação e descarte dos equipamentos.

No entanto, algumas respostas também revelaram indícios de percepções mais complexas, pode-se observar uma percepção inicial dos impactos socioambientais associados à energia solar, ainda que não totalmente elaborada: *“as placas solares ocupam muito espaço, o que pode causar desmatamento ou queimadas...”* (grupo 2); *“tem investimento inicial e desmatamento”* (grupo 4). Esses trechos mostram que, embora predomine a visão da energia solar como limpa e benéfica, alguns estudantes já identificam possíveis efeitos colaterais, especialmente relacionados ao uso do solo e à necessidade de infraestrutura.

Nota-se ainda a presença de respostas ambivalentes, que ao mesmo tempo reconhecem benefícios e indicam possíveis problemas. Isso aparece claramente nas respostas dos grupos 2 e 4: *“depende... tirando isso a energia solar me parece muito limpa e eficaz...”* (Grupo 2); *“reduz a queima de combustíveis fósseis... Porém, tem investimento inicial e desmatamento.”* (grupo 4). Essa ambivalência é extremamente positiva do ponto de vista pedagógico, pois revela um espaço fértil para a problematização e o desenvolvimento de uma visão mais crítica.

Categoria deslocamentos conceituais

As produções textuais dos estudantes revelam um importante deslocamento conceitual em relação à percepção inicial da energia solar. Se no início predominava a ideia de uma fonte “totalmente limpa”, ao final da sequência didática emergem compreensões mais complexas e críticas, articuladas tanto com o conhecimento científico quanto com aspectos éticos e socioambientais.

No quadro 2 estão descritos trechos das produções dos estudantes e os principais elementos conceituais e críticos que emergiram após a aplicação da sequência didática.

Quadro 2. Trechos representativos das produções dos estudantes sobre os impactos da energia solar

Grupo	Trecho selecionado	Elemento de destaque
Grupo 1	“A energia solar vem crescendo a cada dia principalmente no Brasil sendo uma energia limpa, porém seu mau descarte pode afetar muito o meio ambiente [...] seu material não é biodegradável.”	Reconhecimento do descarte como fator crítico; compreensão de que o material das placas causa impactos ambientais persistentes.
Grupo 2	“É uma fonte naturalmente conhecida como ‘limpa e renovável’, mas não é uma energia totalmente limpa [...] são explorados metais pesados na fabricação das placas.”	Superação da visão simplificada de “energia limpa”; menção explícita à exploração de metais pesados e à contaminação ambiental.
Grupo 3	“Precisamos danificar a natureza, desmatar, poluir e contaminar [...] o descarte para países subdesenvolvidos é complexo e preocupante pela falta de regulamentação.”	Ampliação da crítica ambiental para dimensões políticas e geográficas; reflexão ética sobre o descarte em países vulneráveis.
Grupo 4	“O problema são os recursos derivados dessa energia, por conta do desmatamento e os resíduos de lixo.”	Conscientização de que o impacto não está apenas na operação da tecnologia, mas também na infraestrutura e seus resíduos.
Grupo 5	“Pode ser muito poluente para o meio ambiente gerando resíduos perigosos e afetando rios, florestas, a sociedade e a vida selvagem.”	Visão sistêmica dos impactos; articulação entre aspectos ambientais e sociais; crítica à ideia de “limpeza” absoluta da energia solar.

Fonte: Os autores (2025). Elaborado a partir das produções textuais dos estudantes.

Ao realizar uma análise das concepções iniciais dos grupos e relacioná-las com os elementos de destaque é possível evidenciar que as produções demonstram que a sequência didática promoveu deslocamentos significativos de pensamento dos estudantes. No quadro 3 é realizada uma comparação entre as ideias expressas pelos estudantes na etapa diagnóstica e as concepções após a aplicação da sequência didática, sendo possível evidenciar a relação dos principais deslocamentos conceituais evidenciados nas produções textuais.

Quadro 3. Comparação entre as ideias expressas pelos estudantes antes e depois da intervenção pedagógica, evidenciando os principais deslocamentos conceituais provocados pela abordagem CTS.

Aspecto Analisado	Concepções Iniciais (diagnóstico)	Concepções Após a Intervenção (produções finais)
Visão da energia solar	Predominância de uma visão positiva, com foco na ausência de emissões e resíduos durante a geração.	Visão mais complexa, que reconhece os impactos associados à produção, instalação e descarte.
Compreensão de “energia limpa”	Associada à não emissão de gases e ao uso de recurso natural abundante.	Questionamento do conceito de “limpeza”; identificação de contradições e limites dessa tecnologia.
Consideração dos impactos ambientais	Pouca menção a impactos indiretos ou estruturais.	Reconhecimento de desmatamento, poluição do solo e da água, uso de metais tóxicos e descarte irregular.
Dimensões éticas e sociais	Pouco ou nenhum destaque.	Emergência de preocupações com justiça ambiental, países subdesenvolvidos e desigualdade no acesso/descarte.

Fonte: Os autores (2025).

Os dados apresentados no quadro 3 evidenciam que a sequência didática baseada na abordagem CTS possibilitou aos estudantes o deslocamento de uma visão simplista, que considerava a energia solar como uma solução absolutamente limpa, para uma perspectiva mais reflexiva e ética.

CONCLUSÃO

A aplicação da sequência didática *“O verde também polui”* estruturada a partir da abordagem Ciência-Tecnologia-Sociedade (CTS) e a análise dos dados evidenciou o potencial pedagógico dessa perspectiva para promover aprendizagens críticas no contexto do Ensino Médio. É possível aferir que a proposta contribuiu significativamente para a ampliação das concepções dos estudantes sobre a energia solar, promovendo o deslocamento de uma visão inicial predominantemente ingênua e positiva para uma compreensão mais crítica, complexa e contextualizada.

A partir das discussões realizadas e dos materiais apresentados, os estudantes foram capazes de identificar não apenas os benefícios da energia solar,

mas também os seus limites e impactos socioambientais, essa compreensão mais complexa revela um importante deslocamento conceitual em direção à alfabetização científica crítica e à formação para a cidadania.

Destaca-se, ainda, a relevância da inserção de recursos didáticos digitais no processo, tendo em vista que a utilização do Mentimeter, na etapa diagnóstica, possibilitou o levantamento em tempo real das concepções prévias dos estudantes, promovendo engajamento, participação e visibilidade das ideias dos grupos como ponto de partida para a problematização. Já o uso do NotebookLM, como ferramenta de apoio para a conversão dos textos em *podcasts*, ampliou as formas de expressão dos estudantes, incentivando o uso criativo da tecnologia na construção e comunicação do conhecimento, além de valorizar diferentes linguagens e competências.

Dessa forma, conclui-se que práticas pedagógicas contextualizadas, fundamentadas em temas controversos e apoiadas por ferramentas tecnológicas acessíveis, contribuem significativamente para a formação de sujeitos críticos, capazes de refletir sobre os impactos da ciência e da tecnologia no mundo contemporâneo. A abordagem CTS, nesse sentido, se apresenta como uma estratégia potente para integrar os conhecimentos científicos às realidades vividas pelos estudantes, favorecendo o diálogo entre saber escolar e cidadania.

REFERÊNCIAS

- AIKENHEAD, G. What is STS science teaching? *In*: SOLOMON, J; AIKENHEAD, G (Orgs.). **Sts education: international perspectives on reform**. New York: Teachers College Press, 1994. p. 47-59.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. São Paulo: Edições 70, 2016.
- BOGDAN, R.; BIKLEN, S. **Investigação qualitativa em educação: uma introdução à teoria e aos métodos**. Porto: Porto Editora, 1994.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Matriz Energética e Elétrica, disponível em <https://www.epe.gov.br/pt/abcdnenergia/matriz-energetica-e-eletrica>, acesso em 25, maio, 2025.
- LOPES, L. *et al*. **Ciencia, Tecnología y Sociedad: una introducción al estudio social de la ciencia y la tecnología**. Madrid: TECNOS, 1996.

PINHEIRO, N. A. M; SILVEIRA, R. M. C. F; BAZZO, W, A. CIÊNCIA, TECNOLOGIA E SOCIEDADE: A RELEVÂNCIA DO ENFOQUE CTS PARA O CONTEXTO DO ENSINO MÉDIO. **Ciência & Educação**, v. 13, n. 1, p. 71-84, 2007, DOI: <https://doi.org/10.1590/S1516-73132007000100005>, acesso em 20,maio,2025.

SANTOS, W. L. P. dos. A Química e a formação para a cidadania. **Educ. quím**, Ciudad de México , v. 22, n. 4, p. 300-305, 2011. Disponível em http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2011000400004&lng=es&nrm=iso. acesso em 30,maio,2025.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

CLIMATE CHANGE: TRUTHS AND FALLACIES

Abdon Baptista de Paula Filho
Centro de Estudos da População (CEPESE)



ABSTRACT

This article offers a critical reflection on climate change, analyzing consolidated scientific evidence and confronting widely disseminated distorted narratives. Drawing upon an integrative literature review, it investigates the amplitude of thermal variations across different regions of the planet, historical climate cycles, and the reliability of current measurements. The study identifies proven truths regarding global warming and associated environmental impacts, concurrently unmasking fallacies sustained by pseudoscientific or ideological arguments. This work aims to fill a gap by systematically contrasting key scientific truths with the most prevalent fallacies, offering an analytical framework for understanding climate misinformation and fostering more informed public and political engagement. By examining the political instrumentalization of denialist discourses, the article highlights the risks of misinformation in public policy formulation and social mobilization in response to the climate crisis. The analysis is grounded in authoritative authors and recognized models, highlighting that climate science, though complex, maintains consensus on crucial aspects. It concludes that a critical understanding of the facts is essential for addressing the challenges posed by climate change in an ethical, scientific, and responsible manner.

Keywords: climate change; global warming; misinformation; climate cycles; scientific consensus.

INTRODUCTION

Climate change stands as one of the most debated and polarizing subjects of contemporary times, mobilizing entities from academic centers to political arenas. Over the past decades, an extensive body of evidence has accumulated indicating significant alterations in Earth's climatic patterns. Such evidence, however, coexists with denialist discourses and distorted interpretations, often motivated by economic or ideological interests (Klein, 2014). The complexity of this topic necessitates not only attention to scientific data but also a critical analysis of the fallacies circulating in public discourse.

Earth's climate is influenced by a multiplicity of natural and anthropogenic factors. Climate science distinguishes itself by studying long-term atmospheric averages and patterns, rather than isolated or seasonal phenomena. The distinction between weather and climate is, therefore, fundamental to avoid common misconceptions in popular discussions about global warming (IPCC, 2021). Consequently, the incorrect interpretation of isolated events as indicative of the non-existence of climate change reveals a basic misunderstanding of the concepts involved.

Among the well-established truths in climate science is the progressive increase in global average temperature. Data from recent decades indicate that the warmest years on record have predominantly occurred after 2000, with 2023 ranking among the five warmest ever recorded (NASA, 2023). This warming does not occur homogeneously across the globe but follows a pattern that more intensely affects polar regions and vulnerable ecosystems.

Furthermore, the relationship between atmospheric carbon dioxide (CO₂) concentration and the rise in global temperature is widely corroborated by historical series and computational simulations. Since the Industrial Revolution, atmospheric CO₂ concentration has drastically increased, accompanied by a significant warming trend (Lovelock, 2006). The burning of fossil fuels, changes in land use, and industrial processes constitute the main drivers of this increase.

Another irrefutable indicator of climate change is the melting of polar ice caps and glaciers, accompanied by rising sea levels. Satellite observations confirm the accelerated loss of ice mass in Greenland and Antarctica, directly contributing

to sea-level rise (Shepherd *et al.*, 2020). This phenomenon threatens coastal populations and could trigger mass climate migrations in the coming decades.

The analysis of geological records, such as sediments and ice cores, reveals that Earth has undergone various natural climate cycles throughout its history. Milankovitch Cycles, for example, demonstrate how variations in Earth's orbit influence warming and cooling patterns over millennia (Imbrie & Imbrie, 1980). However, the current rate of warming surpasses previous natural cycles in both speed and intensity. While natural temperature variations of a few degrees Celsius historically unfolded over millennia, Earth has already warmed approximately 1.1 to 1.2°C since the pre-industrial era, with most of this increase concentrated in recent decades (Marcott *et al.*, 2013; NASA, 2023).

During the so-called Little Ice Age, between the 14th and 19th centuries, a moderate global cooling occurred, albeit with significant social impacts, such as failed harvests and internal migrations (Fagan, 2000). These events underscore that the climate has always influenced human history, although the scale and causes of the current phenomenon are substantially different. The modern acceleration is predominantly attributed to human action.

The locations with the greatest thermal variations on the planet—such as inland Siberia, African deserts, and Antarctica—have been monitored with increasing precision by international networks. The World Meteorological Organization (WMO) coordinates a network of meteorological stations that provides continuous and accessible data (WMO, 2022). Nevertheless, historical limitations exist, as reliable global-scale measurements only began in the late 19th century.

Thermal amplitudes at these extreme points have exhibited increasingly erratic behavior. In many cases, heat peaks are more intense, and winters are shorter, signaling an imbalance in the thermal regime of these regions (Steffen *et al.*, 2018). The intensification of these extremes compromises local biodiversity and ecosystem resilience.

A recurring fallacy in the climate debate is the notion that “the climate has always changed, so there’s nothing to worry about.” This argument disregards the anthropogenic origin of the current change, in addition to overlooking its unprecedented speed (Oreskes & Conway, 2010). Past variations occurred over thousands of years, while the current warming is concentrated within a few decades.

Another common distortion involves delegitimizing climate models under the claim that “predictions are always wrong.” While not perfect instruments, modern climate models are capable of simulating patterns with high reliability and have accurately predicted long-term projections (Hausfather & Peters, 2020). These models are calibrated with real data and constantly adjusted to improve their precision.

The perception that scientists promote “climate alarmism” has been fueled by disinformation strategies from sectors linked to the fossil fuel industry. Deliberate campaigns have been funded to sow public doubt and discredit science (McCright & Dunlap, 2011). This type of manipulation compromises evidence-based political decision-making.

The relationship between science and ideology must also be understood with caution. Although science is based on empirical data, its communication and public interpretation are often mediated by cultural values and political interests (Latour, 2004). Thus, it becomes imperative to recognize the authority of science without ignoring the power conflicts that permeate its dissemination.

Building on this, it is also crucial to recognize that beyond deliberate disinformation, the communication and public interpretation of scientific findings can be subtly influenced by cognitive biases, cultural frameworks, and pre-existing beliefs. Even well-intentioned groups may inadvertently emphasize certain research aspects or frame results in ways that align with their specific values or policy preferences. This more sophisticated understanding highlights the complex sociology of science and underscores that effective scientific communication requires navigating not just facts but also diverse human perceptions and societal contexts.

Climate denial strategies encompass the use of half-truths, semantic distortions, and appeals to common sense. Frequently, these strategies operate through abusive simplifications or the manipulation of graphs and statistics (Cook *et al.*, 2013). Scientific integrity and the peer-review process ensure that data manipulation is exposed, as transparent methodologies and reproducible results are foundational to scientific validation. The outcome is the paralysis of public debate and the postponement of urgent measures.

Beyond denial, there is also “climate fatalism,” which leads to inaction through the belief that it is already too late to act. This perspective, though

distinct from explicit denial, has equally damaging effects, as it fosters political and social immobility (Ghosh, 2016). Climate change, by its very nature, demands proactive action, not resignation.

Consequently, the fight against climate misinformation must be integrated into public policies and environmental education. It is necessary to empower the population to distinguish reliable sources, interpret data, and comprehend the limits of scientific knowledge (Boykoff & Boykoff, 2007). Without this empowerment, rational discourse will continue to be stifled by ideological noise.

A critical analysis of climate change, therefore, requires the combination of scientific rigor, communicational clarity, and ethical responsibility. Society faces a challenge that is simultaneously technical and moral, demanding multisectoral cooperation and long-term commitments (Gardiner, 2011). No action will be effective without a precise understanding of the facts.

This article is based on an integrative literature review, enabling the critical synthesis of academic studies, scientific reports, and relevant interdisciplinary publications. This approach facilitated a broad and well-founded view on the consensus and controversies related to climate change.

Among the skeptical arguments aimed at discrediting climate models is their supposed failure to predict regional temperature variations, especially in polar regions. However, studies such as Holland and Bitz (2003) demonstrate that coupled general circulation models already predicted, with relative accuracy, the amplification of warming in high latitudes—the so-called polar amplification—long before this trend was confirmed by observational data. This reinforces the reliability of climate models in projecting complex regional patterns, thereby delegitimizing criticisms that label them as imprecise or biased.

The remainder of this article is structured to further this analysis. Section 2 addresses Verified Fallacies and Their Disproof, deconstructing distorted narratives. Subsequently, Section 3 presents Proven Truths and Their Validation, consolidating the body of scientific evidence. Section 4 explores Temperature Cycles in Earth's History, contextualizing current climate changes within a historical panorama. Section 5 details Regional Thermal Amplitude Patterns, while Section 6 discusses Limitations and Challenges in Historical Temperature Verification. Finally, Section 7 concludes with a synthesis of the findings and their implications.

VERIFIED FALLACIES AND THEIR DISPROOF

Public discourse on climate change is frequently obscured by a series of arguments that, although widely disseminated, do not withstand a rigorous analysis of scientific data.

This section systematically debunks these common fallacies by grouping them according to their underlying themes and presenting the compelling evidence that refutes each one.

Fallacies of Natural Variability

This group of fallacies asserts that observed climate changes are merely a part of Earth's inherent natural system variability, thereby minimizing or outright denying any significant human influence. Such arguments often draw on historical climatic shifts to dismiss current trends.

A pervasive instance of this reasoning is the claim that “the climate has always changed, so there’s nothing to worry about.” While geological and paleoclimatic records indeed demonstrate Earth’s history of natural warming and cooling cycles, driven by factors like Milankovitch Cycles, volcanic activity, and solar variations, this argument crucially overlooks the current change’s unprecedented speed and anthropogenic origin.

As discussed in the introduction to this article:

A recurring fallacy in the climate debate is the notion that ‘the climate has always changed,’ so there’s nothing to worry about. This argument disregards the anthropogenic origin of the current change, in addition to overlooking its unprecedented speed (Oreskes & Conway, 2010). Past variations occurred over thousands of years, while the current warming is concentrated within a few decades.

The modern rate of warming far surpasses any natural variation witnessed in millennia, making it a clear anomaly requiring explanations beyond natural cycles. Relatedly, some argue that “cold weather events refute global warming.” This claim fundamentally confuses weather—short-term atmospheric conditions—with climate, which represents lon-

g-term average patterns. Global warming, by infusing more energy into the climate system, can paradoxically intensify extreme weather phenomena, including localized cold snaps. This can occur, for example, through disruptions to the polar jet stream due to accelerated Arctic warming (known as polar amplification), allowing cold air masses to penetrate lower latitudes (Francis & Vavrus, 2012).

One of the most pervasive fallacies in the public discourse on climate change is that cold weather events refute global warming. Such a claim disregards the fundamental distinction between weather and climate and overlooks the effects of atmospheric instability induced by global warming, such as the displacement of jet streams.

Another variation, the “ ‘naturalness’ fallacy, argues that observed changes are merely part of natural cycles and, therefore, do not necessitate human intervention.” This argument, like the first, attempts to sideline overwhelming evidence of human attribution.

Geological records and climate modeling consistently show that the current pattern of change differs from previous cycles in both intensity and unprecedented speed. Human influence on the climate system is statistically proven and distinct from natural variability (Marcott *et al.*, 2013). For instance, carbon isotope analyses provide a clear “fingerprint” of the fossil origin of additional carbon in the atmosphere, unequivocally confirming human activity as the primary driver of current warming (Francey *et al.*, 1999).

The ‘naturalness’ fallacy argues that observed changes are merely part of natural cycles and, therefore, do not necessitate human intervention. However, geological records and climate modeling consistently indicate that the current pattern of change differs from previous cycles in both intensity and unprecedented speed. The human influence on the climate system is statistically proven and distinct from natural variability.

Fallacies of Scientific Uncertainty and Modeling

This category of fallacies attempts to undermine the credibility of climate science itself, often by focusing on perceived inaccuracies or inherent uncertainties within climate models and data.

A common line of attack asserts that “climate model predictions are always wrong.” Critics frequently use this to claim that climate projections are unreliable and thus should not inform policy. However, while climate models, like all scientific tools, contain uncertainties, they are continually refined and validated against historical data and current observations. Modern climate models have demonstrated a remarkable ability to simulate past climates and project future trends with considerable reliability. A compelling example, as established in the introductory sections of this article, is their accurate prediction of polar amplification long before this trend was confirmed by observational data (Hausfather & Peters, 2020).

Another common distortion involves delegitimizing climate models under the claim that ‘predictions are always wrong.’ While not perfect instruments, modern climate models are capable of simulating patterns with high reliability and have accurately predicted long-term projections. These models are calibrated with real data and constantly adjusted to improve their precision.

Building on this, the “fallacy of ‘scientific uncertainty’” is a common tactic to postpone political decisions. This argument leverages the inherent probabilistic nature of scientific knowledge to demand “absolute certainty” before action is taken. However, despite the complexities of climate models and ongoing research, the scientific consensus on human-caused global warming is robust and overwhelming. The remaining uncertainties primarily concern the precise magnitude and timing of future impacts, rather than the reality of the problem itself or its anthropogenic origin. Postponing action based on such manufactured doubt cultivates public skepticism and impedes evidence-based policy formulation.

The fallacy of ‘scientific uncertainty’ is also widely employed to postpone political decisions. Despite the inherent complexity of climate models, the consensus among scientists regarding human-caused global warming is robust and overwhelming (Anderegg *et al.*, 2010).” This consensus is quantitatively

evidenced by numerous meta-analyses of peer-reviewed scientific literature and expert opinion surveys.

A related, widely disseminated argument asserts that “there has been a ‘pause’ or ‘hiatus’ in global warming” in recent decades, supposedly invalidating the long-term warming trend. This notion, widely used by denialist movements to undermine climate science credibility, is contradicted by comprehensive analyses of global temperature data.

These analyses reveal that any apparent “pause” resulted from short-term natural fluctuations (such as oceanic heat absorption) and inadequate statistical interpretations or selective data use (Rather & Lange, 2022). When all data, including deep ocean warming, are considered, the continuous progression of global warming remains unequivocal.

Economic and Technological Fallacies

These fallacies typically argue that solutions to climate change are either economically prohibitive or that future technological advancements will render current actions unnecessary, thus justifying present inaction or complacency.

One common economic objection is that “climate mitigation is economically unfeasible.” This argument claims that actions to reduce emissions are too costly and will severely harm economic prosperity. However, comprehensive economic studies consistently demonstrate the opposite: the costs associated with inaction, including the impacts of extreme weather events, productivity losses, and infrastructure damage—far outweigh the investments required for a timely energy transition (Stern, 2007). Therefore, proactive mitigation measures are not only environmentally essential but also a financially prudent long-term choice.

Certain sectors contend that climate mitigation is economically unfeasible, reinforcing the fallacy that action is more costly than inaction. However, comprehensive economic studies consistently demonstrate that the costs of non-mitigation far exceed the investments required for energy transition.

Another frequently heard technological argument is that “renewable energies cannot meet global demand.” This claim questions the capacity of solar, wind, and other renewable sources to satisfy the planet’s escalating energy needs. Yet, the rapid advancements in renewable energy technologies, significant increases

in efficiency, and the development of viable hybrid energy production models prove otherwise (Jacobson *et al.*, 2015). Countries like Germany and Denmark already exemplify that systems predominantly based on renewable sources are both viable and stable, effectively disproving this technological limitation.

Another common distortion in the climate debate is the assertion that renewable energies cannot meet global demand. This claim disregards recent technological advancements, significant increases in efficiency, and the viability of hybrid energy production models.

Finally, the rhetoric that “future technology will solve the problem, so we don’t need to act now” tends to promote dangerously complacent procrastination. While technological innovation is undoubtedly critical for long-term decarbonization and adaptation, an excessive reliance on hypothetical future solutions compromises the immediate need for actions based on current scientific understanding (Anderson & Peters, 2016). Urgent emission reductions and energy transition efforts are indispensable and cannot be substituted by simply waiting for technologies still under development or at a limited scale.

The rhetoric that ‘future technology will solve the problem’ tends to promote dangerously complacent procrastination. Although technological innovation is undeniably crucial for long-term solutions, it does not substitute the immediate need for actions based on current scientific understanding.

Fallacies of Responsibility and Causality

These fallacies attempt to deflect responsibility for the climate crisis or to minimize the urgency and proximity of its impacts, thereby hindering collective action.

One common argument is that “individual action is irrelevant.” This suggests that personal efforts to reduce one’s carbon footprint are insignificant when compared to the vastness of the problem, leading to demotivation and inaction. However, while public policies are undeniably essential for systemic change, the cumulative effect of individual actions possesses significant potential. Shifts in consumption patterns, transportation choices, and dietary habits can lead to substantial reductions in greenhouse gas emissions and, crucially,

generate public and political pressure for broader structural transformations (Dietz *et al.*, 2009).

The notion that individual action is irrelevant also constitutes a common fallacy. While public policies are undeniably essential for systemic change, studies consistently show that shifts in consumption patterns can significantly reduce greenhouse gas emissions.

Another significant historical fallacy involves “denying the historical responsibility of developed countries” in global warming. This argument seeks to disregard the disproportionate role of industrialized nations, which account for the majority of emissions since the Industrial Revolution and possess a greater capacity to finance the energy transition (Roberts & Park, 2007). Ignoring this inherent inequality undermines the fundamental principles of climate justice and equitable burden-sharing, posing a significant barrier to effective global cooperation.

Denying the historical responsibility of developed countries in global warming constitutes a significant historical fallacy. These nations account for the majority of emissions since the Industrial Revolution and possess a greater capacity to finance the energy transition.

Furthermore, the belief that “the effects of climate change will only be felt in the distant future” represents a chronological fallacy. This premise postpones the urgency of the problem, suggesting that its real consequences are too far off to affect people’s lives today.

Yet, the reality is starkly different. Extreme events such as heatwaves, floods, and prolonged droughts are already occurring with increased frequency and intensity across various parts of the globe, as widely documented (Coumou & Rahmstorf, 2012). The climate crisis is unequivocally a present and urgent problem, imposing escalating human and economic consequences right now.

The belief that the effects of climate change will only be felt in the distant future represents a chronological fallacy. Extreme events such as heatwaves, floods, and prolonged droughts are already occurring with increased frequency and intensity, as widely observed across various parts of the globe.

***Ad Hominem* and Conspiracy Fallacies**

This group of fallacies typically bypasses substantive scientific debate, opting instead to attack the credibility of scientists, scientific institutions, or the very process of scientific inquiry, often by suggesting ulterior motives or clandestine conspiracies.

A primary example is the assertion that “climate science is motivated by ulterior motives or political conspiracies.” This *ad hominem* argument avoids engaging with empirical data and instead attempts to discredit researchers and scientific institutions (Lewandowsky *et al.*, 2015). Climate research is conducted by thousands of scientists from diverse backgrounds, rigorously peer-reviewed, and founded on robust empirical data and transparent methodologies. The claim of conspiracy serves to divert attention from overwhelming evidence and undermine scientific consensus, thereby hindering informed public discourse and effective action. As highlighted in the introductory discussion, this manipulation is often linked to deliberate disinformation campaigns from sectors tied to the fossil fuel industry, funded to sow public doubt and discredit science (McCright & Dunlap, 2011).

The perception that scientists promote ‘climate alarmism’ has been fueled by disinformation strategies from sectors linked to the fossil fuel industry. Deliberate campaigns have been funded to sow public doubt and discredit science. Finally, the idea that climate science is motivated by ulterior motives or political conspiracies represents an *ad hominem* fallacy. This type of argument attacks the credibility of scientists rather than engaging with empirical data.

These manipulation tactics often involve the “manipulation of graphs and statistics,” alongside half-truths and semantic distortions, as part of broader climate denial strategies (Cook *et al.*, 2013). Such methods are deployed to create confusion, paralyze public debate, and delay the implementation of urgent climate measures.

Climate denial strategies encompass the use of half-truths, semantic distortions, and appeals to common sense. Frequently, these strategies operate through abusive simplifications or the manipulation of graphs and statistics. The outcome is the paralysis of public debate and the postponement of urgent measures.

PROVEN TRUTHS AND THEIR VALIDATION

While debates surrounding climate change are often characterized by misinformation, a robust body of scientific evidence provides undeniable truths validated by extensive observation, historical data, and sophisticated modeling. This section outlines these facts, grouped by their primary manifestations, underscoring the reliability and consistency of the scientific consensus.

Global Thermal Trajectory

The most fundamental truth regarding climate change is the persistent and accelerated increase in global average temperatures. This trend has been meticulously documented by a century of instrumental and satellite records, showing a clear anthropogenic influence distinct from natural variability (Hansen *et al.*, 2010). Direct observations confirm that the last four decades have been successively warmer, with eight of the warmest years on record occurring between 2015 and 2022, strongly reinforcing the consistency and reliability of scientific data (WMO, 2022). This empirical evidence unequivocally refutes any notion that observed warming is merely episodic or attributable solely to natural fluctuations.

Cryosphere and Sea-Level Dynamics

The impacts on Earth's cryosphere (ice regions) and oceans are irrefutable indicators of global warming. A continuous rise in the global mean sea level has been precisely recorded by satellite altimeters and tide gauges (Church & White, 2011). This rise directly reflects the accelerated melting of glaciers and ice sheets, extensively documented through satellite imagery and in situ measurements (Rignot *et al.*, 2011), as well as the thermal expansion of seawater. These mass losses are largely irreversible in the short term, posing a direct and escalating threat to coastal populations and vulnerable island communities worldwide. Furthermore, the reduction in snow cover across the Northern Hemisphere, measured by remote sensors, directly affects Earth's albedo (reflectivity), further

accelerating global warming by diminishing the planet's capacity to reflect solar radiation (Brown & Robinson, 2011).

Ocean Health and Chemistry

Oceans, critical regulators of Earth's climate, are undergoing profound changes. Ocean acidification, a measurable scientific truth, results from the absorption of excess atmospheric carbon dioxide by marine waters, consistently observed through a steady decline in oceanic pH (Feely *et al.*, 2004). This ongoing process severely compromises marine ecosystems, particularly vulnerable calcifying organisms like coral reefs and shellfish. Moreover, a consistent increase in average ocean temperatures, recorded by oceanic buoys and satellites, is altering marine currents and delicate underwater ecosystems (Levitus *et al.*, 2012), with profound global consequences for climate regulation and marine fisheries. The decrease in ocean productivity, evidenced by reductions in phytoplankton biomass observed by satellites, is attributed to rising sea surface temperatures, compromising the base of the marine food web with cascading effects on ecosystems and fisheries (Behrenfeld *et al.*, 2006).

Atmospheric Composition and Anthropogenic Fingerprints

The fundamental role of greenhouse gases in current climate change is profoundly supported by atmospheric data. Paleoclimate studies unequivocally confirm that current atmospheric carbon dioxide levels are the highest recorded in the last 800,000 years, precisely measured through analyses of ice cores from Antarctica (Lüthi *et al.*, 2008).

This unprecedented rise directly coincides with human industrialization, rather than being attributable to natural long-term variations. The human contribution to the enhanced greenhouse effect has been conclusively proven through isotopic analyses of carbon, which distinguish CO₂ originating from fossil fuels from natural sources (Francey *et al.*, 1999), providing direct evidence of human impact on the global carbon cycle.

Extreme Weather and Hydrological Cycle Alterations

A demonstrably increased frequency and intensity of extreme weather events, including hurricanes, prolonged droughts, and heat waves, have been documented by various meteorological agencies globally (Coumou & Rahmstorf, 2012). The statistical relationship between global warming and the intensification of climate extremes is now robust and widely accepted within the scientific community. The exacerbation of droughts in different regions is consistently linked to global warming, profoundly affecting water balance and freshwater availability. The rise in global temperatures contributes to increased evapotranspiration and, consequently, to the intensification of drought severity, as indicated by the Palmer Drought Severity Index (Dai, Trenberth, & Qian, 2004). Recurrent severe droughts, such as in the African Sahel, are explained by climate models incorporating greenhouse gas-induced changes (Giannini *et al.*, 2003).

The redistribution of precipitation patterns, manifesting as intensified rainfall in some regions and increased aridification in others, has been continuously monitored by global meteorological networks, indicating profound alterations in atmospheric systems (Held & Soden, 2006). This implies heightened climate variability and a greater frequency of extreme events, as documented by satellites like the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) (Trenberth, 2011). Lastly, the increased frequency of wildfires in regions like Australia and California is strongly correlated with global warming, evidenced by historical temperature and humidity records (Abatzoglou & Williams, 2016).

Ecological and Biological Responses

Climate change is profoundly altering natural ecosystems. Accelerated biodiversity loss is strongly associated with climate change, evidenced by temporal series showing significant declines in populations of climate-sensitive animal and plant species (Bellard *et al.*, 2012). This pervasive impact disrupts entire ecological food webs and threatens ecosystem stability. The poleward and upward shifts of species ranges have been proven in numerous field studies as a direct response to rising temperatures (Parmesan & Yohe, 2003). These ecological movements alter species interactions and disrupt agricultural systems.

Furthermore, the effects of permafrost thaw have been extensively recorded in Arctic regions, leading to the release of potent greenhouse gases like methane and further accelerating global warming (Schuur *et al.*, 2015), constituting a concerning positive climate feedback loop.

Socioeconomic and Public Health Consequences

The impacts of climate change extend directly to human well-being and societal stability. Climate change increases the frequency and geographical spread of vector-borne infectious diseases, such as malaria and dengue, as demonstrated by epidemiological patterns in tropical and subtropical zones (Patz *et al.*, 2005), as climate directly influences the life cycle and distribution of disease vectors. The displacement of human communities due to extreme weather events and rising sea levels is now a stark reality, documented by international organizations (IOM, 2019), with the number of climate refugees increasing annually. The impacts on agriculture have been confirmed by observed declines in agricultural productivity and shifts in cultivation zones (Lobell *et al.*, 2011), posing a significant threat to global food security and agricultural livelihoods. Moreover, the economic impacts of extreme events have become increasingly severe, as demonstrated by reports from the World Bank and global insurance companies (Hallegatte *et al.*, 2016), with cumulative losses disproportionately affecting developing countries.

Validation of Climate Models

Highly complex climate models, such as those utilized by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), have been rigorously validated by their demonstrated ability to accurately simulate past climates and project future trends with acceptable precision (Flato *et al.*, 2013). These sophisticated tools provide a solid scientific foundation for understanding and predicting future climate scenarios, reinforcing the reliability of climate science in diagnosing and forecasting climate change.

TEMPERATURE CYCLES IN EARTH'S HISTORY

Earth's climatic history reveals a succession of natural warming and cooling cycles that have profoundly shaped the planet's evolution and life. Paleoclimatic records obtained from ice cores and marine sediments demonstrate that these cycles occurred with varying intensity and frequency over millions of years (Zachos *et al.*, 2001). Such data provides a solid basis for differentiating natural changes from those induced by human activity.

During the Pleistocene epoch, for instance, Earth experienced successive glaciations interspersed with warmer interglacial phases, with global temperature variations of up to 10°C over timescales of thousands of years (Petit *et al.*, 1999). These oscillations were crucial in shaping landscapes, biodiversity patterns, and human distribution.

These glacial cycles are strongly associated with orbital variations known as Milankovitch cycles, which influence the amount of solar radiation reaching the planet at different times (Imbrie & Imbrie, 1980). The eccentricity, obliquity, and precession of Earth's orbit act as natural agents in modulating the climate over tens to hundreds of thousands of years.

One of the most notable abrupt warming events in Earth's history was the Paleocene- Eocene Thermal Maximum (PETM), which occurred approximately 56 million years ago. This event is linked to a sudden and massive release of carbon into the atmosphere, causing a global temperature increase and mass extinctions (McInerney & Wing, 2011).

The PETM is frequently cited as a natural analogy to the effects of current anthropogenic carbon emissions. On a more recent scale, the Little Ice Age, which lasted from the 14th to the 19th centuries, stands out as a period of relatively sudden cooling that primarily affected the Northern Hemisphere. This phenomenon is believed to have been caused by a combination of low solar activity and intense volcanic activity (Mann, Bradley & Hughes, 1998). Although significant, this phase did not have the scope or magnitude of the current warming.

The Medieval Warm Period, conversely, between the 9th and 13th centuries, is often cited in debates about natural climate variability. However, evidence indicates that such warming was localized and of lesser intensity than the temperature rise observed in recent decades (Jones & Mann, 2004). The

misuse of this episode often serves to fuel fallacies about the anthropogenic origin of contemporary warming.

Analyses of ice cores from Antarctica and Greenland provide robust data spanning the last 800,000 years, revealing the direct relationship between greenhouse gas concentrations and global temperature (EPICA Community Members, 2004). The records show that increases in CO₂ either precede or coincide with temperature rises, reinforcing the importance of these gases in climate cycles.

Despite the influence of natural factors such as solar cycles, studies indicate that the Sun's contribution to the warming observed in recent decades is minimal, being insufficient to account for the intensity and speed of recent changes (Lean & Rind, 2008).

The current thermal trajectory does not correspond to any known solar pattern. Large-magnitude volcanic events, such as the eruption of Mount Tambora in 1815, demonstrate how natural factors can cause significant cooling by temporarily blocking solar radiation with aerosols (Robock, 2000). However, the effects of these episodes are transient and do not explain the persistent warming pattern of the last century.

The ongoing global warming distinguishes itself from previous cycles by both its speed and its scope. Paleoclimatic reconstructions show that over the last 11,000 years, temperatures have varied moderately, and the current increase breaks with this historical stability (Marcott *et al.*, 2013). This constitutes an anomaly that requires explanations beyond natural cycles.

REGIONAL THERMAL AMPLITUDE PATTERNS

Thermal amplitude, understood as the difference between maximum and minimum temperatures over a given time interval, varies significantly across different regions of the planet, being conditioned by geographical, climatic, and atmospheric factors (Barry & Chorley, 2010). Monitoring these variations reveals important trends in the dynamics of global warming.

Continental regions in inland Asia and North America exhibit some of the largest seasonal thermal amplitudes on the planet, with differences exceeding 40°C between winter and summer (Serreze *et al.*, 2000). This characteristic

is due to their distance from the ocean, which acts as a thermal regulator, moderating extremes.

Polar regions, particularly the Arctic, have shown a significant increase in annual thermal amplitude due to the phenomenon known as Arctic amplification, where warming is more accelerated compared to other regions (Screen & Simmonds, 2010). This pattern has direct impacts on ecosystems, the cryosphere, and the meteorological systems of the Northern Hemisphere.

In tropical areas, such as the Amazon, the daily thermal amplitude is typically more pronounced than the annual, varying according to vegetation cover and relative humidity (Marengo *et al.*, 2001). Deforestation in these regions tends to amplify this variation by reducing atmospheric humidity and the soil's heat retention capacity. Intensive urbanization contributes to an increase in daily thermal amplitude in metropolitan areas through the urban heat island effect, where artificial surfaces retain heat during the day and release it at night (Oke, 1982). This process generates local climate changes that add to global changes.

In coastal zones, such as the South American Pacific coast, thermal amplitude is usually reduced due to the moderating influence of ocean currents, like the Humboldt Current (Garreaud *et al.*, 2001). Thermal stability in these areas is one reason for their historical population density.

Thermal variability is also influenced by large-scale climate events, such as El Niño and La Niña, which alter temperature patterns in various regions worldwide (Trenberth & Stepaniak, 2001). During El Niño episodes, for example, tropical regions may experience reductions in thermal amplitude due to increased cloudiness.

Monitoring historical series, the thermal amplitude has decreased in many regions over the last century, because of warmer nights, which is one of the clearest signs of global warming (Easterling *et al.*, 1997). This phenomenon is strongly associated with the increase in greenhouse gases.

However, the trend of reduced thermal amplitude is not globally uniform. Desert and arid climate regions, such as parts of the Middle East and North Africa, maintain high thermal amplitudes due to scarce humidity and low vegetation cover (Al-Bakri *et al.*, 2011). This reinforces the importance of regional analyses to avoid imprecise generalizations.

There is a growing consensus in the scientific literature regarding the need for denser and long-term temperature monitoring networks, capable of accurately capturing changes in regional thermal patterns (Williams *et al.*, 2012). Such data are fundamental for effective public policies of adaptation and mitigation.

LIMITATIONS AND CHALLENGES IN HISTORICAL TEMPERATURE VERIFICATION

The reconstruction of historical temperatures is marked by a series of methodological limitations, beginning with the scarcity of reliable instrumental records prior to the 19th century. Paleoclimatic data are largely inferred from climate proxies such as tree rings, corals, sediments, and ice cores, which require complex interpretations and are subject to substantial margins of error (Bradley, 2014). Nevertheless, such evidence forms the foundation for estimating temperature variations across millennia.

Calibrating these indirect records with contemporary instrumental data is a critical step, yet it is not always exact, as natural indicators do not exclusively respond to temperature changes. Additional variables, including precipitation, solar radiation, and local chemical composition, also influence the signals recorded in natural matrices (Jones *et al.*, 2009). Thus, caution must be exercised when attributing causality to such data.

Another significant challenge is the spatially heterogeneous coverage of historical measurements. Regions such as Europe and North America possess more extensive series, while vast areas of Africa, Central Asia, and South America are characterized by temporal and geographic gaps (Hawkins & Sutton, 2016). This disparity impedes a comprehensive global analysis of past thermal patterns.

Even with advances in satellite technology and automatic weather stations in recent decades, maintaining consistent series remains problematic due to changes in instrumentation, station relocation, and land-use alterations (Venema *et al.*, 2012).

Homogenization procedures are applied to address these distortions; however, they do not always fully eliminate uncertainties. The urban heat island effect, which significantly alters temperature records in densely populated areas, represents an additional source of distortion in historical data. Without

appropriate adjustment, such records may indicate artificial warming attributable to urbanization rather than an actual climatic trend (Kalnay & Cai, 2003).

Comparisons between different methods of thermal reconstruction also reveal inconsistencies. While some series show abrupt warming during certain periods, others indicate relative stability, raising questions about methodological sensitivity and the reliability of single interpretations (Moberg *et al.*, 2005). As a result, a plurality of approaches is necessary.

The interpretation of historical data is further affected by publication bias and sampling selection, as many reconstructions prioritize regions with more accessible and consistent data. This leads to the overrepresentation of certain areas to the detriment of others, potentially distorting the understanding of global patterns (Mann *et al.*, 2008).

From a temporal perspective, the resolution of paleoclimatic data varies considerably. While tree rings allow for annual reconstructions, ice cores often provide decadal or even centennial resolution, complicating comparative analyses across different sources (Jones & Mann, 2004). Integrating such data is therefore a technically delicate process.

It is also pertinent to consider the epistemological limits of knowledge concerning ancient climates. Regardless of the sophistication of modern techniques, obtaining absolute certainties about the remote past is unfeasible. Reconstructions offer statistical approximations and should be interpreted as such, without claims of absolute accuracy (Edwards, 2010).

Finally, the major challenge lies in communicating these uncertainties to both the public and policymakers. The complexity of the data and the presence of error margins are often exploited by denialist narratives to discredit climate science, reinforcing the importance of responsible scientific communication (Oreskes & Conway, 2010).

CONCLUSION

A critical analysis of climate change, conducted through an integrative literature review, has enabled a clear distinction between scientifically validated facts and the widely disseminated fallacies prevalent in public and political discourse. While thermal oscillations and natural cycles of climate variability

are intrinsic to the planet's geological history, the current pattern of warming is abrupt, globally consistent, and strongly correlated with human activities, particularly the combustion of fossil fuels. Empirical evidence derived from climate models, paleoclimatic records, and observational data underpins the robustness of the scientific diagnosis, as demonstrated by numerous authors and research institutions.

At the same time, it has become evident that a set of fallacies—many perpetuated by methodological distortions, political interests, or partial interpretations of the data—has contributed to obscuring public debate and undermining the development of sound environmental policies. Misinformation, often disguised as legitimate skepticism, weakens democratic dialogue and impedes evidence-based decision-making. Critiquing these fallacies does not constitute a denial of the scientific complexity involved; rather, it is a defense of the integrity of knowledge and an ethical imperative in the face of the ongoing environmental crisis.

Thermal amplitude in specific regions, long-term climatic cycles, and adjustments to predictive models all warrant continued investigation. However, these uncertainties do not invalidate the foundational knowledge regarding the causes and consequences of climate change. On the contrary, they underscore the necessity to deepen interdisciplinary research and to enhance monitoring and analytical tools. This study demonstrates that climate science, far from being a field of mere ideological contention, is grounded in rigorous methodologies, empirical validation, and a growing international consensus.

The critical insights gleaned from this work also underscore vital avenues for future research. Investigations into the efficacy of diverse strategies for combating climate misinformation are paramount, as are more granular analyses of specific regional impacts to tailor localized adaptation and mitigation efforts. Furthermore, this clear distinction between scientific truths and prevalent fallacies provides an indispensable foundation for robust public policy development and effective environmental education. It empowers policymakers to enact evidence-based legislation and equips citizens with the knowledge necessary to foster collective action and resilience in the face of the ongoing climate crisis, directly linking scientific understanding to tangible societal progress.

Thus, it can be concluded that confronting climate change depends not only on political and technological actions but also on the cultivation of a critical consciousness capable of distinguishing between fact and manipulation. Overcoming fallacies requires scientific literacy, institutional transparency, and a collective commitment to planetary sustainability. It is hoped that this work contributes to that endeavor by offering a reflective, well-founded, and thought-provoking perspective on one of the most urgent issues of our time.

REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T., & WILLIAMS, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>.
- AL-BAKRI, J. T., SULEIMAN, A. S., ABDULLA, F. A., & SHATANAWI, M. R. (2011). Potential impact of climate change on rainfed agriculture in Jordan: A case study of wheat and barley. *Climatic Change*, 109(3), 855–873. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0035-4>.
- ANDEREGG, W. R. L., PRALL, J. W., HAROLD, J., & SCHNEIDER, S. H. (2010). Expert credibility in climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(27), 12107–12109. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003187107>.
- ANDERSON, K., & PETERS, G. (2016). The trouble with negative emissions. *Science*, 354(6309), 182–183. <https://doi.org/10.1126/science.aah4567>.
- BARRY, R. G., & CHORLEY, R. J. (2010). *Atmosphere, weather and climate* (9th ed.). Routledge.
- BEHRENFELD, M. J., O'MALLEY, R. T., SIEGEL, D. A., MCCLAIN, C. R., SARMIENTO, J. L., FELDMAN, G. C., ... BOSS, E. S. (2006). Climate-driven trends in contemporary ocean productivity. *Nature*, 444(7120), 752–755. <https://doi.org/10.1038/nature05317>.
- BELLARD, C., BERTELSMEIER, C., LEADLEY, P., THUILLER, W., & COURCHAMP, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology Letters*, 15(4), 365–377. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x>.
- BRADLEY, R. S. (2014). *Paleoclimatology: Reconstructing climates of the Quaternary* (3rd ed.). Academic Press.
- BROWN, R. D., & ROBINSON, D. A. (2011). Northern Hemisphere spring snow cover variability and change over 1922–2010 including an assessment of uncertainty. *The Cryosphere*, 5(1), 219–229. <https://doi.org/10.5194/tc-5-219-2011>.
- CHURCH, J. A., & WHITE, N. J. (2011). Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surveys in Geophysics*, 32(4–5), 585–602. <https://doi.org/10.1007/s10712-011-9119-1>.

- COOK, J., NUCCITELLI, D., GREEN, S. A., RICHARDSON, M., WINKLER, B., PAINTING, R., ... SKUCE, A. (2013). Quantifying the consensus on anthropogenic global warming in the scientific literature. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024024. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024024>.
- COUMOU, D., & RAHMSTORF, S. (2012). A decade of weather extremes. *Nature Climate Change*, 2(7), 491–496. <https://doi.org/10.1038/nclimate1452>.
- DAI, A., TRENBERTH, K. E., & QIAN, T. (2004). A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming. *Journal of Hydrometeorology*, 5(6), 1117–1130. <https://doi.org/10.1175/JHM-386.1>.
- DIETZ, T., GARDNER, G. T., GILLIGAN, J., STERN, P. C., & VANDENBERGH, M. P. (2009). Household actions can provide a behavioral wedge to rapidly reduce US carbon emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(44), 18452–18456. <https://doi.org/10.1073/pnas.0908738106>.
- EASTERLING, D. R., HORTON, B., JONES, P. D., PETERSON, T. C., KARL, T. R., PARKER, D. E., ... PLUMMER, N. (1997). Maximum and minimum temperature trends for the globe. *Science*, 277(5324), 364–367. <https://doi.org/10.1126/science.277.5324.364>.
- EDWARDS, P. N. (2010). *A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming*. MIT Press.
- EPICA COMMUNITY MEMBERS. (2004). Eight glacial cycles from an Antarctic ice core. *Nature*, 429(6992), 623–628. <https://doi.org/10.1038/nature02599>.
- FAGAN, B. (2000). *The little ice age: How climate made history 1300–1850*. Basic Books.
- FEELY, R. A., SABINE, C. L., HERNANDEZ-AYON, J. M., IANSON, D., & HALES, B. (2004). Evidence for upwelling of corrosive “acidified” water onto the continental shelf. *Science*, 320(5882), 1490–1492. <https://doi.org/10.1126/science.1155676>.
- FLATO, G., MAROTZKE, J., ABIODUN, B., BRACONNOT, P., CHOU, S. C., COLLINS, W., ... RUMMUKAINEN, M. (2013). Evaluation of climate models. In *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (IPCC AR5 WG1 Chapter 9)*. IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>.
- FRANCEY, R. J., ALLISON, C. E., ETHERIDGE, D. M., TRUDINGER, C. M., ENTING, I. G., LEUENBERGER, M., ... STEELE, L. P. (1999). A 1000-year high precision record of $\delta^{13}\text{C}$ in atmospheric CO_2 . *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(2), 170–193. <https://doi.org/10.1034/j1600-0889.1999.t01-1-00005.x>.
- GARDINER, S. M. (2011). *A perfect moral storm: The ethical tragedy of climate change*. Oxford University Press.
- GARREAUD, R. D., VUILLE, M., CLEMENT, A. C., & MILLER, E. (2001). Present-day South American climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194(1-3), 211–234. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00287-6](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00287-6).
- GIANNINI, A., SARAVANAN, R., & CHANG, P. (2003). Oceanic forcing of Sahel rainfall on interannual to interdecadal time scales. *Science*, 302(5647), 1027–1030. <https://doi.org/10.1126/science.1089357>.
- HALLEGATTE, S., VOGT-SCHILB, A., BANGALORE, M., & ROZENBERG, J. (2016). *Unbreakable: Building the resilience of the poor in the face of natural disasters*. World Bank. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1003-9>.
- HANSEN, J., RUEDY, R., SATO, M., & LO, K. (2010). Global surface temperature change. *Reviews of Geophysics*, 48(4). <https://doi.org/10.1029/2010RG000345>.

HAUSFATHER, Z., & PETERS, G. P. (2020). Emissions – the “business as usual” story is misleading. *Nature*, 577(7792), 618–620. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-00177-3>.

HAWKINS, E., & SUTTON, R. (2016). Connecting climate model projections with observations of climate change. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(5), 735–747. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00154.1>.

HOLLAND, M. M., & BITZ, C. M. (2003). Polar amplification of climate change in coupled models. *Climate Dynamics*, 21(3–4), 221–232. <https://doi.org/10.1007/s00382-003-0332-6>.

IMBRIE, J., & IMBRIE, K. P. (1980). Modeling the climatic response to orbital variations. *Science*, 207(4434), 943–953. <https://doi.org/10.1126/science.207.4434.943>.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.

JACOBSON, M. Z., DELUCCHI, M. A., CAMERON, M. A., & FREW, B. A. (2015). Low-cost solution to the grid reliability problem with 100% penetration of intermittent wind, water, and solar for all purposes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(49), 15060–15065. <https://doi.org/10.1073/pnas.1510028112>.

JONES, P. D., & MANN, M. E. (2004). Climate over past millennia. *Reviews of Geophysics*, 42(2). <https://doi.org/10.1029/2003RG000143>.

JONES, P. D., BRIFFA, K. R., OSBORN, T. J., LOUGH, J. M., VAN OMMEN, T. D., VINTHER, B. M., & LUTERBACHER, J. (2009). High-resolution palaeoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *The Holocene*, 19(1), 3–49. <https://doi.org/10.1177/0959683608098952>.

KALNAY, E., & CAI, M. (2003). Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, 423(6939), 528–531. <https://doi.org/10.1038/nature01675>.

LEAN, J. L., & RIND, D. H. (2008). How natural and anthropogenic influences alter global and regional surface temperatures: 1889 to 2006. *Geophysical Research Letters*, 35(18). <https://doi.org/10.1029/2008GL034864>.

LOBELL, D. B., SCHLENKER, W., & COSTA-ROBERTS, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(6042), 616–620. <https://doi.org/10.1126/science.1204531>.

LOVELOCK, J. (2006). *The revenge of Gaia: Earth's climate crisis and the fate of humanity*. Penguin Books.

LÜTHI, D., LE FLOCH, M., BEREITER, B., BLUNIER, T., BARNOLA, J.-M., SIEGENTHALER, U., ... FISCHER, H. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present. *Nature*, 453(7193), 379–382. <https://doi.org/10.1038/nature06949>.

MARCOTT, S. A., SHAKUN, J. D., CLARK, P. U., & MIX, A. C. (2013). A reconstruction of regional and global temperature for the past 11,300 years. *Science*, 339(6124), 1198–1201. <https://doi.org/10.1126/science.1228026>;

MCCRIGHT, A. M., & DUNLAP, R. E. (2011). The politicization of climate change and polarization in the American public's views of global warming, 2001–2010. *The Sociological Quarterly*, 52(2), 155–194. <https://doi.org/10.1111/j.1533-8525.2011.01198.x>.

MCINERNEY, F. A., & WING, S. L. (2011). The Paleocene–Eocene Thermal Maximum: A perturbation of carbon cycle, climate, and biosphere with implications for the future. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 39, 489–516. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-040610-133431>.

- MOBERG, A., SONECHKIN, D. M., HOLMGREN, K., DATSENKO, N. M., & KARLÉN, W. (2005). Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, 433(7026), 613–617. <https://doi.org/10.1038/nature03265>.
- MANN, M. E., ZHANG, Z., RUTHERFORD, S., BRADLEY, R. S., HUGHES, M. K., SHINDELL, D., ... AMMANN, C. (2008). Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(36), 13252–13257. <https://doi.org/10.1073/pnas.0805721105>.
- NASA. (2023). Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov/>.
- OKE, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>.
- ORESQUES, N., & CONWAY, E. M. (2010). *Merchants of doubt: How a handful of scientists obscured the truth on issues from tobacco smoke to global warming*. Bloomsbury Press.
- PARMESAN, C., & YOHE, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421(6918), 37–42. <https://doi.org/10.1038/nature01286>.
- PATZ, J. A., CAMPBELL-LENDRUM, D., HOLLOWAY, T., & FOLEY, J. A. (2005). Impact of regional climate change on human health. *Nature*, 438(7066), 310–317. <https://doi.org/10.1038/nature04188>.
- PETIT, J. R., JOUZEL, J., RAYNAUD, D., BARKOV, N. I., BARNOLA, J. M., BASILE, I., ... STIEVENARD, M. (1999). Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399(6735), 429–436. <https://doi.org/10.1038/20859>.
- RAMANATHAN, V., & CARMICHAEL, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature Geoscience*, 1(4), 221–227. <https://doi.org/10.1038/ngeo156>.
- RATHER, J., & LANGE, S. (2022). Global warming hiatuses—myths, realities and implications for climate policy. *Environmental Research Letters*, 17(1), 014002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac3d1c>.
- RIGNOT, E., VELICOGNA, I., VAN DEN BROEKE, M. R., MONAGHAN, A., & LENAERTS, J. (2011). Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophysical Research Letters*, 38(5). <https://doi.org/10.1029/2011GL046583>.
- ROBERTS, J. T., & PARK, J. (2007). *A climate of injustice: Global inequality, north– south politics, and climate policy*. MIT Press.
- ROBOCK, A. (2000). Volcanic eruptions and climate. *Reviews of Geophysics*, 38(2), 191–219. <https://doi.org/10.1029/1998RG000054>.
- SERREZE, M. C., WALSH, J. E., CHAPIN, F. S., OSTERKAMP, T., DYURGEROV, M., ROMANOVSKY, V., ... BARRY, R. G. (2000). Observational evidence of recent change in the northern high-latitude environment. *Climatic Change*, 46(1–2), 159–207. <https://doi.org/10.1023/A:1005504031923>.
- SHEPHERD, A., IVINS, E. R., RIGNOT, E., SMITH, B., VAN DEN BROEKE, M., VELICOGNA, I., ... THE IMBIE TEAM. (2020). Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018. *Nature*, 579(7798), 233–239. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2>.
- SCREEN, J. A., & SIMMONDS, I. (2010). The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature*, 464(7293), 1334–1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>.

STEFFEN, W., ROCKSTRÖM, J., RICHARDSON, K., LENTON, T. M., FOLKE, C., LIVERMAN, D., ... SCHELLNHUBER, H. J. (2018). Trajectories of the Earth system in the Anthropocene. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(33), 8252– 8259. <https://doi.org/10.1073/pnas.1810141115>.

STERN, N. (2007). *The economics of climate change: The Stern Review*. Cambridge University Press.

TRENBERTH, K. E., & STEPANIAK, D. P. (2001). Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate*, 14(8), 1697–1701. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<1697:IOENEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<1697:IOENEO>2.0.CO;2).

VENEMA, V. K. C., MESTRE, O., AGUILAR, E., AUER, I., GUIJARRO, J., DOMONKOS, P., ... WINKLER, W. (2012). Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past*, 8(1), 89–115. <https://doi.org/10.5194/cp-8-89-2012>.

WMO (World Meteorological Organization). (2022). *State of the Global Climate 2021*. <https://public.wmo.int/en/resources/library/state-of-global-climate-2021>.

ZACHOS, J., PAGANI, M., SLOAN, L., THOMAS, E., & BILLUPS, K. (2001). Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292(5517), 686–693. <https://doi.org/10.1126/science.1059412>.

VEGETAÇÃO ARBÓREA URBANA SOB PRESSÃO CLIMÁTICA: ANÁLISE ESPACIAL EM VIAMÃO-RS (2023-2024)

Lediane Aparecida Nery Maciel

Graduanda em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente

Vagner Souza Machado

Doutorando pelo Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente – SP

Lucas Prado Osco

Docente do Programa de pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional da Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente – SP

Ana Paula Marques Ramos

Docente do Departamento de Cartografia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente

RESUMO

O estado do Rio Grande do Sul tem enfrentado, com frequência crescente, desastres naturais causados por extremos climáticos, como excesso ou escassez de chuvas. Entre 2004 e 2024, foram registradas 5.236 ocorrências no estado, com destaque para o ano de 2023, influenciado pela transição entre os fenômenos La Niña e El Niño. Esses desastres, além de dependerem da intensidade dos fenômenos naturais, estão diretamente ligados à vulnerabilidade socioambiental das áreas atingidas. Nesse contexto, a vegetação arbórea urbana tem sido considerada um importante elemento na mitigação dos impactos hidrológicos, especialmente inundações. Este estudo quantifica as alterações na cobertura arbórea urbana do município de Viamão (RS) entre 2023 e 2024, utilizando imagens multiespectrais da constelação PlanetScope (resolução espacial aproximada de 3 metros)

e técnicas de geoprocessamento. A metodologia adotada baseou-se na vetorização manual da vegetação arbórea a partir da interpretação visual de imagens em composição falsa-cor (RGB864), favorecendo a discriminação espectral entre a vegetação e demais alvos urbanos. Imagens derivadas do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), extraídas das mesmas cenas PlanetScope, bem como dados de alta resolução do Google Earth Pro, foram empregados como insumos auxiliares para aumentar a acurácia da delimitação. Todo o processamento foi conduzido em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os resultados indicam uma redução de aproximadamente 4% na área de cobertura arbórea urbana em Viamão entre 2023 e 2024. Observou-se que essa perda foi mais acentuada em zonas urbanas expandidas e áreas historicamente suscetíveis a alagamentos. A integração entre dados orbitais e geotecnologias revelou-se eficaz para caracterizar espacialmente os aglomerados arbóreos urbanos, fornecendo informações geoespaciais importantes tanto para políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas quanto para o planejamento urbano sustentável.

Palavras-chave: Imagem Multiespectral; Vegetação Arbórea Urbana; Geoprocessamento; Planejamento Ambiental Urbano.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o estado do Rio Grande do Sul tem enfrentado, de forma recorrente, desastres naturais associados a eventos climáticos extremos, ocasionados principalmente pelo excesso ou pela escassez de chuvas. Conforme dados do Sistema Integrado de Informações sobre Desastres (S2ID), entre janeiro de 2004 e junho de 2024, foram registradas 5.236 ocorrências no estado, das quais 41% estão relacionadas ao excesso e 59% à falta de precipitação (Brasil, 2024). Nesse contexto, o ano de 2023 destacou-se pelo elevado número de eventos decorrentes da transição entre os fenômenos La Niña e El Niño, totalizando 389 registros por escassez de chuvas no primeiro semestre e 293 por excesso no segundo semestre.

É importante destacar que um evento climático extremo só é caracterizado como desastre natural quando ocorre em áreas habitadas ou ocupadas por atividades humanas, gerando danos materiais e sociais. Assim, o desastre não decorre exclusivamente da intensidade do fenômeno natural, mas também da vulnerabilidade socioambiental existente no local (Castro, 1998). Entre os principais fatores que contribuem para o agravamento dos impactos, destacam-se o relevo acidentado, solos suscetíveis à erosão, expansão urbana desordenada em áreas de risco e infraestrutura inadequada de drenagem.

Além disso, as mudanças climáticas, impulsionadas por modelos econômicos insustentáveis, desempenham um papel central na intensificação desses eventos.

O recente desastre hidrológico registrado no Brasil, inédito em magnitude e extensão, evidenciou a fragilidade das políticas públicas voltadas à prevenção e mitigação de riscos, uma vez que tanto a população quanto o meio ambiente foram diretamente afetados (Pillar e Overbeck, 2024). Entre os municípios impactados pelas enchentes recentes está Viamão-RS, que constitui a área de estudo deste trabalho.

Esse cenário reforça a necessidade de desenvolver pesquisas que investiguem como diferentes fatores, especialmente a vegetação arbórea, podem contribuir para a redução dos impactos causados por desastres naturais, sobretudo em áreas urbanas densamente povoadas. Nesse sentido, a vegetação arbórea

urbana desempenha um importante papel na mitigação do risco de inundações, ao favorecer a infiltração da água no solo e atuar como uma barreira natural.

Uma ferramenta que vem sendo amplamente utilizada e tem se mostrado eficiente para esse tipo de análise é o sensoriamento remoto. Suas principais vantagens em estudos ambientais são o baixo custo, aplicabilidade, a disponibilidade de dados e a eficácia na obtenção de informações sobre a cobertura do solo (Paranhos Filho *et al.*, 2008).

As imagens de satélite da constelação PlanetScope (3m de resolução espacial) representam uma fonte importante de dados de sensoriamento remoto para o mapeamento em áreas urbanas, pois oferecem até oito bandas espectrais entre o visível e o infravermelho próximo, permitindo a extração de informações detalhadas sobre o tipo e o estado de saúde da vegetação (Planet, 2023). Essas imagens são originalmente adquiridas com resolução radiométrica de 12 bits e, após correções radiométricas, são convertidas para 16 bits, possibilitando a detecção de até 65.536 níveis de intensidade por pixel em cada banda espectral (Planet, 2023).

Assim, a combinação de imagens PlanetScope com a vetorização manual em ambiente de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se mostra como uma estratégia efetiva para mapear áreas de vegetação arbórea em cidades, contribuindo para a geração de dados geoespaciais que apoiem as prefeituras na tomada de decisões rápidas, especialmente em ações relacionadas ao planejamento urbano após grandes eventos climáticos. Com base nessa abordagem, o presente trabalho quantificou a cobertura de vegetação arbórea nos anos de 2023 e 2024, identificando se houve variação percentual entre os dois períodos.

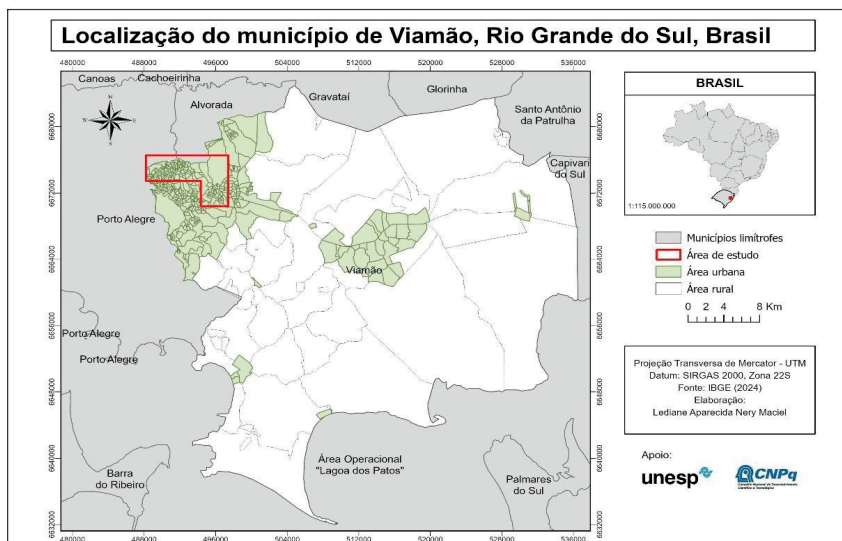
MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em Viamão, o maior município da Região Metropolitana de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul. Viamão tem uma população estimada em aproximadamente 224.122 habitantes e uma área territorial de 1.496,019 km².

A região está inserida no bioma Pampa (IBGE, 2018), cuja vegetação natural é composta predominantemente por campos e manchas florestais (Rambo, 1956). Quanto ao clima, é subtropical úmido, caracterizado por verões quentes e invernos amenos (Peel *et al.*, 2027), com precipitações médias anuais em torno de 1590 mm (Climate Data).(Climate Data).

Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Autores (2025).

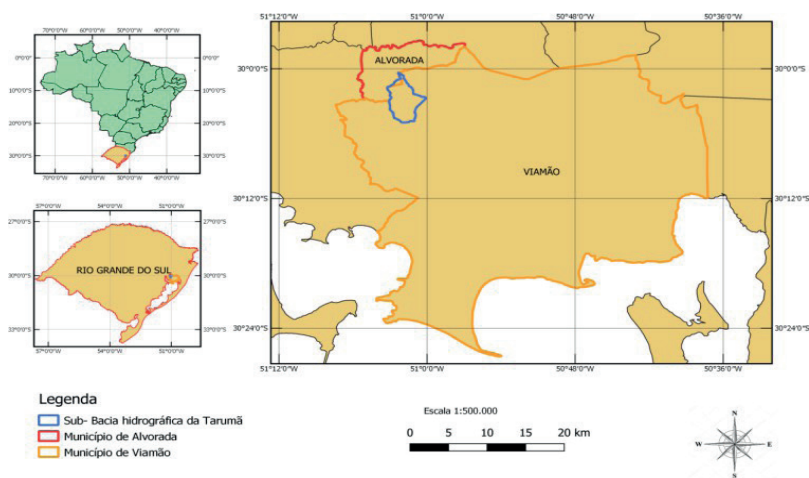
Devido à sua ampla extensão territorial, o município de Viamão é subdividido em oito distritos, sendo eles: Viamão, Águas Claras, Capão da Porteira, Espigão, Itapuã, Passo da Areia, Passo do Sabão e Viamópolis (Viamão, 2024).

A área do município está inserida em três bacias hidrográficas: Lago Guaíba (9%), Gravataí (39%) e Litoral Médio (52%) (Rio Grande do Sul, 2020). Estima-se que cerca de 40% do território municipal é destinado à preservação ambiental, incluindo o Parque Estadual de Itapuã (5.566 hectares), o Parque Saint-Hilaire (908 hectares) e o Refúgio de Vida Silvestre Banhado dos Pachecos (2.500 hectares) (Bones; Barrionuevo, 2023).

A Bacia Hidrográfica do Tarumã, integrante da Bacia do Rio Gravataí, possui aproximadamente 96% de sua extensão territorial situada no município de Viamão, exercendo influência sobre a área de estudo. Conforme definido por Silveira (1997), uma bacia hidrográfica corresponde a uma “área de captação natural de água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório”.

No que se refere às formas e padrões de relevo, o mapa geomorfológico dos municípios de Porto Alegre, Viamão e Alvorada, elaborado por Moura, Hase-nack e Silva (2013), revela que a área estudada e seu entorno são dominados por colinas de topos planos e convexos, caracterizadas como patamares deposicionais de origem flúvio-coluvionar. Devido à presença da bacia hidrográfica, são também identificadas planícies fluviais ao longo dos cursos d'água, e nas regiões mais afastadas desses cursos e fora dos limites da bacia, predominam colinas com interflúvios médios, especialmente nas zonas urbanas de Viamão.

Figura 2. Sub-bacia hidrográfica da Tarumã.

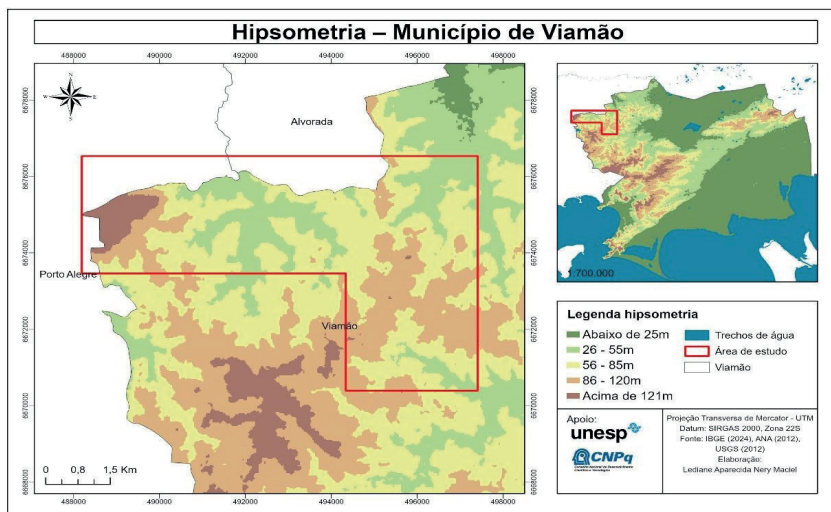


Fonte: Santos (2021).

O padrão de relevo em colinas com topos planos e convexos em Viamão é caracterizado por elevações que variam entre 20 a 100 metros de altitude, distribuídas nas faixas de 20–60 m e 60–100 m. As declividades médias predominantes situam-se nas classes de 5–10% e 10–20%, conforme descrito por

Fujimoto e Schmitz (2004; 2012). Na figura 3 é possível observar a representação das altitudes do relevo da área de estudo.

Figura 3. Hipsometria da área de estudo.



Fonte: Os autores (2025).

Em geral, a Bacia Hidrográfica do Tarumã caracteriza-se como uma bacia rural e urbana situada dentro do perímetro urbano de Viamão. Ademais, mais de 93% da bacia apresenta nível de Fragilidade Emergente classificado entre médio e forte, devido, sobretudo, à predominância de campos manejados, áreas em urbanização e escassa cobertura preservada.

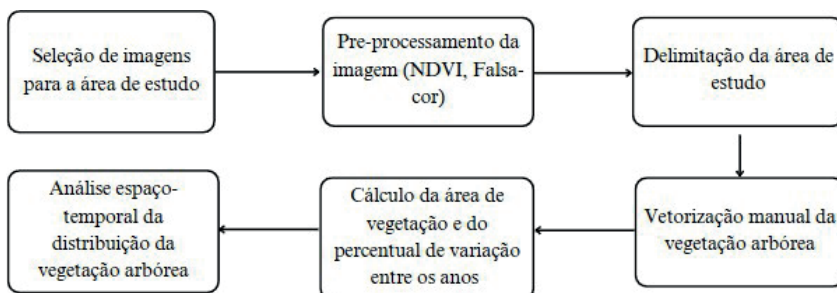
Quanto à Fragilidade Ambiental Potencial, 33,68% da área é classificada como de grau médio e 56,73% como de grau forte. Esses níveis são influenciados principalmente pelas variações topográficas: nas áreas mais elevadas predominam solos argilosos, consolidados e permeáveis, enquanto nas regiões menos inclinadas e planas ocorrem solos hidromórficos, rasos, com baixa drenagem, frequentemente afetados por atividades humanas.

Essa configuração favorece processos erosivos nas encostas e inundações nas planícies saturadas, especialmente nas margens dos arroios, que geralmente apresentam menor adensamento populacional (Santos, 2021).

Procedimento metodológico

As principais etapas do trabalho foram: (i) Seleção das imagens PlanetScope correspondentes à área de estudo para ambos os anos; (ii) vetorização manual das imagens para delimitar a classe 'árvore'; (iii) cálculo de área; e (iv) análise espaço-temporal da distribuição da vegetação arbórea. A Figura 4 apresenta o fluxograma metodológico, com a descrição de cada etapa desenvolvida neste estudo.

Figura 4. Fluxograma metodológico.



Fonte: Autores (2025).

Diante disso, inicialmente, foram selecionadas imagens para as datas de interesse: 28 de agosto de 2023 e 06 de setembro de 2024. Essas datas foram definidas para corresponder a períodos antes e após as enchentes de 2023/2024. As imagens utilizadas foram provenientes da constelação PlanetScope, com resolução espacial de aproximadamente 3 metros.

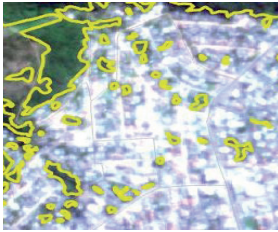
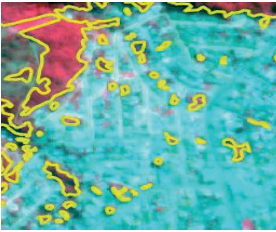
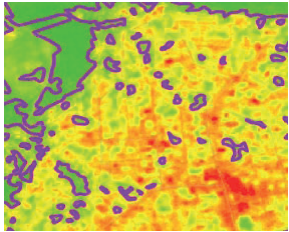
A metodologia adotada baseou-se na vetorização manual da vegetação arbórea a partir da interpretação visual das imagens em composição falsa-cor (RGB864), favorecendo a discriminação espectral entre a vegetação e demais alvos urbanos. Para maior controle das áreas que deveriam ser vetorizadas, utilizou-se recortes (ou patches) de dimensão 256 x 256 pixels por toda a malha urbana, totalizando 37,75 km² a área mapeada do município.

Para garantir maior precisão na vetorização, imagens derivadas do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI), extraídas das mesmas cenas

PlanetScope, bem como dados de alta resolução do Google Earth Pro, foram empregados como dados auxiliares.

A Tabela 1 ilustra algumas áreas de vegetação arbórea (polígonos em amarelo) vetorizadas sobre as imagens PlanetScope representadas em diferentes combinações de bandas espectrais.

Tabela 1. Exemplos de regiões da área em estudo em composições RGB cor natural (642) e falsa-cor (864) para as imagens PlanetScope, bem como o índice NDVI da mesma área. Essas representações permitem identificar em detalhes regiões de vegetação arbórea (polígonos em amarelo) nas áreas urbanizadas de Viamão-RS.

Cor natural – Composição 642	Falsa-cor – Composição 864	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
		

Fonte: Autores (2025).

Em seguida, com o auxílio de ferramentas de geoprocessamento no software de SIG ESRI ArcGIS Pro 3.x, foi calculada a área total de vegetação arbórea vetorizada sobre as imagens PlanetScope em 2023 e 2024. A partir da diferença entre os valores obtidos, foi possível determinar o percentual de variação da cobertura vegetal entre os anos em análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área total considerada na vetorização manual foi de 37,75 km² concentrando-se majoritariamente na região urbana do município de Viamão. Em 2023, foram vetorizados aproximadamente 10,53 km² de vegetação arbórea, enquanto em 2024 esse valor foi de 10,20 km², representando uma diferença de área de 0,389 km² (ou seja, 389.077,33 m²). Essa é uma redução da vegetação arbórea de 3,69% de um ano (2023) para outro (2024).

dentro dessa área, tanto pelo seu elevado índice populacional quanto por integrar diretamente a área de estudo.

A expansão urbana, por sua vez, intensifica o uso dos recursos naturais, resultando em profundas alterações no meio físico. Esse aumento da demanda gera desequilíbrios ambientais, como a modificação dos microclimas locais. A supressão da vegetação arbórea, somada à poluição do ar, à impermeabilização do solo e ao avanço dos empreendimentos imobiliários, tem contribuído significativamente para esses desequilíbrios (OLIVEIRA *et al.*, 2014).

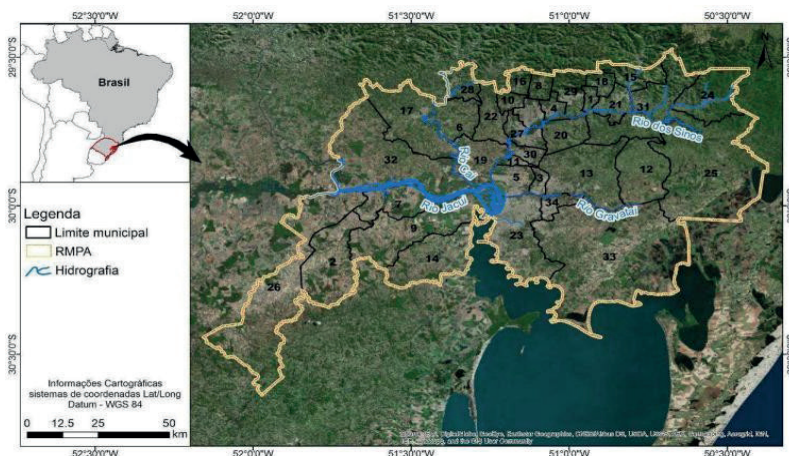
Ademais, Mengue, Vagner *et al.* (2017) apontam que a taxa de crescimento urbano de Viamão entre 1985 e 2015 foi de 22,92%. Embora nas duas primeiras décadas esse crescimento tenha sido pequeno, a última década, de 2010 a 2020, apresentou um aumento considerável. Inicialmente, esse processo de expansão se deu nos municípios mais próximos a Porto Alegre, como Canoas, Cachoeirinha, Alvorada, Sapucaia do Sul e Esteio, expandindo-se posteriormente para locais como Dois Irmãos, Canoas e Viamão.

Dessa forma, Viamão é um dos municípios que apresentou aumento expressivo na urbanização, com destaque para a aglomeração urbana periférica em regiões anteriormente pouco urbanizadas (Mengue, Vagner *et al.*, 2017). Conforme apontado por Silva e Ferreira (2019), em seu estudo utilizando técnicas de classificação supervisionada, também há a confirmação dessa tendência: na Região Metropolitana de Porto Alegre, a classe “Vegetação” sofreu uma redução de 19,8% em seis anos, enquanto a classe “Urbano” aumentou 16,1%, evidenciando o contínuo processo de expansão urbana e, consequentemente, a perda de cobertura vegetal. Ao adotar a vetorização manual, este estudo buscou garantir maior fidedignidade na delimitação da vegetação arbórea urbana, minimizando os erros inerentes aos classificadores automatizados, como os empregados por Silva e Ferreira (2019), cujos resultados estão sujeitos a incertezas decorrentes da confusão espectral entre alvos urbanos e vegetação em ambientes heterogêneos.

A Figura 7 ilustra de forma mais ampla a expansão urbana ocorrida entre os anos de 1985 e 2015 nos municípios que compõem a Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA). Observa-se um adensamento significativo das áreas urbanas, especialmente em torno da capital e em direção aos municípios vizinhos, como é o caso de Viamão. Esse crescimento está associado à melhoria

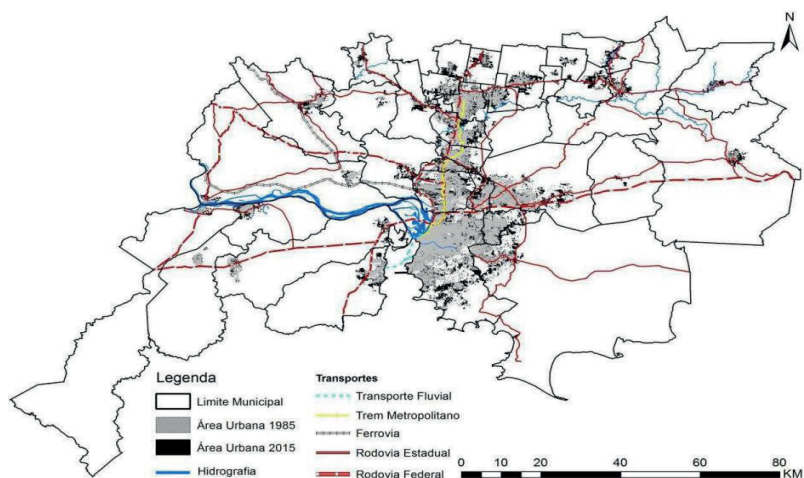
das infraestruturas de transporte, como rodovias e ferrovias, que facilitam o deslocamento da população para os grandes centros urbanos. A expansão das manchas urbanas evidencia o avanço das áreas construídas sobre regiões anteriormente cobertas por vegetação, contribuindo para o quadro de perda da cobertura arbórea identificado neste estudo.

Figura 6. Mapa de localização da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) contendo os municípios de 1. Araricá - 2. Arroio dos Ratos - 3. Cachoeirinha - 4. Campo Bom - 5. Canoas - 6. Capela de Santana - 7. Charqueadas - 8. Dois Irmãos - 9. Eldorado do Sul - 10. Estância Velha - 11. Esteio - 12. Glorinha - 13. Gravataí - 14. Guaíba - 15. Igrejinha - 16. Ivoti - 17. Montenegro - 18. Nova Hartz - 19. Nova Santa Rita - 20. Novo Hamburgo - 21. Parobé - 22. Portão - 23. Porto Alegre - 24. Rolante - 25. Santo Antônio da Patrulha - 26. São Jerônimo - 27. São Leopoldo - 28. São Sebastião do Caí - 29. Sapiranga - 30. Sapucaia do Sul - 31. Taquara - 32. Triunfo - 33. Viamão - 34. Alvorada.



Fonte: Mengue, Vagner et. al (2017).

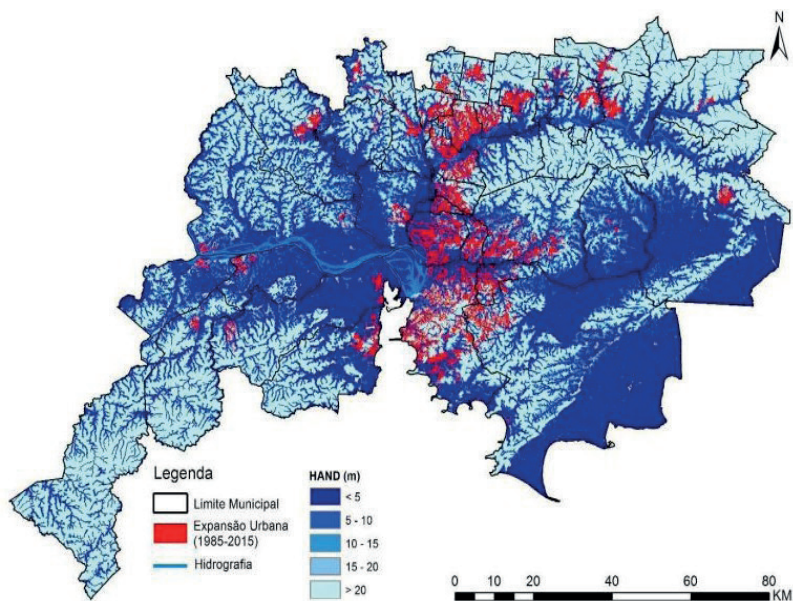
Figura 7. Classificação da área urbana da Região Metropolitana de Porto Alegre (RMPA) utilizando o modelo HAND.



Fonte: Mengue, Vagner et. al (2017).

Ademais, é importante destacar que o incentivo a novas ocupações urbanas em áreas sujeitas a inundações deve ser evitado pelo poder público. Segundo Tucci (2012), o planejamento urbano deve atuar de forma preventiva, buscando mitigar os impactos por meio de ações específicas voltadas a esses espaços. Em geral, as populações de maior poder aquisitivo ocupam áreas seguras, enquanto as camadas mais vulneráveis acabam se estabelecendo em regiões de alto risco, o que acarreta problemas sociais recorrentes a cada nova cheia. Quando as inundações ocorrem com baixa frequência, a população tende a subestimar os riscos, o que resulta em maior investimento e adensamento em áreas inundáveis. Nesses casos, os eventos de cheia podem adquirir proporções catastróficas (Mengue, Vagner et. Al., 2017).

Figura 8. Uso do modelo HAND para gerar áreas suscetíveis a inundação e classificação da expansão urbana entre 1985 a 2015.



Fonte: Mengue, Vagner et. al (2017).

Mengue, Vagner et. al (2017) ainda destaca que através dos dados HAND que:

“Foi possível identificar que mais de 80% de toda expansão urbana nos últimos 30 anos na RMPA está concentrada em alturas de até 20 metros em relação à drenagem mais próxima. Este resultado é preocupante, porque estas áreas são suscetíveis a inundações periódicas causando enormes prejuízos econômicos e de saúde pública para a população que habita nestas áreas. Cabe mencionar que mais de 99,6% da área de expansão urbana da RMPA no período estudado está situada em terrenos com declividades inferiores a 30, que conforme a Lei Federal nº 6.766/79 de parcelamento do Solo é o limite máximo para novos projetos de parcelamento urbano. Portanto, é possível inferir por meio desses resultados que a expansão urbana da RMPA está concentrada em terrenos baixos e com baixas declividades, reforçando a ideia de que o poder público tem que aumentar o controle e planejamento sobre a expansão urbana ocupada em áreas de inundação.”

Diante do exposto, os resultados obtidos apontam para uma tendência clara de urbanização crescente, responsável pela redução da vegetação arbórea em áreas como o município de Viamão. Essas áreas também são suscetíveis a

inundações, que agravam os prejuízos à cobertura vegetal. A dinâmica territorial demanda atenção quanto ao planejamento urbano e à gestão ambiental, com o objetivo de mitigar os impactos da supressão vegetal e promover alternativas sustentáveis de crescimento urbano.

CONCLUSÃO

A análise comparativa da cobertura de vegetação arbórea em Viamão nos anos de 2023 e 2024, realizada por meio de vetorização manual sobre imagens multiespectrais de alta resolução espacial, evidenciou alterações na paisagem urbana após os eventos extremos de inundação. Os resultados indicaram uma redução da cobertura arbórea em áreas mais suscetíveis a alagamentos e submetidas a um acelerado processo de urbanização. Essa diminuição compromete a capacidade de infiltração da água no solo, intensificando o escoamento superficial e, consequentemente, os riscos de novas inundações.

Os dados obtidos ressaltam a importância da vegetação arbórea como infraestrutura fundamental para a recuperação da população frente aos eventos climáticos extremos.

Nesse contexto, o estudo reforça a necessidade de integrar o monitoramento da cobertura vegetal ao planejamento urbano, priorizando ações de preservação e manejo adequado da arborização em áreas vulneráveis. O uso de dados de sensoriamento remoto de alta resolução, aliada à técnicas de geoprocessamento para o mapeamento da vegetação arbórea, configura-se como uma ferramenta estratégica para a produção de informações geoespaciais em alto nível de detalhe. Esses dados são essenciais para subsidiar políticas públicas eficazes no enfrentamento das mudanças climáticas e na construção de cidades mais sustentáveis e adaptadas a desastres ambientais e ao avanço da urbanização.

Agradecimentos

Agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa - Coordenação de Iniciação Científica e Tecnológica da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - Unesp pela concessão da bolsa de Iniciação Científica à primeira autora

desse trabalho, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica da Unesp 2024/2025 - PIBIC, via Edital PROPe 8/2024. Agradecemos à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutorado a um dos autores desse trabalho.

Agradecemos também ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro mediante os processos 305814/2023-0 e 403213/2023-1.

REFERÊNCIAS

ALVES, C. D. *et al.* Análise orientada a objeto no mapeamento de áreas urbanas com imagens Landsat. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Campo Grande, v. 15, p. 120-141, 2009.

BONES, M. L.; BARRIONUEVO, M. A. Diagnóstico socioambiental de Viamão: subsídios para o planejamento urbano e ambiental. Monografia, Porto Alegre: UFRGS, 2023.

BELGIU, M.; DRĂGUȚ, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 114, p. 24-31, 2016.

CASTRO, A. L. C. Glossário de defesa civil: estudo de riscos e medicina de desastres. Brasília: MPO/ Departamento de Defesa Civil, 1998. 283 p.

COSTA, B. P. da. A complexidade do espaço urbano de Porto Alegre. *Boletim Gaúcho de Geografia*, Porto Alegre: AGB, v. 29, n. 1, 2003.

FERNANDES, R. R.; NUNES, G. M.; SILVA, T. S. F. Classificação orientada a objetos aplicada na caracterização da cobertura da terra no Araguaia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 47, n. 9, p. 1225-1233, set. 2012.

FERREIRA, F. C. *et al.* Avanços e desafios na aplicação da modelagem para o mapeamento da dinâmica de mudança de uso do solo em áreas urbanas. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA*, 5., 2017, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 2017.

FUJIMOTO, N. S. V. M.; SCHMITZ, C. M. Mapeamento geomorfológico aplicado a análise ambiental do Município de Viamão – RS. *Ciência e Natura*, Santa Maria, RS, p. 219-233, 2012.

GISLASON, P. O.; BENEDIKTSSON, J. A.; SVEINSSON, J. R. Random forests for land cover classification. *Pattern Recognition Letters*, v. 27, n. 4, p. 294-300, 2006.

GUEDES, A. R. M.; GUIMARÃES, V. L. Sistema de reconhecimento baseado em random forest para caracteres de captchas. Ouro Preto: Departamento de Computação, UFOP, v. 5, 2021.

IBAÑEZ, M. M. Uso de redes neurais nebulosas e florestas aleatórias na classificação de imagens em um projeto de ciência cidadã. Dissertação (Mestrado), São José dos Campos: INPE, 2016.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, n. 33, 2023.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Justiça e cidadania: desafios para a inclusão social. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, n. 4, 2012.

JENSEN, J. R. Remote sensing of the environment: an earth resource perspective. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

MAXWELL, A. E.; WARNER, T. A.; FANG, F. Implementation of machine learning classification in remote sensing: an applied review. *International Journal of Remote Sensing*, v. 39, n. 9, p. 2784-2817, 2018.

MENGUE, V. *et al.* Análise da expansão urbana em áreas suscetíveis à inundação utilizando o modelo HAND: o caso da Região Metropolitana de Porto Alegre, Brasil. *Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)*, n. 12, p. 231-253, dez. 2017. DOI: 10.17127/got/2017.12.010.

MOURA, N. V. S.; HASENACK, H.; SILVA, L. L. Mapa geomorfológico dos municípios de Porto Alegre, Viamão e Alvorada – RS. Porto Alegre: UFRGS – Instituto de Biociências – Centro de Ecologia, 2013. ISBN 978-85-63843-10-4.

PAL, M. Random forest classifier for remote sensing classification. *International Journal of Remote Sensing*, v. 26, n. 1, p. 217-222, 2005.

PARANHOS FILHO, A. C. Sensoriamento remoto ambiental aplicado: introdução às geotecnologias: material didático. Campo Grande: UFMS, 2008. p. 103-140.

PUISSANT, A.; ROUGIER, S.; STUMPF, A. Object-oriented mapping of urban trees using random forest classifiers. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 26, n. 1, p. 235-245, 2014.

SANTOS, G. A. dos. Análise das fragilidades ambientais da Bacia Hidrográfica do Tarumã, municípios de Viamão e Alvorada – RS. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

SILVA, A. C. da; OLIVEIRA, J. F. de. Construindo pontes: a mediação didática lúdica no ensino de ciências. *Ensaio & Ciência*, v. 27, n. 3, p. 1-15, 2023.

SILVA, F. V. da; FERREIRA, R. H. da S. Classificação supervisionada por máxima verossimilhança gaussiana como ferramenta para monitoramento de áreas de vegetação em regiões metropolitanas. *Cippus – Revista de Iniciação Científica, Canoas*, v. 7, n. 2, p. 1-18, 2019.

SILVA, R. A. da; COSTA, L. M. da. A atuação do Ministério Público na promoção da justiça socioambiental. *Revista Jurídica do Ministério Público*, v. 5, n. 2, p. 45-60, 2022.

SILVEIRA, A. L. L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. *In*: TUCCI, C. E. M. (org.). *Hidrologia: ciência e aplicações*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1997. p. 35-51.

VALENTE, P. T. Eventos extremos de precipitação no Rio Grande do Sul no século XX a partir de dados de reanálise e registros históricos. *Dissertação (Mestrado)*, Porto Alegre: UFRGS, 2018.

RAMBO, B. A fisionomia do Rio Grande do Sul: ensaio de monografia natural. Porto Alegre: Livraria Selbach, 1956.

EXTERNALIDADES DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL: UMA ANÁLISE À LUZ DO TEOREMA DE COASE

Rafael Medeiros Hespanhol
Saskatchewan Polytechnic

Alba Regina Azevedo Arana
Universidade do Oeste Paulista (Unoeste)

Maíra Rodrigues Uliana
Universidade do Oeste Paulista (Unoeste)

RESUMO

A expansão acelerada da energia eólica no Brasil revela benefícios climáticos e socioeconômicos, mas também expõe externalidades negativas que desafiam a sustentabilidade dos territórios afetados. Este artigo investiga se tais externalidades podem ser internalizadas por meio de negociações privadas, utilizando o Teorema de Coase como referencial teórico. A partir de uma revisão bibliográfica e de uma análise comparativa com a experiência alemã, constata-se que, apesar da eficácia teórica da solução coasiana, fatores como insegurança fundiária, assimetria de informação e altos custos de transação dificultam acordos puramente privados no contexto brasileiro. A experiência alemã sugere caminhos alternativos, como regulamentação clara das distâncias mínimas, participação financeira obrigatória das comunidades e licenciamento ambiental rigoroso, como estratégias para reduzir conflitos e promover uma melhor distribuição dos benefícios. O artigo conclui que a internalização das externalidades no Brasil depende principalmente do fortalecimento das instituições, visando clareza nos direitos de propriedade, compensação econômica justa e participação pública qualificada.

Palavras-chave: Energia eólica; externalidades; teorema de coase; custos de transação; políticas públicas.

INTRODUÇÃO

A rápida expansão da energia eólica no Brasil, impulsionada por políticas públicas favoráveis e pelo elevado potencial eólico da região Nordeste, posiciona o setor como peça fundamental na transição energética do país. Contudo, esse crescimento acelerado também gera externalidades significativas, como mortalidade de fauna, impactos paisagísticos, conflitos fundiários e prejuízos à saúde das comunidades locais. A gestão inadequada desses efeitos ameaça não apenas a sustentabilidade dos territórios, mas também a legitimidade social dos empreendimentos.

Para analisar se tais externalidades podem ser eficientemente internalizadas por meio de negociações privadas, este artigo utiliza o Teorema de Coase como referencial teórico. Segundo Coase, soluções eficientes podem ser alcançadas desde que os direitos de propriedade sejam claramente definidos e os custos de transação sejam baixos. No entanto, no contexto brasileiro, fatores estruturais como insegurança fundiária, assimetrias informacionais e procedimentos simplificados de licenciamento tornam essas negociações difíceis.

O contraponto internacional analisado neste estudo é a experiência alemã, onde regulamentações claras sobre distâncias mínimas, participação financeira das comunidades locais e rigorosos procedimentos ambientais permitem reduzir conflitos e distribuir benefícios de forma mais equitativa. Tal exemplo oferece importantes lições para identificar possíveis ajustes institucionais no Brasil.

Este artigo objetiva, assim, identificar as principais externalidades da energia eólica no Brasil, discutir os limites práticos da abordagem coasiana no país e propor caminhos institucionais para superá-los. A contribuição está em relacionar teoria econômica e evidências empíricas com recomendações concretas de política pública, auxiliando na transição energética de maneira socialmente justa e ambientalmente sustentável.

EXTERNALIDADES E O TEOREMA DE COASE

O conceito de externalidade é fundamental para entender os impactos ambientais, sociais e econômicos decorrentes da instalação de parques eólicos. Uma externalidade ocorre quando a ação de um agente econômico afeta o

bem-estar de outro sem que esse efeito seja mediado pelo mercado ou sistema de preços (HALTEMAN, 2005). Este fenômeno é claramente observável nas comunidades próximas aos parques eólicos, que frequentemente enfrentam consequências negativas, como ruído, impactos na fauna e alterações na paisagem, sem que esses custos sejam diretamente absorvidos pelos responsáveis pelos empreendimentos.

Neste contexto, o Teorema de Coase oferece uma perspectiva relevante ao sugerir que externalidades podem ser internalizadas por meio de negociações privadas entre as partes envolvidas. Diferentemente da abordagem tradicional pigouviana, que preconiza intervenções estatais para corrigir falhas de mercado, a abordagem coasiana sustenta que, quando os direitos de propriedade são bem definidos e os custos de transação são suficientemente baixos, agentes privados conseguem alcançar acordos eficientes sem necessidade direta de intervenção regulatória (DERYUGINA *et al*, 2021).

Um aspecto importante no pensamento de Coase é a natureza recíproca das externalidades. A operação de turbinas eólicas cria uma situação em que, ou as empresas assumem custos mitigatórios, ou os moradores arcam com adaptações em suas rotinas e modos de vida. Este tipo de situação pode teoricamente ser resolvido por meio de negociação direta entre as partes envolvidas, desde que as condições institucionais permitam (COASE, 1960).

Aplicar o Teorema de Coase ao contexto da energia eólica no Brasil permite compreender como direitos de propriedade pouco claros, insegurança fundiária, e custos de transação elevados tornam inviáveis acordos puramente privados. Portanto, embora seja uma ferramenta conceitual robusta, a abordagem coasiana precisa ser adaptada ao contexto institucional brasileiro, buscando formas intermediárias de internalização das externalidades geradas.

EXTERNALIDADES ASSOCIADAS À ENERGIA EÓLICA NO BRASIL

A expansão da energia eólica no Brasil é um dos processos mais significativos de transição energética na América Latina, com destaque para o Nordeste, região que concentra cerca de 90% da capacidade instalada nacional (DINIZ & COUTO, 2024). O crescimento acelerado da energia eólica tem sido

impulsionado por políticas públicas como o PROINFA, além de investimentos significativos em infraestrutura e tecnologia, resultando em impactos socioeconômicos e ambientais diversos.

Este processo, que contribui para o cumprimento das metas brasileiras de redução de emissões de gases de efeito estufa, também gera um conjunto complexo de externalidades - efeitos colaterais que não são capturados diretamente pelo mercado, podendo ser positivos ou negativos (ZEPEDA-CANCINO & VÁZQUEZ-GARCÍA, 2021). Nesta seção, apresentamos inicialmente as externalidades positivas associadas à energia eólica no Brasil, enfatizando os benefícios socioeconômicos e ambientais documentados na literatura recente.

Externalidades Positivas

As externalidades positivas associadas à expansão da energia eólica no Brasil são amplamente destacadas na literatura, especialmente no contexto do Nordeste, região que concentra a maior parte dos empreendimentos. Esses efeitos benéficos não se limitam à mitigação das emissões de gases de efeito estufa, mas abrangem também importantes aspectos socioeconômicos, como a geração de empregos, a dinamização das economias locais e a promoção de investimentos em infraestrutura. Além disso, a possibilidade de conciliar a instalação de aerogeradores com atividades agropecuárias tradicionais contribui para a diversificação das fontes de renda das comunidades rurais. A seguir, serão apresentadas as principais externalidades positivas identificadas na literatura especializada sobre a energia eólica no Brasil, evidenciando seu papel como vetor de desenvolvimento sustentável e de apoio à transição energética na região.

Um dos principais benefícios da energia eólica é sua contribuição para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEEs), alinhando-se aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, como o Acordo de Paris e as metas de redução de emissões até 2030 (YANAGUIZAWA LUCENA & AZEVEDO LUCENA, 2019). Por ser uma fonte renovável e de baixo carbono, a energia eólica substitui gradativamente fontes fósseis na matriz energética, mitigando impactos ambientais relacionados à mudança climática.

Estudos demonstram que o Brasil possui um dos maiores potenciais eólicos do mundo, com estimativas superiores a 145 GW, sendo que a exploração

dessa fonte contribui diretamente para a diversificação da matriz energética e a segurança energética nacional (PEREIRA *et al.*, 2013). Além disso, a complementaridade entre recursos hídricos e eólicos, especialmente no Nordeste, possibilita uma gestão mais eficiente do sistema elétrico, reduzindo a vulnerabilidade às secas e às variações sazonais (LUCENA *et al.*, 2010).

Outro benefício relevante da energia eólica no Brasil é a geração de renda para proprietários rurais através do arrendamento de terras para instalação de aerogeradores. Esse mecanismo permite a manutenção das atividades agropecuárias, uma vez que as torres ocupam apenas uma pequena fração do terreno, compatibilizando produção agrícola com geração de energia (YANAGUIZAWA LUCENA & AZEVEDO LUCENA, 2019).

Estudos regionais indicam que essa renda tem contribuído significativamente para o incremento da receita de famílias no semiárido nordestino, muitas vezes afetadas por vulnerabilidades socioeconômicas históricas (ZEPEDA-CANCINO & VÁZQUEZ-GARCÍA, 2021). O arrendamento, portanto, representa uma forma de integração econômica entre o setor energético e as comunidades locais, potencializando efeitos positivos sobre o desenvolvimento regional.

A instalação e operação de parques eólicos no Brasil têm impulsionado a geração de empregos diretos e indiretos, promovendo desenvolvimento econômico em regiões tradicionalmente desfavorecidas. Simas e Pacca (2013) estimam que o crescimento da energia eólica no Brasil entre 2012 e 2016 geraria aproximadamente 90 mil empregos, especialmente nas etapas de construção e operação, que possuem alto potencial de absorção de mão de obra local.

Adicionalmente, análises utilizando modelos de equilíbrio geral computável indicam que, sem os investimentos realizados em energia eólica, o Brasil teria enfrentado perdas econômicas significativas, especialmente no Nordeste, onde a geração eólica contribuiu para mitigar desigualdades regionais (DINIZ & COUTO, 2024). A energia eólica, portanto, desempenha papel estratégico como vetor de crescimento regional e inclusão social.

A expansão da indústria eólica também tem estimulado o desenvolvimento tecnológico e a criação de uma cadeia produtiva nacional. Políticas como o PROINFA estabeleceram exigências de conteúdo local, impulsionando a instalação de fábricas de componentes como torres, pás e aerogeradores em diversas regiões do país (DINIZ & COUTO, 2024).

Além disso, a infraestrutura necessária para implantação dos parques, como estradas, redes elétricas e subestações, acaba por beneficiar as comunidades locais, promovendo a integração territorial e facilitando o acesso a serviços e mercados. Esses efeitos positivos sobre a infraestrutura são frequentemente destacados como uma das externalidades benéficas mais importantes da energia eólica, contribuindo para o desenvolvimento sustentável das regiões de implantação (ZEPEDA-CANCINO & VÁZQUEZ-GARCÍA, 2021).

Embora a expansão da energia eólica traga benefícios relevantes ao Brasil, como geração de emprego, redução de emissões e dinamização econômica regional, é essencial reconhecer que esses mesmos fatores aceleradores também desencadeiam externalidades negativas importantes, discutidas detalhadamente a seguir.

Externalidades Negativas

Apesar de seus reconhecidos benefícios ambientais e socioeconômicos, a expansão da energia eólica no Brasil, particularmente no Nordeste, está associada a uma série de externalidades negativas que impactam ecossistemas, populações humanas e modos de vida tradicionais. Tais efeitos, embora frequentemente subestimados, são fundamentais para a compreensão crítica da implantação de parques eólicos na região.

Um dos impactos mais documentados da instalação de parques eólicos refere-se à mortalidade de animais, especialmente morcegos e aves, por colisão com as pás dos aerogeradores. No Brasil, onde existem aproximadamente 180 espécies de morcegos, a interação com turbinas é considerada um dos dez principais riscos para a conservação desses animais. A baixa taxa reprodutiva dos morcegos e sua longevidade tornam as populações particularmente vulneráveis a declínios causados por esse tipo de mortalidade (BERNARD *et al.*, 2014). Além disso, a ausência de estudos pré e pós-instalação em muitas áreas dificulta a avaliação adequada dos impactos, sugerindo uma necessidade urgente de aperfeiçoamento dos processos de licenciamento ambiental.

Em habitats como a Caatinga, também foram observadas alterações comportamentais significativas em espécies de anuros devido ao ruído gerado pelos aerogeradores. De Oliveira *et al.* (2025) demonstraram que o ruído de

turbinas afeta negativamente os parâmetros acústicos de comunicação de três espécies de sapos, comprometendo aspectos críticos de sua reprodução, como atração de parceiros e defesa de território. Este impacto é particularmente grave porque as áreas de maior potencial eólico coincidem frequentemente com zonas prioritárias de conservação da biodiversidade.

Embora frequentemente considerada uma fonte de energia de baixo impacto territorial, a implantação de parques eólicos no Brasil tem resultado em transformações significativas no uso da terra. Turkovska *et al.* (2021) demonstraram que, em contraste com a Europa, 62% das áreas ocupadas por parques eólicos no Brasil estavam cobertas por vegetação nativa e areias costeiras. Cerca de 3,2% das áreas analisadas foram convertidas de vegetação nativa para uso antrópico, contribuindo para processos de fragmentação de habitats, erosão do solo e aumento do risco de desertificação, especialmente em ecossistemas frágeis como a Caatinga e zonas costeiras.

Além disso, a expansão da infraestrutura associada, como estradas, linhas de transmissão e fundações de aerogeradores, resulta na supressão de vegetação, compactação do solo e alteração de regimes hidrológicos, ampliando os efeitos negativos sobre os ecossistemas locais (TURKOVSKA *et al.*, 2021; ARAÚJO *et al.*, 2020).

A implantação de parques eólicos tem gerado processos de exclusão social e conflitos territoriais. Em diversos casos no Nordeste, comunidades tradicionais têm relatado processos de expropriação indireta de terras, principalmente por meio de contratos de arrendamento opacos e pela desestruturação de práticas culturais e produtivas locais (GORAYEB *et al.*, 2018). A rápida expansão dos parques frequentemente ocorre mediante licenciamentos simplificados, que não consideram adequadamente os impactos socioambientais cumulativos e tampouco garantem participação efetiva das comunidades afetadas (ARAÚJO *et al.*, 2020).

A percepção de injustiça é agravada quando os benefícios econômicos são concentrados nas empresas e em poucos proprietários de terra, enquanto os custos sociais e ambientais recaem sobre as comunidades locais, que frequentemente enfrentam riscos à saúde associados ao ruído e à poluição visual, além da perda de acesso a recursos naturais essenciais (SOBRINHO JUNIOR *et al.*, 2022).

O ruído gerado pelas turbinas eólicas, além de impactar a fauna, também afeta a saúde humana. Estudos relatam casos de insônia, ansiedade e perda auditiva em comunidades próximas aos parques (DA SILVA & GALVÃO, 2022). Em contextos de vulnerabilidade socioeconômica, tais efeitos são potencializados pela ausência de medidas mitigatórias eficazes e pela falta de consulta prévia às populações locais.

Além disso, a poluição visual decorrente da presença massiva de aerogeradores transforma a paisagem, afetando negativamente o bem-estar psicológico e potencialmente reduzindo o valor cultural e turístico de determinadas regiões (ARAÚJO *et al.*, 2020).

A QUESTÃO INSTITUCIONAL NO BRASIL

Limites da aplicação do Teorema de Coase

Embora o Teorema de Coase ofereça uma estrutura teórica importante para a análise das externalidades associadas à energia eólica, sua aplicação prática no contexto brasileiro enfrenta limites institucionais significativos. A ideia central do teorema: de que agentes podem negociar eficientemente a internalização das externalidades desde que os direitos de propriedade estejam bem definidos e os custos de transação sejam baixos; esbarra em uma série de barreiras estruturais observadas no Brasil, especialmente na região Nordeste.

Em primeiro lugar, a insegurança fundiária é um obstáculo recorrente. Muitas comunidades afetadas pela implantação de parques eólicos vivem em situação de posse informal ou de direitos precários sobre suas terras, o que compromete a possibilidade de estabelecer contratos claros e legítimos com as empresas desenvolvedoras de energia (FRATE *et al.*, 2019). Essa situação dificulta a negociação direta entre empresas e comunidades, elemento essencial para que o mecanismo coasiano funcione.

Além disso, observa-se a presença de custos de transação elevados, decorrentes de processos burocráticos complexos, falta de informação e assimetrias de poder entre empresas e comunidades locais, frequentemente agravadas por contratos de arrendamento firmados sem a devida compreensão

por parte dos moradores sobre seus direitos e deveres (ARAÚJO *et al.*, 2020; GORAYEB *et al.*, 2018).

O licenciamento ambiental simplificado, característico do modelo brasileiro, também limita a aplicação efetiva do Teorema de Coase. Em muitos casos, os estudos de impacto ambiental são insuficientes ou realizados de maneira a minimizar os efeitos negativos das instalações eólicas, inviabilizando uma avaliação transparente e participativa dos danos potenciais (GORAYEB *et al.*, 2018). A ausência de mecanismos eficazes de consulta prévia e informada, especialmente para comunidades tradicionais, impede a constituição de processos negociados que considerem adequadamente os interesses dos diversos stakeholders envolvidos.

Outro fator relevante é a concentração de poder econômico e político nas mãos de grandes empresas e elites locais, que frequentemente instrumentalizam os processos de autorização e instalação dos parques eólicos, marginalizando as comunidades afetadas e fragilizando ainda mais suas possibilidades de negociação (GORAYEB *et al.*, 2018).

Portanto, embora o Teorema de Coase seja útil como instrumento analítico para compreender as externalidades associadas à energia eólica, sua aplicação prática no Brasil é severamente limitada por um conjunto de fatores institucionais, jurídicos e sociais que aumentam os custos de transação e restringem a efetividade das negociações privadas.

Marco regulatório atual

O marco regulatório da energia eólica no Brasil avançou significativamente, porém ainda apresenta fragilidades importantes no que diz respeito à proteção socioambiental e mitigação das externalidades negativas. A Resolução CONAMA nº 462, vigente desde 2014, introduziu critérios simplificados para o licenciamento ambiental de parques eólicos, especialmente fora de áreas sensíveis, como unidades de conservação ou terras indígenas (BRASIL, 2014). Contudo, estudos apontam que essa simplificação frequentemente resulta na subestimação dos impactos ambientais e sociais, principalmente sobre comunidades vulneráveis no Nordeste (ARAÚJO *et al.*, 2020; GORAYEB *et al.*, 2018).

Outro problema é a falta de uma legislação federal clara sobre distâncias mínimas obrigatórias entre aerogeradores e residências. Embora algumas normas estaduais e municipais existam, há uma ausência de regulamentação uniforme em nível nacional. Em contraste, países como a Alemanha estabelecem limites claros (entre 500 a 1000 metros), reduzindo conflitos sociais e melhorando a aceitação pública dos projetos (ZEPEDA-CANCINO & VÁZQUEZ-GARCÍA, 2021). No Brasil, prevalece apenas uma recomendação informal de 400 metros utilizada pontualmente em alguns estados (FRATE *et al.*, 2019).

Além disso, há deficiências graves nos mecanismos de participação pública e consulta prévia, como preconiza a Convenção 169 da OIT, ratificada pelo Brasil. Frequentemente, as comunidades locais, especialmente povos tradicionais e pequenos agricultores, não são adequadamente consultadas ou envolvidas nas decisões sobre os empreendimentos, resultando em conflitos territoriais e baixa legitimidade social (ARAÚJO *et al.*, 2020; FRATE *et al.*, 2019).

Por fim, políticas de incentivo à energia eólica, como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), têm priorizado o aumento da capacidade instalada sem incorporar salvaguardas socioambientais suficientemente robustas ou mecanismos efetivos de participação local (YANAGUIZAWA LUCENA & AZEVEDO LUCENA, 2019). Assim, embora o marco regulatório brasileiro tenha favorecido a expansão rápida da energia eólica, sua eficácia para internalizar externalidades negativas e assegurar uma transição energética socialmente justa e ambientalmente sustentável ainda precisa ser aprimorada.

O CASO DA ALEMANHA

Na Alemanha, a regulação da energia eólica é caracterizada por uma abordagem descentralizada, com legislações estaduais (Landesbauordnungen) determinando as distâncias mínimas entre turbinas e áreas residenciais. Em muitos estados, o afastamento recomendado ou exigido varia entre 500 metros e 1.000 metros, dependendo da densidade populacional e das características territoriais (BUNDESTAG, 2021). O governo federal, por meio do Klimaschutzprogramm 2030, propôs uma distância padrão de 1.000 metros, buscando aumentar a aceitação social dos empreendimentos (DIW Berlin, 2019).

Entretanto, algumas regiões adotaram medidas ainda mais restritivas, como o estado da Baviera, que desde 2014 aplica a chamada regra 10H, exigindo uma distância equivalente a dez vezes a altura total da turbina em relação à residência mais próxima. Para aerogeradores modernos, com cerca de 200 metros de altura, isso implica em afastamentos mínimos de 2.000 metros (BAYERISCHE BAUORDNUNG, 2022). Estudos indicam que a aplicação rigorosa dessa regra levou a uma redução de até 90% nas novas autorizações de parques eólicos na Baviera (DIW Berlin, 2019).

Além das distâncias mínimas, a Alemanha se destaca pelos mecanismos de participação financeira das comunidades locais. Desde 2016, o estado de Mecklenburg-Vorpommern implementou a primeira lei obrigatória de participação cidadã (Bürger- und Gemeindenbeteiligungsgesetz), que obriga os empreendedores a oferecerem até 20% das cotas societárias de novos projetos eólicos aos moradores e municípios situados num raio de 5 km do empreendimento (LEKA MV, 2023). Caso os residentes não desejem participar, o operador deve oferecer alternativas compensatórias, como produtos financeiros ou pagamentos anuais aos municípios (LEKA MV, 2023).

Em 2022, o Tribunal Constitucional Alemão considerou tais legislações constitucionais, validando o entendimento de que a participação financeira local fortalece a aceitação social e justifica a intervenção estatal nos modelos de negócio dos investidores (ZEIT ONLINE, 2022). Como resultado, outros estados alemães passaram a implementar ou discutir legislações semelhantes, promovendo a distribuição de benefícios econômicos das usinas eólicas com as comunidades anfitriãs (RSW BECK AKTUELL, 2023).

No que se refere ao licenciamento ambiental, a instalação de parques eólicos na Alemanha está sujeita à Lei Federal de Controle de Emissões (Bundes-Immissionsschutzgesetz), que inclui normas de proteção contra ruído, segurança estrutural e compatibilidade territorial (GFN UMWELTPLANUNG, s.d.). A obrigatoriedade de realizar uma Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) depende do porte do projeto. Parques com 20 ou mais turbinas requerem AIA completa, enquanto aqueles entre 3 e 19 turbinas passam por uma triagem para avaliar a necessidade de avaliação aprofundada (GFN UMWELTPLANUNG, s.d.).

Importante destacar que a legislação alemã exige a consideração de impactos cumulativos, ou seja, a avaliação conjunta dos efeitos ambientais

de diversos empreendimentos próximos, especialmente em relação à fauna e à paisagem (GFN Umweltplanung, s.d.). Além disso, projetos sujeitos a AIA formal devem garantir transparência e participação pública, com divulgação dos documentos técnicos e possibilidade de consulta e objeção por parte dos cidadãos (GFN UMWELTPLANUNG, s.d.). Esse requisito decorre da adesão da Alemanha à Convenção de Aarhus, que assegura o direito à participação pública nos processos decisórios ambientais.

Recentemente, com a aprovação da lei Wind-an-Land-Gesetz (2022), a Alemanha buscou acelerar o licenciamento e aumentar a disponibilidade de áreas para energia eólica, enquanto mantém as exigências ambientais e de participação pública (UBA, 2019).

A experiência alemã demonstra a importância de combinar distâncias mínimas regulamentadas, mecanismos obrigatórios de participação financeira e processos rigorosos de licenciamento ambiental como estratégias para promover a aceitação social e a sustentabilidade dos empreendimentos eólicos.

INTERNALIZAÇÃO DAS EXTERNALIDADES EM USINAS EÓLICAS À LUZ DO TEOREMA DE COASE

A análise das externalidades associadas à energia eólica no Brasil, contrastada com a experiência internacional e fundamentada no Teorema de Coase, permite avançar em algumas proposições estratégicas para a gestão eficiente e socialmente justa dessas externalidades.

Como discutido anteriormente, embora o Teorema de Coase ofereça um modelo elegante para a internalização via negociação direta entre agentes, sua aplicação prática requer três condições fundamentais: direitos de propriedade bem definidos, baixos custos de transação e simetria de informação e poder. No contexto brasileiro, a insegurança fundiária, os custos de transação elevados e a profunda assimetria entre empresas e comunidades inviabilizam, na maioria dos casos, soluções exclusivamente privadas.

A experiência alemã, analisada na seção anterior, demonstra que mesmo países com instituições sólidas recorrem à intervenção pública para criar um ambiente favorável a negociações mais eficientes. Elementos como a definição clara de distâncias mínimas entre turbinas e residências, mecanismos

obrigatórios de participação financeira das comunidades e processos robustos de licenciamento ambiental funcionam como instrumentos institucionais que reduzem custos de transação e distribuem melhor os benefícios e impactos.

Com base nessas lições, propõe-se que, para a efetiva internalização das externalidades da energia eólica no Brasil, a teoria coasiana seja reinterpretada não como uma defesa da ausência do Estado, mas como uma justificativa para o fortalecimento institucional que viabilize acordos mais justos e eficientes.

Primeiramente, recomenda-se a criação de uma legislação nacional que estabeleça distâncias mínimas obrigatórias entre aerogeradores e residências, levando em conta as especificidades territoriais e populacionais do país. Tal medida reduziria conflitos socioambientais, protegeria a saúde pública e proporcionaria segurança jurídica aos empreendedores.

Em segundo lugar, sugere-se a adoção de mecanismos de participação financeira obrigatória das comunidades locais nos empreendimentos eólicos, inspirados em modelos internacionais. Isso poderia ocorrer por meio da oferta de cotas societárias, constituição de fundos comunitários ou repasses anuais vinculados à receita do projeto. Tais mecanismos promovem maior aceitação social, redistribuem os benefícios econômicos e reduzem o desequilíbrio de poder nas negociações.

Adicionalmente, recomenda-se o fortalecimento dos processos de licenciamento ambiental, abandonando gradativamente os procedimentos simplificados em favor de avaliações mais robustas e participativas, especialmente em áreas de elevada sensibilidade socioambiental. A obrigatoriedade da Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) deve considerar não apenas o porte do empreendimento, mas também sua localização e os efeitos cumulativos sobre comunidades e ecossistemas.

Por fim, propõe-se a criação de instâncias mediadoras especializadas para facilitar as negociações relativas às externalidades dos empreendimentos eólicos. Esses órgãos poderiam funcionar como conselhos ou câmaras deliberativas, compostos por representantes do poder público, empreendedores, comunidades locais e sociedade civil organizada, reunindo-se periodicamente para deliberar sobre compensações, medidas mitigatórias e alternativas de participação financeira. A experiência brasileira com conselhos gestores ambientais e comitês de bacias hidrográficas sugere que esse modelo pode ser

adaptado para criar “arenas coasianas” institucionalizadas, reduzindo custos de transação, promovendo transparência e assegurando uma distribuição mais justa dos benefícios e impactos.

A internalização das externalidades da energia eólica no Brasil exige o fortalecimento das instituições públicas como condição necessária para que as negociações privadas se tornem viáveis e eficazes, promovendo uma transição energética que concilie expansão renovável, proteção ambiental e justiça socioespacial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo analisou as externalidades da energia eólica no Brasil por meio do referencial teórico do Teorema de Coase, identificando benefícios como redução de emissões, geração de empregos e desenvolvimento regional, e impactos negativos relevantes, como mortalidade de fauna, conflitos fundiários e problemas de saúde. Observou-se que insegurança fundiária, altos custos de transação e assimetria de poder limitam significativamente a internalização dessas externalidades por negociações privadas, exigindo intervenções institucionais.

Inspirando-se na experiência alemã, recomenda-se que o Brasil defina nacionalmente distâncias mínimas entre aerogeradores e residências, estabeleça mecanismos de participação financeira obrigatória das comunidades locais e fortaleça processos de licenciamento ambiental com avaliações mais robustas e participativas. A criação de instâncias mediadoras especializadas também pode contribuir significativamente para negociações mais equitativas.

Como limitações, destaca-se que a análise foi baseada em literatura secundária e estudos comparativos limitados, sugerindo-se pesquisas futuras com dados primários, medições empíricas das externalidades e avaliações econométricas sobre a eficácia dos mecanismos propostos. Tais investigações permitirão avançar em direção a uma transição energética não apenas ambientalmente sustentável, mas também socialmente justa.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, J. C. H. *et al.* Sustainability challenges of wind power deployment in coastal Ceará State, Brazil. **Sustainability**, Basel, CH, v. 12, n. 5562, p. 1–18, jul./ago. 2020.
- BAYERISCHE BAUORDNUNG. BayBO – Bayerische Bauordnung. Art. 82, com alterações da Lei de 27/10/2022 (Regra 10H). **Bayern**, Munique, DE, jul./out. 2022.
- BERNARD, E. *et al.* Blown in the wind: bats and wind farms in Brazil. **Natureza & Conservação**, São Paulo, SP, v. 12, n. 2, p. 106–111, jul./dez. 2014.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 462, de 24 de julho de 2014. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**, Brasília, DF, jul. 2014.
- BUNDESTAG. Rechtliche Einzelfragen des Mindestabstands von Windenergieanlagen zu Wohngebieten. **Wissenschaftliche Dienste – Deutscher Bundestag**, Berlin, DE, v. WD 7 - 3000 - 140/20, p. 1–28, dez. 2021.
- COASE, R. H. The problem of social cost. **Journal of Law and Economics**, Chicago, IL, v. 3, p. 1–44, out./dez. 1960.
- DERYUGINA, T. *et al.* Environmental applications of the Coase Theorem. **Environmental Science & Policy**, Amsterdam, NL, v. 120, p. 81–88, jan./fev. 2021.
- DE OLIVEIRA, R. F. *et al.* Wind farm noise negatively impacts the calling behavior of three frogs in Caatinga dry forests. **PLoS ONE**, San Francisco, CA, v. 20, n. 3, e0318517, mar./abr. 2025.
- DIW BERLIN. Strikte Mindestabstände bremsen den Ausbau der Windenergie. **Wochenbericht**, Berlin, DE, v. 48, p. 881–889, nov./dez. 2019.
- DINIZ, T. B.; COUTO, L. C. Achieving a high share of non-hydro renewable integration in Brazil through wind power: Regional growth and employment effects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, NL, v. 197, p. 114367, jan./fev. 2024.
- FRATE, C. A. *et al.* Procedural and distributive justice inform subjectivity regarding wind power: A case from Rio Grande do Norte, Brazil. **Energy Policy**, Amsterdam, NL, v. 132, p. 185–195, abr./mai. 2019.
- GFN UMWELTPLANUNG. UVP-Gesetz – Windkraftanlagen. Resumo das regras de UVP para energia eólica na Alemanha. **GFN Umweltplanung**, DE, s.d.
- GORAYEB, A. *et al.* Wind power gone bad: Critiquing wind power planning processes in northeastern Brazil. **Energy Research & Social Science**, Amsterdam, NL, v. 40, p. 82–88, mar./abr. 2018.
- HALTEMAN, J. Externalities and the Coase theorem: A diagrammatic presentation. **The Journal of Economic Education**, Abingdon, UK, v. 36, n. 4, p. 385–390, out./dez. 2005.
- LEKA MV. Bürger- und Gemeindeneteiligungsgesetz M-V. **Landesenergie- und Klimaschutzagentur Mecklenburg-Vorpommern**, Schwerin, DE, 2023.
- LUCENA, A. F. P. DE *et al.* The vulnerability of wind power to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, Amsterdam, NL, v. 35, p. 904–912, abr./mai. 2010.
- PEREIRA, E. B. *et al.* The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, Amsterdam, NL, v. 49, p. 107–110, jan./fev. 2013.

RSW BECK AKTUELL. Kommunen und Bürger sollen stärker von Windrädern profitieren. **RSW Beck Aktuell**, Berlim, DE, jan. 2023.

SOBRINHO JUNIOR, M. F. *et al.* Perception of environmental impacts of wind farms in agricultural areas of Northeast Brazil. **Energies**, Basel, CH, v. 15, p. 101, jan./fev. 2022.

DA SILVA, V. P.; GALVÃO, M. L. M. Onshore wind power generation and sustainability challenges in Northeast Brazil: A quick scoping review. **Wind**, Basel, CH, v. 2, n. 2, p. 192–209, jul./dez. 2022.

SIMAS, M.; PACCA, S. Socio-economic Benefits of Wind Power in Brazil. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, Zagreb, HR, v. 1, n. 1, p. 27–40, jan./jun. 2013.

TURKOVSKA, O. *et al.* Land-use impacts of Brazilian wind power expansion. **Environmental Research Letters**, Bristol, UK, v. 16, 024010, jan./fev. 2021.

UBA – UMWELTBUNDESAMT. Mindestabstände bei Windenergieanlagen schaden der Energiewende. **Umweltbundesamt**, Dessau, DE, set. 2019.

YANAGUIZAWA LUCENA, J. A.; AZEVEDO LUCENA, K. Â. Wind energy in Brazil: an overview and perspectives under the triple bottom line. **Clean Energy**, Oxford, UK, v. 3, n. 2, p. 69–84, jul./dez. 2019.

ZEIT ONLINE. Verpflichtende Bürgerbeteiligung bei Windparks ist verfassungsgemäß. **ZEIT Online**, Hamburgo, DE, ago. 2022.

ZEPEDA-CANCINO, R.-M.; VÁZQUEZ-GARCÍA, V. Potencial social y ambiental de la industria eólica para una transición energética en América Latina. **Letras Verdes**, Quito, EC, n. 30, p. 66–85, jul./dez. 2021.

A SYSTEMATIC REVIEW OVER MACHINE AND DEEP LEARNING APPLICATIONS ON REMOTE SENSING FOREST CARBON MONITORING

Alessandra de Oliveira Alves Correia
Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Vagner Souza Machado
Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Ana Paula Marques Ramos
Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Lucas Prado Osco
Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)



ABSTRACT

Objective: Forest carbon monitoring has become critical for climate mitigation under international agreements, driving demand for accurate remote sensing-based assessment methods. This systematic review analyzes machine learning and deep learning applications to forest carbon monitoring using remote sensing data. Following systematic methodology, 59 studies were selected from Scopus, Web of Science, Google Scholar, and SciELO databases using structured Boolean search strategies. Results reveal exponential publication growth from 2019 onwards, correlating with the Paris Agreement implementation. Geographic distribution shows concentration in Asia, Brazil, and North America. Random Forest algorithms dominate all sensor types, followed by Support Vector Machine approaches. Local-scale studies using multispectral sensors represent the most frequent combination, reflecting validation requirements against forest inventories. Critical limitations include limited open-access carbon forest datasets, with only two freely available platforms identified. The trade-off between data accessibility and spatial resolution constrains operational implementation, while local-scale focus highlights challenges in scaling to global monitoring requirements. Machine learning techniques, particularly Random Forest, have matured into robust methodologies for forest carbon assessment, yet significant gaps remain in data standardization and global-scale application. Enhanced international collaboration and standardized data products are essential for bridging local research capabilities with global climate monitoring requirements.

Keywords: Literature review; carbon monitoring; machine learning; Deep Learning.

INTRODUCTION

Accurate forest carbon monitoring has become essential for climate mitigation strategies, as forests contribute approximately 11% of global CO₂ emissions through deforestation while simultaneously acting as important carbon sinks, capable of storing 861 ± 66 GtC globally. Traditional ground-based monitoring approaches face significant limitations in spatial coverage, temporal frequency, and cost-effectiveness, particularly across large forest areas where consistent monitoring is crucial for REDD+ implementation and carbon market verification. Remote sensing technologies provide the spatial and temporal coverage necessary for operational forest carbon monitoring, but translating satellite observations into accurate carbon estimates remains a technical challenge due to the complex relationships between spectral signatures and forest structural parameters, often bringing complexity and lack of detail to the GHG monitoring system, which can lead to confusion about the role of forests in climate change and discourage the achievement of global climate targets (HARRIS *et al.*, 2021).

Thus, machine learning approaches have emerged as powerful tools for addressing these remote sensing challenges by enabling automated pattern recognition and prediction from multi-dimensional satellite data. Traditional machine learning algorithms, including Random Forest, Support Vector Machines, and linear regression, have demonstrated capability in forest parameter estimation by learning relationships between remote sensing variables and field measurements. However, these shallow learning approaches often struggle with the complex, non-linear relationships inherent in forest ecosystems, particularly when integrating multi-sensor data streams or scaling across diverse forest types and environmental conditions, as well as in the work of Tu (2025).

Deep learning techniques, utilizing multiple hidden layers in neural network architectures, offer enhanced capability for hierarchical feature extraction and complex pattern recognition in remote sensing applications. Convolutional Neural Networks (CNNs) have shown particular promise for forest carbon monitoring by automatically extracting spatial features from optical and radar imagery, while recent advances in Vision Transformers and multi-sensor fusion approaches demonstrate improved accuracy in aboveground biomass estimation. These deep learning methods can integrate diverse data sources—including optical

imagery from Sentinel-2 and Landsat, synthetic aperture radar from Sentinel-1, and LiDAR measurements from GEDI—to capture the multi-dimensional nature of forest structure and its relationship to carbon storage across different forest types and environmental gradients.

Despite these technological advances, significant research gaps remain in operational forest carbon monitoring using AI-driven remote sensing approaches. Current methods primarily focus on detecting complete forest loss rather than subtle degradation processes, belowground carbon quantification remains largely unaddressed, and model transferability across different biomes and geographic regions presents ongoing challenges. This paper presents a comprehensive review of state-of-the-art remote sensing approaches for forest carbon monitoring, synthesizing recent advances in machine learning and deep learning techniques while identifying critical research directions for improving accuracy, operational scalability, and global applicability of AI-driven forest carbon assessment systems.

METHODS

This systematic literature review was conducted following established guidelines for comprehensive evidence synthesis in remote sensing research. Four complementary databases were systematically searched to ensure comprehensive coverage of the interdisciplinary literature spanning remote sensing, forest science, and machine learning domains: Scopus (comprehensive science database with strong remote sensing coverage), Web of Science Core Collection (citation-indexed scientific literature), Google Scholar (broad academic coverage including conference proceedings and technical reports), and SciELO Brazil (regional focus on South American forest research).

The search strategy employed a structured Boolean approach designed to capture the intersection of three primary concept domains: forest carbon monitoring, remote sensing technologies, and artificial intelligence methodologies. The complete search string was formulated as follows:

("Forest Carbon" OR "Vegetation Carbon" OR "Forest Carbon Monitoring" OR "Forest Carbon Credit" OR "Forest Carbon Balance" OR "Forest

Carbon Compensation" OR "Decarbonation") AND ("Remote Sensing" OR "Orbital Image" OR "Aerial Image" OR "Satellite Image" OR "Hyperspectral Image" OR "Multispectral Image") AND ("Machine Learning" OR "Random Forest" OR "Decision Tree" OR "Support Vector Machine" OR "Multilayer Perceptron" OR "K-Nearest Neighbour" OR "Artificial Neural Network" OR "Deep Learning" OR "Deep Neural Network" OR "Convolutional Neural Network" OR "Recurrent Neural Network" OR "Long-Short Term Memory" OR "Generative Adversarial Network" OR "Vision Transformer").

This search strategy was designed to maximize sensitivity while maintaining relevance, incorporating both traditional machine learning algorithms (Random Forest, Support Vector Machine, Decision Tree) and advanced deep learning architectures (CNNs, RNNs, LSTMs, GANs, Vision Transformers) that have emerged as prominent techniques in recent forest carbon monitoring applications.

Inclusion criteria encompassed: (1) peer-reviewed journal articles and conference proceedings published in English; (2) studies demonstrating direct application of machine learning or deep learning techniques to forest carbon estimation, biomass quantification, or carbon stock assessment using remote sensing data; (3) research incorporating satellite, airborne, or drone-based remote sensing platforms; (4) publications providing quantitative results or methodological frameworks applicable to forest carbon monitoring; and (5) studies published between 2010-2024 to capture the evolution of AI applications in this domain.

Exclusion criteria included: (1) studies focusing solely on agricultural crops or non-forest vegetation without forest carbon applications; (2) theoretical machine learning papers without remote sensing implementation; (3) remote sensing studies without AI/ML components; (4) review articles without original research contributions; (5) studies exclusively using ground-based measurements without remote sensing integration; and (6) publications not available in full text or with insufficient methodological detail for evaluation.

The systematic screening process followed a three-stage approach. Initial screening involved automated duplicate removal across databases and title-based relevance filtering. Abstract screening was conducted by two independent

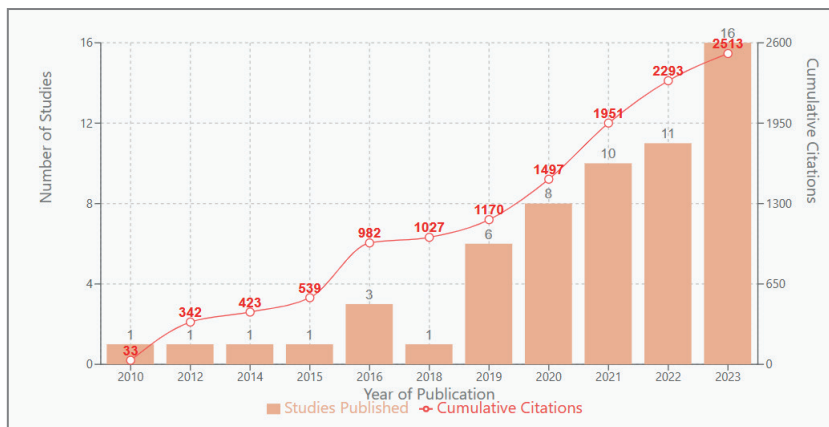
reviewers using the predetermined inclusion/exclusion criteria, with disagreements resolved through consensus discussion. Full-text screening evaluated methodological rigor, data quality, and alignment with review objectives.

After applying the systematic inclusion and exclusion criteria, 59 articles were selected that demonstrated clear alignment with the thematic scope and research objectives of this review. The selected studies span diverse forest ecosystems, remote sensing platforms, and AI methodologies, providing comprehensive coverage of current approaches to forest carbon monitoring using machine learning and deep learning techniques.

To identify dominant research themes and methodological trends within the selected literature, a comprehensive bibliometric analysis was conducted using automated text processing techniques. Key terms were extracted from titles, abstracts, and keywords across all 59 selected articles, followed by frequency analysis and term co-occurrence mapping.

From this compilation, a word cloud visualization was generated to illustrate the relative frequency and prominence of key terminology within the research corpus. As shown in Figure 1, terms such as "forest" and "biomass" emerged as the most frequent concepts, reflecting the primary focus on forest ecosystem carbon quantification. The visualization reveals the dominance of core remote sensing terminology ("satellite," "LiDAR," "optical"), machine learning methodologies ("random forest," "neural network," "deep learning"), and forest carbon parameters ("biomass," "carbon stock," "AGB"), confirming the comprehensive coverage of relevant literature and the coherent thematic focus of the selected studies.

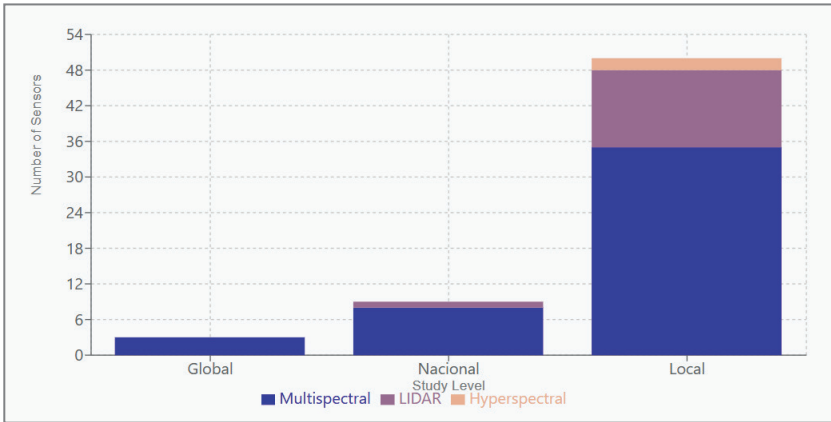
Figure 2 - The x-axis highlights the publication year, and the y-axis highlights the frequency of published studies. A trend line represents the number of citations over the years.



Based on Figure 2, it can be observed that during the initial period from 2010 to 2018, few articles were published. In 2019, however, there was a considerable increase in the number of publications. This growth is related to the implementation of the Paris Agreement, which was signed in 2015 but only began to be effectively enforced during this period. From that point on, there was a greater demand for transparency and accountability, which drove the development of more accurate remote sensing methods and artificial intelligence modeling. It also encouraged greater engagement from the scientific community and policymakers. It is important to note that the 2024 study was not included in the graph, as the data were collected before the end of the year, which could lead to inaccurate results.

Therefore, it is necessary to analyze the different scales of study level to understand which type of imagery is most used in the reviewed articles.

Figure 3 - Cross-study scale data with sensor type.

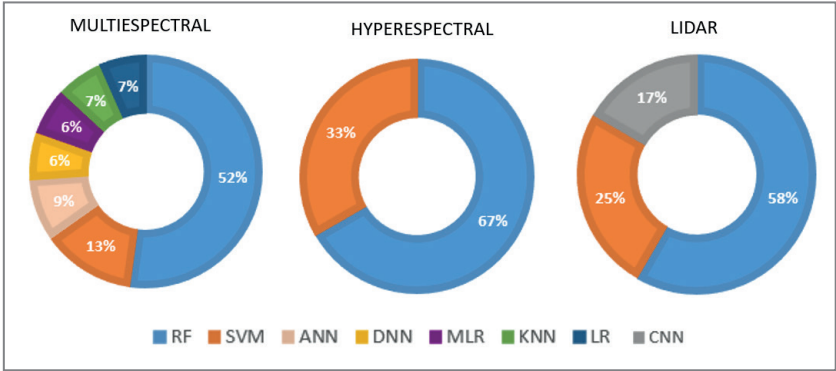


Upon analyzing the articles, it was found that the most frequent combination between the study scale and the type of sensor was the local scale with multispectral sensors. Although multispectral images offer a lower level of detail, they can be considered reliable, as they are often compared with well-established forest inventories, such as those from the Intergovernmental Panel, or with field data collected from small sample plots, which can also serve as reference data.

Additionally, it was noted that global-scale studies were among the least common, mainly due to the greater difficulty in data validation.

Therefore, to deepen the understanding of the algorithms used with each type of sensor, the information from each article was extracted and represented through donut charts.

Figure 4 - Survey of the most used methods/algorithms in multispectral, hyperspectral e LiDAR sensor.



When comparing Figures 4, it is observed that the Random Forest algorithm predominates in all charts for the types of sensors—multispectral, hyperspectral, and LiDAR—as also highlighted in the study by Tu (2025). This algorithm is increasingly used due to its non-parametric nature, which allows it to effectively and intrinsically capture information, demonstrating robust and generalizable performance.

Additionally, it is worth noting that in Figures 4, the second most frequently used algorithm is SVM, which performs particularly well with high spatial resolution imagery.

Beyond the data collected and processed according to the study area of each article, few open-access websites were found to provide direct information on carbon monitoring. Among all the reviewed articles, only two websites offered freely available data. The details are listed below (table 1).

Table 1 - Identification of free websites for carbon monitoring based on the articles surveyed.

Article	Description	Link	Years Covered	Spatial Resolution	Download Format	Additional Notes
Arevalo (2023)	Global Forest Watch (GFW)	https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw::aboveground-live-woody-biomass-density/explore	Last Update 2022	30 m	CSV, Shapefile, GeoJSON, Kml	-
Bos (2020)	Global Forest Change (GFC)	https://glad.earthengine.app/view/global-forest-chang	2000-2012 and 2000 - 2023	30 m	-	Changing forests (trees above 5 m)

In Table 1, it can be observed that the available data is of high spatial resolution, with information provided in different formats and covering different topics. The first website focuses on forest fires, while the second provides data on the density of aboveground live woody biomass.

In addition to the public websites found, other websites were found outside of the articles raised (Table 2).

Table 2 - Identifying free carbon monitoring sites based on Google searches.

Dataset name	Provider	Years Covered	Spatial Resolution	Global Coverage	Download Format	Site
ESA Biomass CCI (Biomass_cci)	European Space Agency	2010, 2017, 2018, 2019, 2020	100 m	Yes	GeoTIFF, netCDF	https://gee-community-catalog.org/projects/cci_agb/#citation
GlobBiomass	European Space Agency	2010	100 m	Yes	GeoTIFF	https://globbiomass.org/wp-content/uploads/GB_Maps/Globbiomass_global_dataset.html
GEDI L4B Gridded Biomass Density	NASA/ORNL DAAC	2019–2023 (Version 2.1)	1 km	Partially (51.6° N/S)	GeoTIFF	https://daac.ornl.gov/GEDI/guides/GEDI_L4B_Gridded_Biomass.html

In Table 2, a lower spatial resolution can be observed, meaning it provides less detail compared to the free websites listed in Table 1, which were identified in one of the articles used for the development of this work. After compiling all the articles, the most estimated carbon monitoring unit is above-ground biomass (AGB). Below, studies with this unit in multispectral and hyperspectral analysis will be highlighted, as shown in Table 3.

Sensor Type	Authors
Multispectral	Araza (2022), Arévalo (2023), Chen (2024), Qian (2021), El Hajj (2019), Emick (2023), Ghosh (2020), Jha (2021), Lv (2021), Padalia (2023), Saad (2023), Singh (2022), Wang (2021), Yang (2023), Zhang (2014), , Zhang (2022), Zhang (2023).
Hyperspectral	Dalponte (2016), Gao (2021), Gao (2022), Yu (2022).

It is observed that, even though hyperspectral data offers a higher level of image detail, multispectral sensors still predominate in practical applications.

This is because, in many cases, less precise data may be sufficient depending on the study's objective.

CONCLUSION

Currently, remote sensing has become an essential tool for forest carbon monitoring. Although multispectral imagery is the most commonly used in studies, it still presents limitations in terms of accuracy when compared to hyperspectral and LiDAR data, which offer a higher level of detail and precision.

In the field of machine learning, there is a predominance of shallow, supervised, and efficient algorithms — especially Random Forest, which is widely applied due to its robustness and generalization capability. However, Deep Learning approaches have gained increasing attention for enabling greater automation and accuracy in detecting land-use changes, deforestation, and estimating carbon stocks.

Despite technological advances, significant challenges remain, such as the lack of data transparency and consistency, particularly in regions with dense and heterogeneous vegetation. Furthermore, acquiring up-to-date and recurring data from forest inventories — which are essential for model validation — is often expensive and time-consuming.

Given this context, investing in more advanced technological platforms is crucial to reduce statistical errors and increase the reliability of carbon estimates. With more accurate and accessible data, it will become increasingly feasible to develop free and operational carbon monitoring systems, accelerating the implementation of large-scale carbon credit projects and contributing more effectively to environmental management and climate change mitigation.

REFERÊNCIAS

ARAZA, Arnán *et al.* A comprehensive framework for assessing the accuracy and uncertainty of global above-ground biomass maps. **Remote Sensing of Environment**, v. 272, p. 112917, 2022.

ARÉVALO, Paulo *et al.* Continuous mapping of aboveground biomass using Landsat time series. **Remote Sensing of Environment**, v. 288, p. 113483, 2023.

AREVALO. Global Forest Watch. **Aboveground Live Woody Biomass Density**. <https://data.globalforestwatch.org/datasets/gfw::aboveground-live-woody-biomass-density/explore>. 2023.

BOS. **Global Forest Change (GFC)**. <https://glad.earthengine.app/view/global-forest-chang>. 2020.

CHEN, Zhao *et al.* Aboveground forest biomass estimation using tent mapping atom search optimized backpropagation neural network with Landsat 8 and Sentinel-1A data. **Remote Sensing**, v. 15, n. 24, p. 5653, 2023.

DALPONTE, Michele; COOMES, David A. Tree-centric mapping of forest carbon density from airborne laser scanning and hyperspectral data. **Methods in ecology and evolution**, v. 7, n. 10, p. 1236-1245, 2016.

EL HAJJ, Mohammad *et al.* Mapping of aboveground biomass in Gabon. **Comptes Rendus Geoscience**, v. 351, n. 4, p. 321-331, 2019.

EMICK, Ethan *et al.* An approach to estimating forest biomass while quantifying estimate uncertainty and correcting bias in machine learning maps. **Remote Sensing of Environment**, v. 295, p. 113678, 2023.

GAO, Linghan; ZHANG, Xiaoli. Above-ground biomass estimation of plantation with complex forest stand structure using multiple features from airborne laser scanning point cloud data. **Forests**, v. 12, n. 12, p. 1713, 2021.

GAO, Linghan; CHAI, Guoqi; ZHANG, Xiaoli. Above-ground biomass estimation of plantation with different tree species using airborne lidar and hyperspectral data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 11, p. 2568, 2022.

GHOSH, Sujit Madhab; BEHERA, Mukunda Dev; PARAMANIK, Somnath. Canopy height estimation using sentinel series images through machine learning models in a mangrove forest. **Remote Sensing**, v. 12, n. 9, p. 1519, 2020.

HARRIS, Nancy L. *et al.* Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. **Nature Climate Change**, v. 11, n. 3, p. 234-240, 2021.

JHA, Nidhi *et al.* The real potential of current passive satellite data to map aboveground biomass in tropical forests. **Remote Sensing in Ecology and Conservation**, v. 7, n. 3, p. 504-520, 2021.

LV, Guanting *et al.* Signatures of Wetland Impact: Spatial Distribution of Forest Aboveground Biomass in Tumen River Basin. **Remote Sensing**, v. 13, n. 15, p. 3009, 2021.

MAHESH, Batta *et al.* Machine learning algorithms-a review. **International Journal of Science and Research (IJSR)**.**[Internet]**, v. 9, n. 1, p. 381-386, 2020.

PADALIA, Hitendra; PRAKASH, Ankit; WATHAM, Taibanganba. Modelling aboveground biomass of a multistage managed forest through synergistic use of Landsat-OLI, ALOS-2 L-band SAR and GEDI metrics. **Ecological Informatics**, v. 77, p. 102234, 2023.

QIAN, Chunhua *et al.* Estimation of forest aboveground biomass in karst areas using multi-source remote sensing data and the K-DBN algorithm. **Remote Sensing**, v. 13, n. 24, p. 5030, 2021.

SAAD, Siti Nor Maizah *et al.* Modeling carbon emissions of post-selective logging in the production forests of Ulu Jelai, Pahang, Malaysia. **Remote Sensing**, v. 15, n. 4, p. 1016, 2023.

Sharp R, Chaplin-Kramer R, Wood S A, Guerry A (2018). Guia do Usuário do InVEST.

SINGH, Chandrakant *et al.* Remote sensing-based biomass estimation of dry deciduous tropical forest using machine learning and ensemble analysis. **Journal of Environmental Management**, v. 308, p. 114639, 2022.

Tu, L., Pan, J. Evaluation of carbon storage in a metropolitan area based on long-term time series of Land Use/Cover Change dynamics. **Front. Earth Science**. V.19,n. 54–67 (2025). <https://doi.org/10.1007/s11707-024-1127-9>.

YANG, Qiuli *et al.* Mapping high-resolution forest aboveground biomass of China using multisource remote sensing data. **GIScience & Remote Sensing**, v. 60, n. 1, p. 2203303, 2023.

YU, Shichuan *et al.* Effects of driving factors on forest aboveground biomass (AGB) in China's Loess Plateau by using spatial regression models. **Remote Sensing**, v. 14, n. 12, p. 2842, 2022.

WANG, Jingyi *et al.* Remote sensing estimation of bamboo forest aboveground biomass based on geographically weighted regression. **Remote sensing**, v. 13, n. 15, p. 2962, 2021.

ZHANG, Jian *et al.* Estimating spatial variation in Alberta forest biomass from a combination of forest inventory and remote sensing data. **Biogeosciences**, v. 11, n. 10, p. 2793-2808, 2014.

ZHANG, Fanyi *et al.* Estimation of aboveground carbon density of forests using deep learning and multisource remote sensing. **Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 3022, 2022.

ZHANG, Xiaoyong *et al.* Simulation of Spatial and Temporal Distribution of Forest Carbon Stocks in Long Time Series—Based on Remote Sensing and Deep Learning. **Forests**, v. 14, n. 3, p. 483, 2023.

MAPEAMENTO ARBÓREO URBANO A PARTIR DE IMAGENS DE SENSORIAMENTO REMOTO USANDO APRENDIZAGEM DE MÁQUINA

Isabelly Martins de Sá

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

Alessandra de Oliveira Alves Correia

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Vagner Souza Machado

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Lucas Prado Osco

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Ana Paula Marques Ramos

Universidade Estadual Paulista (UNESP)

RESUMO

A vegetação arbórea urbana é essencial para funções socioambientais, como melhoria da qualidade do ar e moderação do clima. Caracterizar a distribuição espaço-temporal de aglomerados arbóreos urbanos é fundamental para decisões de planejamento sustentável das cidades. Dados adquiridos por sensoriamento remoto são recorrentemente utilizados nessa temática e têm sido disponibilizados com resolução espacial e temporal cada vez melhores, exigindo, em contrapartida, métodos cada vez robustos para processamento desses dados. Este trabalho propõe o mapeamento espaço-temporal de regiões arbóreas urbanas em imagens multiespectrais *PlanetScope* com algoritmos supervisionados de aprendizagem de máquina. O desempenho dos modelos *Random Forest* (RF) e *Support Vector Machine* (SVM) foi comparado em uma abordagem multitemporal (anos de 2018 e 2023). Para tanto, desenvolveu-se um estudo de caso em uma cidade no estado de São Paulo. A partir dos dados gerados, fez-se a análise da saúde dessa vegetação nessas áreas usando índices espectrais extraídos das imagens orbitais. Os modelos foram treinados e testados, considerando uma tarefa de classificação binária: classe 'árvore' x classe 'outra', em uma proporção de dados de 75% e 25%, respectivamente. Esses dados foram obtidos por vetorização manual sobre as imagens *PlanetScope*. Na tarefa proposta, ambos os modelos demonstram capacidade qualitativa na segregação da vegetação de demais alvos urbanos. Porém, apresentaram dificuldades em segmentar árvores de demais grupos de vegetação, como gramíneas, quando espacialmente próximos. Também, são limitados quanto à capacidade de generalização, por exemplo, ao serem treinados em imagens de uma data (ex.: ano 2018) e aplicados na inferência da classe 'árvore' em imagens de outras datas (ex.: 2023). Os dados *PlanetScope* viabilizam o mapeamento e análise da saúde da vegetação em ambiente urbano, sendo esse processo facilitado quando modelos baseados em aprendizagem de máquina são utilizados. O ambiente urbano tem uma diversidade espacial e espectral de alvos que onera a tarefa do classificador, indicando que a segregação entre classes de maior similaridade

espectral requer modelos com maior capacidade de extração de características, como as redes neurais profundas.

Palavras-chave: Classificação Supervisionada por Região, Aprendizado de Máquina, Planejamento Ambiental Urbano, Arborização Urbana.

INTRODUÇÃO

A vegetação urbana, como árvores e áreas gramadas, é essencial para melhorar a qualidade de vida nas cidades, reduzindo poluição do ar, calor e ruído sonoro, além de valorizar o espaço urbano (MOURATIDIS, 2021). As árvores, em especial, são as mais eficazes no sequestro de carbono por acumularem grandes quantidades no tronco, galhos, raízes e solo, graças ao porte e ciclo de vida longos. Florestas tropicais, por exemplo, são importantes reservatórios de carbono e ajudam a mitigar as mudanças climáticas (SHAFIQUE *et al.*, 2020). No entanto, com a expansão urbana, a gestão da vegetação enfrenta desafios e exige dados precisos e atualizados sobre a distribuição das árvores, o que é complexo devido à grande quantidade e à dificuldade de monitoramento contínuo (SAAD *et al.*, 2021).

Nesse contexto, as geotecnologias, como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o sensoriamento remoto, são essenciais para a gestão da vegetação urbana. Elas permitem mapear e monitorar grandes áreas, usando características espectrais e espaciais para identificar árvores e aglomerados arbóreos. Porém, a precisão pode ser limitada pela resolução das imagens e pela variabilidade ambiental, exigindo algoritmos mais avançados para lidar com o crescente volume de dados gerados (ONISHI & ISE, 2021). Uma plataforma recente que oferece dados com alta resolução espacial e temporal é a constelação *PlanetScope*, da empresa *Planet Labs* (PLANET, 2019).

A inteligência artificial, especialmente a aprendizagem de máquina (*machine learning* - ML), destaca-se como uma ferramenta eficiente para a extração de informações em imagens (LARY, 2010). No contexto do sensoriamento remoto, os algoritmos de *machine learning* têm possibilitado a produção de mapas detalhados de uso e cobertura do solo, inclusive para áreas em perímetro urbano. O processamento de imagens de alta resolução com técnicas de aprendizado de máquina é uma abordagem atual e promissora para fornecer informações de suporte ao planejamento ambiental urbano, tornando o processo mais eficiente e orientado por dados.

Atualmente, existem inúmeras opções de algoritmos disponíveis no campo do ML. Entre os mais utilizados na classificação de imagens de sensoriamento remoto estão os algoritmos supervisionados *Random Forest* (RF) e *Support Vector*

Machine (SVM). O RF se destaca por sua robustez e eficácia em lidar com dados de alta dimensionalidade (BREIMAN, 2001), característicos de dados de sensoriamento remoto. Por outro lado, o SVM busca identificar o melhor hiperplano para separar diferentes classes no espaço de características, maximizando a margem entre as classes e promovendo uma generalização (CORTES & VAPNIK, 1995). Essa abordagem torna o SVM adequado para classes que possuem fronteiras complexas, como ocorre em alguns tipos de uso e cobertura da terra detectados em imagens de sensoriamento remoto.

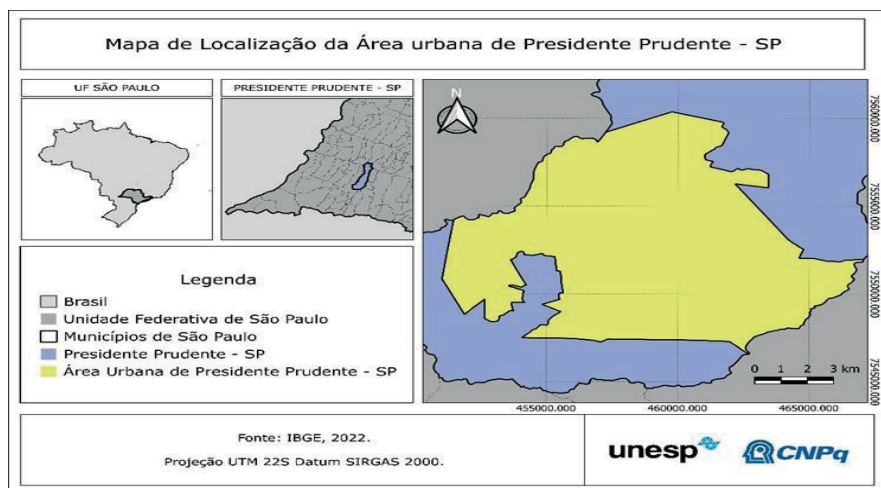
Este trabalho tem por objetivo mapear multitemporalmente regiões arbóreas urbanas em imagens *PlanetScope* usando os algoritmos supervisionados RF e SVM. A partir das áreas arbóreas mapeadas foi realizada a análise da saúde da vegetação nessas áreas, utilizando índices espectrais de vegetação. Diante disso, pode-se: (i) caracterizar o desempenho dos algoritmos por uma avaliação qualitativa na tarefa de classificação das áreas arbóreas urbanas nas imagens de alta resolução *PlanetScope*; (ii) verificar se esses algoritmos têm capacidade de generalização – ser treinados em imagem de uma data e inferir regiões arbóreas em imagens da mesma área, mas em anos diferentes (2018 e 2023); (iii) observar a variação da saúde da vegetação por índices espectrais nas áreas mapeadas; e (iv) verificar a distribuição espacial das áreas arbóreas na cidade em estudo.

MÉTODOS

Área de estudo

A área urbana do município de Presidente Prudente, localizado a oeste do estado de São Paulo, foi a área selecionada para o estudo de caso (Figura 1). Esta é uma cidade de pequeno-médio porte, com aproximadamente 230 mil habitantes, e uma área urbana aproximada de 560 km², representando a maior cidade do oeste do estado de São Paulo (IBGE, 2025a).

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Os autores, 2025.

Mapeamento das áreas arbóreas urbanas em imagens orbitais

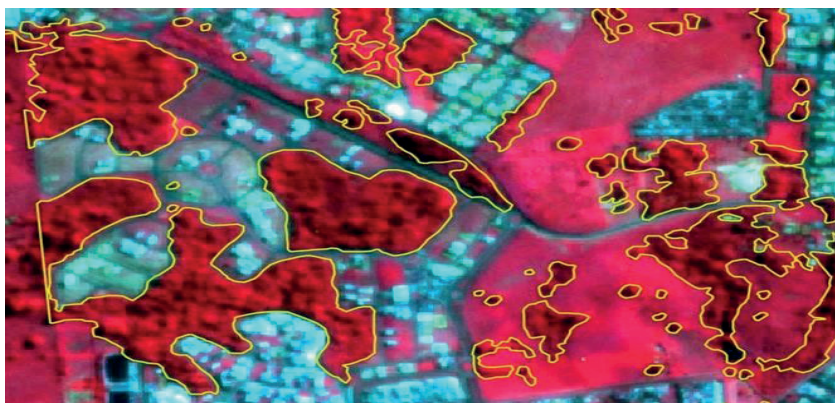
As principais etapas que compuseram o método foram: (i) seleção das imagens para a área de estudo de caso; (ii) vetorização manual das imagens *PlanetScope*, utilizando a geometria de polígonos, para definir a classe 'árvore', que representa as regiões de árvores, e a classe 'outra', que corresponde às demais feições que não pertencem à classe árvore; (iii) treinamento e validação dos algoritmos RF e SVM para classificação das áreas de vegetação arbórea; (iv) avaliação do desempenho dos algoritmos pelas métricas de classificação; e (v) análise espaço-temporal da distribuição da vegetação arbórea, incluindo o uso de índices espectrais para identificar áreas de estresse ou degradação.

Foram utilizadas duas imagens do *PlanetScope*, datadas de 22 de abril de 2018 e 23 de abril de 2023, para cobrir a área de estudo (Figura 1). As imagens orbitais *PlanetScope* são adquiridas por uma constelação de aproximadamente 130 nano satélites, capazes de cobrir diariamente uma área de 200 milhões de km². Essas imagens, cedidas gratuitamente para fins de pesquisa, são multiespectrais (RGB e NIR), ortorretificadas e corrigidas do efeito atmosférico, sendo, portanto, dados *ready-to-use* (PLANET, 2019).

As regiões arbóreas identificadas nas imagens *PlanetScope* foram vetorizadas manualmente e indexadas em um banco de dados geoespacial, com potencial de reutilização como dado de referência (*ground truth*) em pesquisas futuras. Esses arquivos representam máscaras de vegetação arbórea sobre a imagem *PlanetScope*. A Figura 2 apresenta alguns exemplos dessas máscaras em formato de polígonos, representando o *ground truth* para as regiões arbóreas.

A vetorização foi realizada na escala de visualização 1:4.000, utilizando a composição colorida em falsa cor (RGB-432), a fim de facilitar a distinção da vegetação arbórea em relação aos demais alvos presentes nas imagens. Para assegurar a confiabilidade do mapeamento, foram considerados apenas os polígonos com área superior a 1.000 m², uma vez que a análise visual demonstrou que, nessa escala, apenas áreas acima desse limiar apresentavam definição espacial suficiente para uma delimitação precisa.

Figura 2 - Exemplos de regiões de árvores vetorizadas manualmente nas imagens *PlanetScope* utilizando a composição falsa cor (RGB-432).



Fonte: Os autores, 2025.

Todo o processo de vetorização foi realizado no ArcGIS Pro 3.2.2, sendo que as amostras de vegetação arbórea foram armazenadas no banco de dados na classe 'árvore', e as demais amostras como solo exposto, pavimentos, edificações e gramíneas foram armazenados na classe "Outra", com o objetivo de possibilitar uma classificação binária respeitando-se a proporção de 75% e 25% de amostras para as classes "arvore" e "outra" respectivamente. A Figura

3 apresenta exemplos amostras vetorizadas e armazenadas no banco de dados de ambas as classes.

Figura 3 - Vetorização manual dos polígonos representando as classes 'árvore' (verde) e 'outra' (amarelo) para treinamento/validação e teste dos algoritmos RF e SVM.



Fonte: Os autores, 2025.

A aplicação dos algoritmos *Random Forest* e *Support Vector Machine* foi realizada no software ArcGIS Pro, versão 3.2, adotando-se uma abordagem supervisionada por região.

O primeiro passo consistiu na segmentação da imagem referente ao ano de 2023, utilizando o algoritmo *mean shift*. Para isso, foram definidos os seguintes parâmetros: detalhe espectral = 20, detalhe espacial = 17 e tamanho mínimo do segmento (em pixels) = 30. O método *mean shift* utiliza três parâmetros principais: o detalhe espectral, que define a sensibilidade à variação entre bandas; o detalhe espacial, relacionado à influência da distância entre os pixels; e o tamanho mínimo do segmento, que controla a fusão de regiões muito pequenas. Esse algoritmo requer imagens com três bandas espectrais e codificação de 8 bits. Assim, para a classificação das imagens *PlanetScope*, utilizou-se a composição em falsa cor RGB (bandas 4-3-2).

Com a imagem segmentada, realizou-se a classificação por meio dos algoritmos RF e SVM. Para o RF, os parâmetros definidos foram: número

máximo de árvores = 350, profundidade máxima das árvores = 50 e até 1.300 amostras por classe. No caso do SVM, foi utilizado um máximo de 450 amostras por classe. Esses valores foram escolhidos com base em testes empíricos, visando alcançar o melhor desempenho possível dos modelos.

Após o treinamento com a imagem de 2023, aplicou-se a inferência sobre a imagem de 2018, utilizando o modelo treinado anteriormente. Além disso, foi empregada a mesma segmentação feita para o ano de 2023 como dado auxiliar. Esse procedimento foi adotado tanto para o RF quanto para o SVM, permitindo aplicar os modelos já ajustados para classificar os dados do ano anterior.

A validação dos resultados, para os dois anos analisados, foi feita por meio de uma análise que combinou métodos qualitativos e quantitativos, utilizando todos os polígonos vetorizados manualmente (ground truth) o que possibilitou verificar a real capacidade dos modelos em mapear áreas de vegetação urbana, indo além da simples análise baseada em amostragens pontuais. A validação foi realizada com o auxílio de um código em *Python*, executado no *Google Colaboratory*. Esse código calcula métricas de desempenho como *Google Colaboratory* e *Intersection over Union* (IoU), além de produzir representações visuais da interseção (*intersection*) e da subtração (*erase*) entre os resultados dos modelos e os dados de referência, para os anos de 2018 e 2023.

Por fim, a análise da saúde da vegetação foi feita com base no cálculo do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), também utilizando o ArcGIS Pro 3.2, considerando as imagens dos dois anos em estudo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

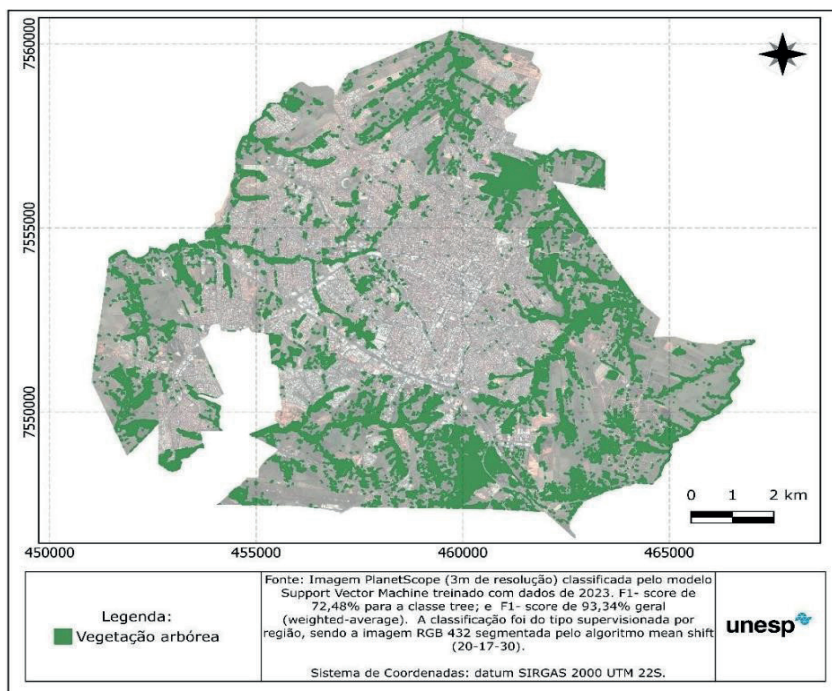
Mapeamento das regiões arbóreas urbanas: uma avaliação quali-quantitativa

O mapeamento da vegetação arbórea urbana por vetorização manual foi realizado com base nas imagens *PlanetScope* dos anos de 2018 e 2023. A delimitação visual das regiões arbóreas permitiu a construção de um banco de dados

georreferenciado, utilizado como referência na avaliação das classificações supervisionadas.

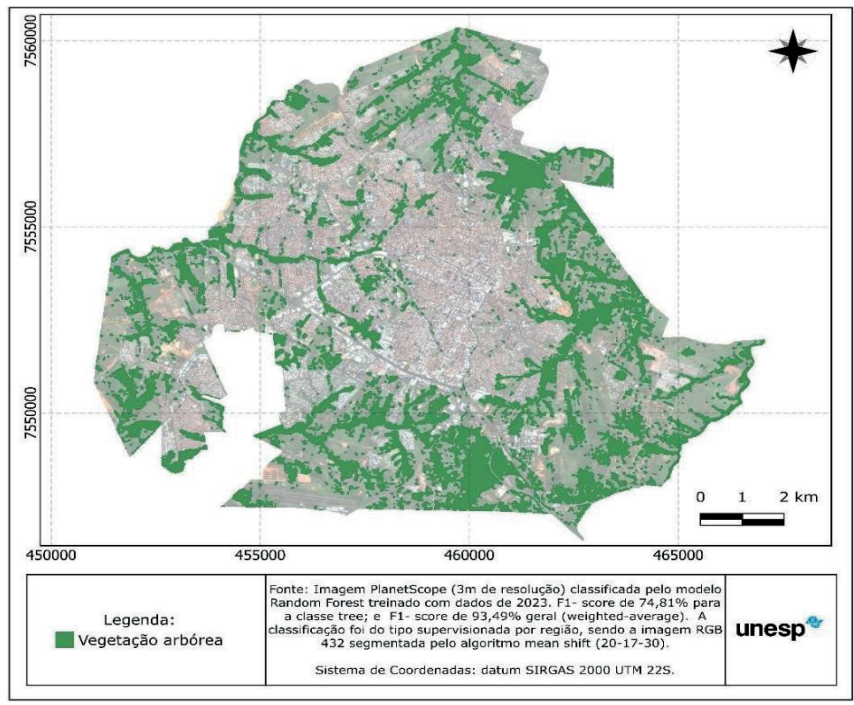
A classificação supervisionada por regiões, utilizando os algoritmos RF e SVM foi inicialmente aplicada à imagem *PlanetScope* de 2023. Posteriormente, com os modelos treinados com a imagem de 2023, foram aplicadas as classificações supervisionadas por regiões na imagem *PlanetScope* de 2018. Os mapas gerados com o RF e SVM para o ano de 2018 são apresentados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

Figura 4 - Mapa com as áreas de vegetação arbórea na cidade de Presidente Prudente – SP, classificadas por meio do algoritmo *Random Forest*, abril de 2018.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 5 - Mapa com as áreas de vegetação arbórea na cidade de Presidente Prudente – SP, classificadas por meio do algoritmo *Support Vector Machine*, abril de 2018.



Fonte: Os autores, 2025.

Conforme mencionado anteriormente, o desempenho dos modelos para o mapeamento das classes “árvore” e “outra” foi avaliado utilizando todos as amostras vetorizadas manualmente de ambas as classes para o cálculo das métricas de avaliação, as quais foram implementadas por meio de um código em linguagem *Python*, executado no ambiente *Google Colaboratory*. O desempenho por classe, obtido por ambos os algoritmos (RF e SVM) em cada ano, encontra-se detalhado na Tabela 1. Já as métricas ponderadas para os diferentes anos e modelos estão apresentadas nas Figuras 6 e 7.

Tabela 1 - Desempenho dos algoritmos RF e SVM nos anos de 2023 e 2018 por classe considerando diferentes métricas de classificação.

	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)	IoU (%)
<i>Random Forest (ano 2023)</i>				
Classe 'Árvore'	80,07	74,27	77,06	62,69
Classe 'Outra'	96,20	97,24	96,72	93,65
<i>Random Forest (ano 2018)</i>				
Classe 'Árvore'	73,17	76,52	74,81	59,75
Classe 'Outra'	96,55	95,90	96,22	92,27
<i>Support Vector Machine (ano 2023)</i>				
Classe 'Árvore'	85,98	68,84	76,46	61,89
Classe 'Outra'	95,48	98,32	96,88	93,96
<i>Support Vector Machine (ano 2018)</i>				
Classe 'Árvore'	80,66	65,80	72,47	56,83
Classe 'Outra'	95,13	97,69	96,39	93,04

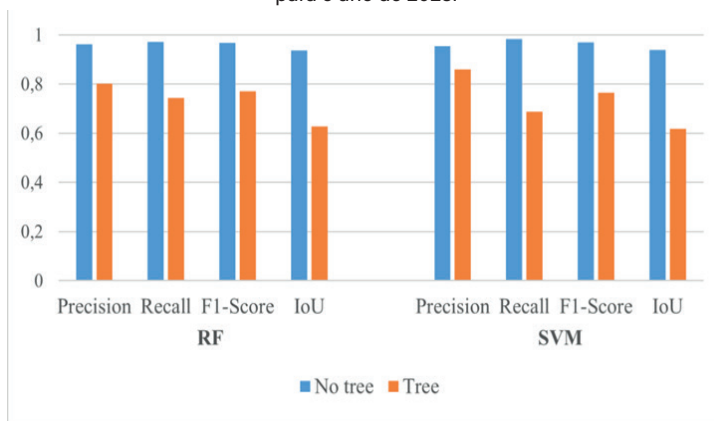
Fonte: Os autores, 2025.

A Tabela 1 evidencia dados significativos sobre o desempenho dos modelos. Para a classe "árvore", os algoritmos SVM e RF, treinados com dados de 2023, apresentaram valores de IoU abaixo do ideal, indicando dificuldades na segmentação precisa dessa classe. Essa limitação se tornou ainda mais evidente na inferência realizada com o modelo SVM sobre as imagens de 2018, cujo IoU para a classe "árvore" foi de apenas 56,83%.

Tais resultados revelam a limitação dos modelos em generalizar o aprendizado obtido a partir dos dados de 2023 para as condições representadas na imagem de 2018. Já para a classe outra, os valores de *Precision*, *Recall* e *F1-Score* foram muito elevados, geralmente acima de 95% para ambos os algoritmos e anos (Tabela 1). Isso demonstra que a classificação de áreas sem vegetação é precisa, com poucas áreas não-arbóreas sendo classificadas incorretamente.

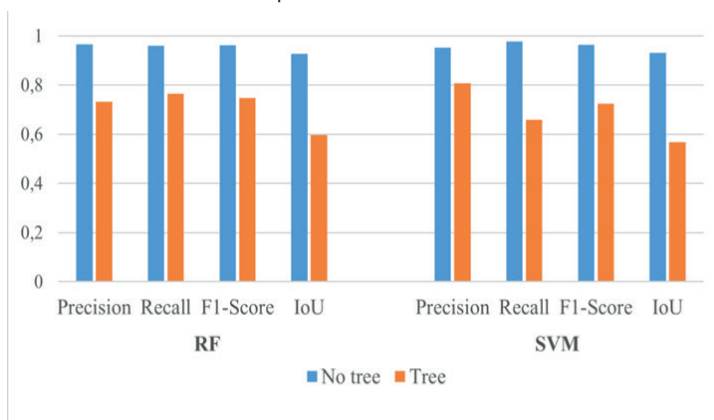
Ao analisar os valores dessas métricas (evidenciadas nas Figura 6 e Figura 7), uma das expectativas iniciais foi confirmada: os resultados para o ano de 2018 foram inferiores aos obtidos para 2023 em ambos os modelos. Essa diferença pode ser explicada pelo fato de que, em 2018, as classificações foram realizadas por meio de inferência com modelos treinados em dados de 2023, o que provavelmente aumentou a incerteza nos resultados devido a variações temporais e possíveis diferenças nas condições dos dados entre os anos.

Figura 6 - Resultados das métricas de avaliação ponderadas obtidas com os algoritmos RF e SVM para o ano de 2023.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 7 - Resultados das métricas de avaliação ponderadas obtidas com os algoritmos RF e SVM para o ano de 2018.



Fonte: Os autores, 2025.

Cabe ressaltar que o RF apresentou um resultado inesperado para o ano de 2018: o valor de *recall* para a classe árvore foi superior ao observado em 2023, com 76,52% e 74,27%, respectivamente. Esse resultado pode ser explicado pela definição do recall, que mede a proporção de verdadeiros positivos (VP) em relação à soma de verdadeiros positivos e falsos negativos (FN). Em outras palavras, o recall avalia quantos polígonos de árvores foram corretamente classificados em relação ao total de polígonos de árvores no dado de referência.

Ao analisar os dados da Tabela 2, que apresentam as áreas de *intersection* e *erase*, essa explicação é corroborada. A área de *erase* foi menor em 2018 (5,72 km²) em comparação a 2023 (6,38 km²), enquanto a área de *intersection* foi maior em 2018 (18,65 km²) do que em 2023 (18,43 km²). Esses resultados indicam que a classificação realizada pelo RF em 2018 apresentou maior sobreposição com o *ground truth* do que a classificação de 2023, justificando o valor superior de *recall* no ano de 2018. As análises qualitativas das áreas *intersection* e *erase* dos algoritmos de RF e SMV para o ano de 2023 estão representadas por meio da Figura 8. Analogamente, foram geradas figuras para o ano de 2018.

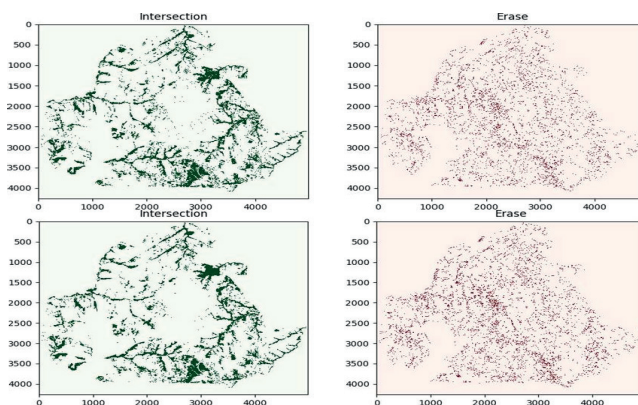
Tabela 2 - Comparação das áreas do ground truth (vetorização manual) com aquelas obtidas por aprendizado de máquina, incluindo as operações de intersection (sobreposição de áreas) e erase (subtração de áreas) para a classe 'árvore'.

	Ground Truth (km2)	Classificação (km2)	Intersection (km2)	Erase (km2)
Random Forest (ano 2023)	24,81	23,02	18,43	6,38
Random Forest (ano 2018)	24,38	25,49	18,65	5,72
Support Vector Ma- chine (ano 2023)	24,81	19,87	17,08	7,73
Support Vector Ma- chine (ano 2018)	24,38	19,88	16,04	8,33

Fonte: Os autores, 2025.

Analisando os dados da Tabela 2, observa-se que a classificação do RF de 2018 superestimou as regiões de regiões arbóreas urbanas, enquanto as demais classificações subestimaram essas áreas. O modelo RF apresentou maior consistência entre os anos, com variações menores nas áreas classificadas, enquanto o SVM apresentou diferenças mais significativas. A *intersection* reflete as áreas em que a classificação coincidiu com o *ground truth*, sendo maior para o RF em 2018 e para o SVM em 2023, indicando maior precisão em cada caso. No entanto, a *erase*, que representa exclusões errôneas, foi maior para o SVM em ambos os anos, destacando um desempenho inferior nesse aspecto.

Figura 8 - Resultado do intersection (sobreposição de áreas) e erase (subtração de áreas) para a classe 'árvore' com os dados de 2023: (a) *Random Forest*; (b) *Support Vector Machine*.



Fonte: Os autores, 2025.

Quanto às mudanças nas áreas classificadas, o RF de 2023 diminuiu em relação ao *ground truth* (de 24,81 km² para 23,02 km²), assim como o SVM de 2023 (de 24,81 km² para 19,87 km²). Já o RF de 2018 aumentou (de 24,38 km² para 25,49 km²), enquanto o SVM de 2018 também diminuiu (de 24,38 km² para 19,88 km²). A soma de *intersection* e *erase* retorna o valor da classificação, já que a *intersection* representa os acertos em relação ao *ground truth* e a *erase* as áreas classificadas como falsas exclusões. Como a *erase* reflete erros de exclusão, o pior desempenho foi do SVM em 2018, com 8,33 km² de *erase*. Cabe destacar que a razão entre a área de *Intersection* pela área classificada resulta no valor da métrica *precision*, que mede a proporção de áreas classificadas como árvore que estão corretas em relação ao *ground truth*. Já o cálculo $[1 - (\text{Erase}/\text{Classificação})]$ representa aproximadamente o *recall*, indicando a proporção de áreas do *ground truth* corretamente classificadas, penalizando as exclusões errôneas.

As Figura 9 e Figura 10 apresentam, em conjunto, a análise da distribuição das áreas arbóreas da cidade de Presidente Prudente, obtidas por vetorização manual (*ground truth*) e por aprendizado de máquina, para ambos os modelos e anos em relação à densidade populacional urbana do município. Isso permitiu uma compreensão da distribuição espacial da vegetação arbórea nas áreas de alta (Figura 9) e baixa (Figura 10) densidade populacional. Os dados de densidade populacional foram extraídos da malha de setor censitários do IBGE (2025b).

Figura 9 - Comparação da área total da classe 'árvore' obtida por vetorização manual (GT - ground truth) e pelos algoritmos RF e SVM, para a região de alta densidade urbana em Presidente Prudente - SP.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 10 - Comparação da área total da classe 'árvore' obtida por vetorização manual (GT - *ground truth*) e pelos algoritmos RF e SVM, para a região de alta densidade urbana em Presidente Prudente - SP.



Fonte: Os autores, 2025.

Ao observar os valores das áreas arbóreas nas regiões urbanas de alta densidade populacional (Figura 9), nota-se que ambos os algoritmos subestimaram esses valores, em ambos os anos analisados. Todavia, o desempenho do RF se mantém superior comparado ao SVM independentemente do ano analisado. Por outro lado, a análise das áreas arbóreas nas regiões urbanas de baixa densidade populacional (Figura 10) revelou resultados diferentes. Enquanto as classificações do RF, de 2023 e 2018, superestimaram esses valores de área, as classificações do SVM subestimaram as áreas de vegetação para os mesmos anos. Esses resultados indicam que os modelos enfrentaram

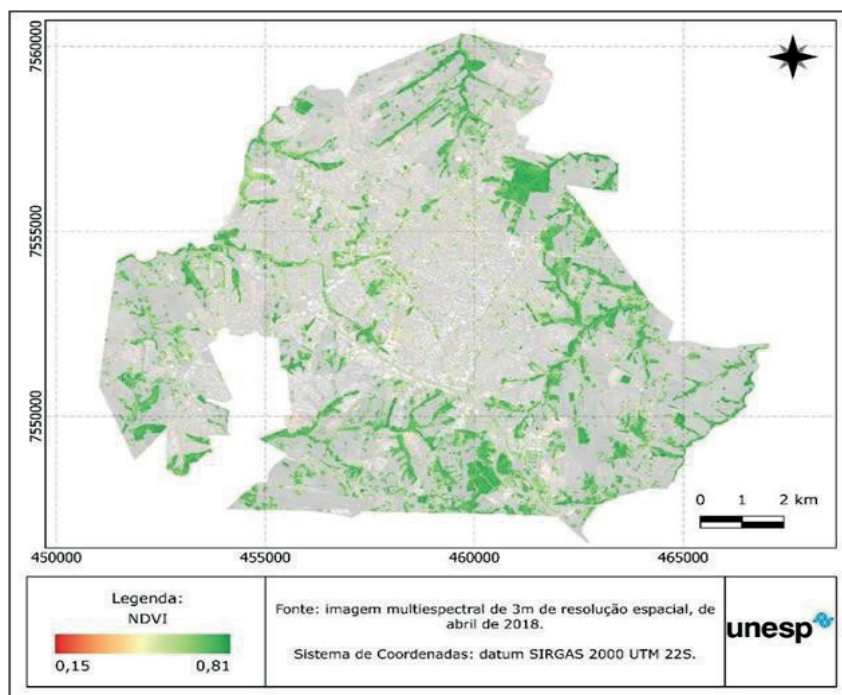
maiores dificuldades em classificar as áreas de vegetação arbórea nas regiões mais urbanizadas, onde há maior presença de construções e, possivelmente, maior mistura espectral.

Ao comparar as Figuras 9 e 10, observa-se que as áreas de baixa densidade populacional foram as principais responsáveis pela superestimação da área arbórea urbana do município. Observa-se (Figura 10) que o modelo RF apresentou dificuldades em distinguir entre vegetação arbórea e áreas verdes (como pastagem, gramíneas e culturas agrícolas), no caso das áreas de baixa densidade populacional, o que pode ter levado à superestimação dos resultados. Isso pode ser explicado pela maior prevalência de áreas verdes nessas regiões, o que resultou em um aumento de falsos positivos, com a vegetação rasteira (como gramíneas ou pastagem) sendo erroneamente classificada como vegetação arbórea.

Avaliação multitemporal da saúde das regiões arbóreas urbanas mapeadas manualmente

As Figura 11 e Figura 12 mostram a variação espacial do NDVI nas áreas identificadas como vegetação arbórea, mapeadas por vetorização manual, destacando a intensidade da vegetação e suas diferentes características em relação à densidade e tipo de cobertura vegetal para os anos estudados.

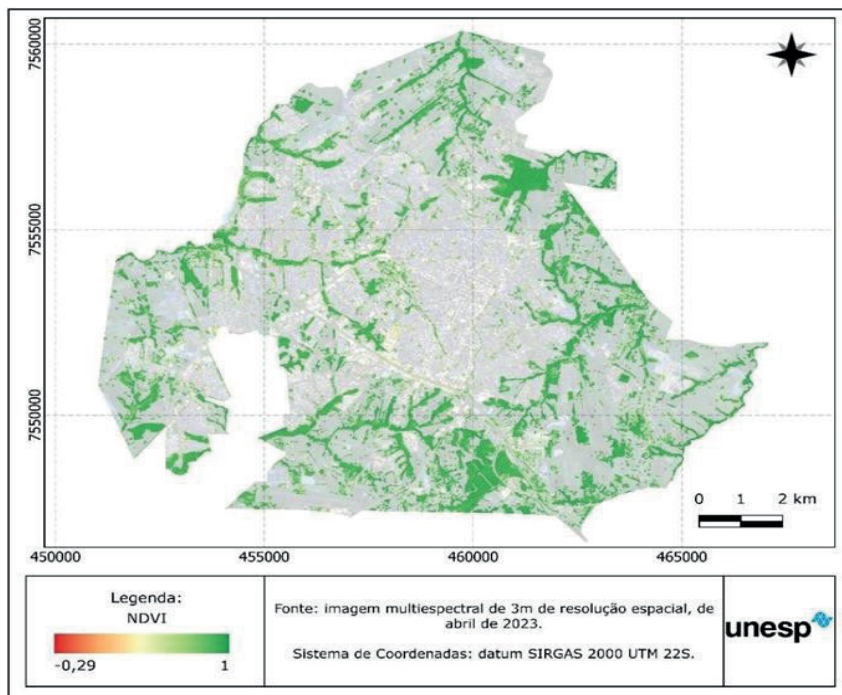
Figura 11 - Distribuição do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) nas regiões de vegetação arbórea, mapeadas manualmente, na cidade de Presidente Prudente - SP, para o ano de 2018.



Fonte: Os autores, 2025.

Ao analisar as Figura 11 e Figura 12 observa-se diferença de vigor da vegetação arbórea, mapeadas por vetorização manual. No ano de 2018 (Figura 11), a vegetação apresenta um vigor menor, pois estão sendo representadas em tons amarelados, sugerindo uma cobertura vegetal menos densa ou estressada. Por outro lado, para o ano de 2023 (Figura 12), as áreas de vegetação arbórea predominam em tons de verde, o que indica um aumento no vigor da vegetação. A Figura 13 mostra o mapa da diferença entre os valores do NDVIs de 2023 e 2018, permitindo a visualização das variações nas áreas de vegetação arbórea ao longo do tempo.

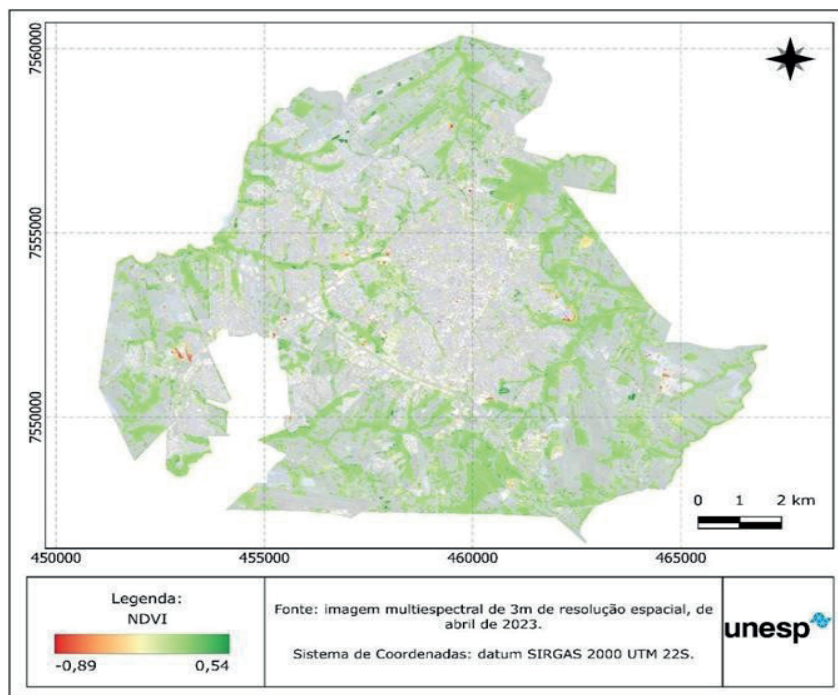
Figura 12 - Distribuição do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) nas regiões de vegetação arbórea, mapeadas manualmente, na cidade de Presidente Prudente - SP, para o ano de 2023.



Fonte: Os autores, 2025.

O mapa da diferença de NDVI entre 2023 e 2018, apresentado na Figura 13, possibilita uma análise da distribuição espacial das áreas com crescimento de vegetação arbórea, indicadas por tons de verde escuro, e das áreas com perda de vegetação arbórea, destacadas em tons de vermelho. Essa diferenciação visual facilita a identificação das regiões que experimentaram uma recuperação ou expansão da vegetação, bem como áreas que sofreram degradação ou redução da cobertura arbórea ao longo do período analisado.

Figura 13 - Distribuição do Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (NDVI) nas regiões de - vegetação arbórea, mapeadas manualmente, da cidade de Presidente Prudente – SP (2023 – 2018).



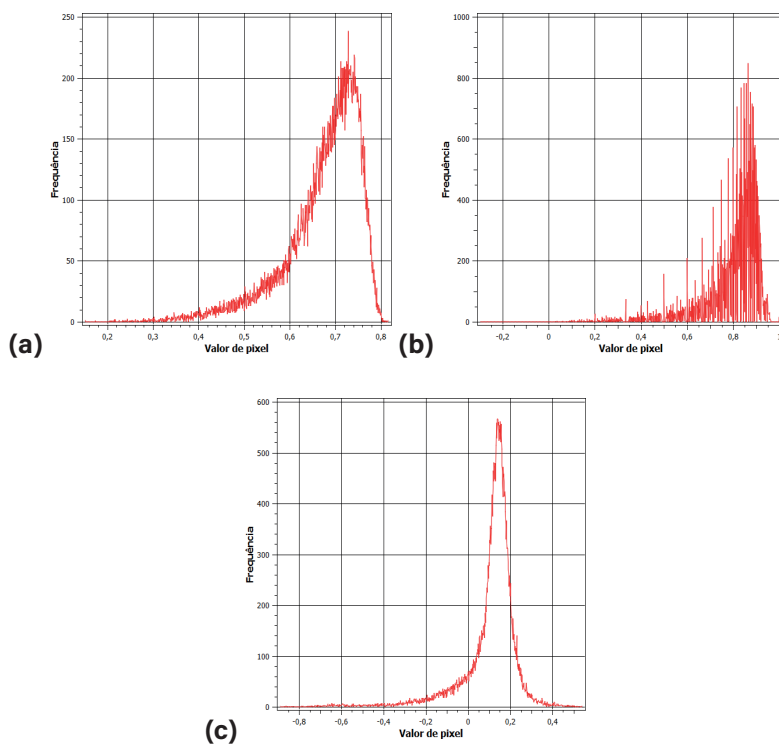
Fonte: Os autores, 2025.

Os resultados dos mapas temáticos, apresentados em uma variação de cores, complementam as análises quantitativas dos histogramas, reforçando a importância do NDVI na avaliação da saúde da vegetação em diferentes períodos. Esses mapas proporcionam uma visualização espacial das mudanças no vigor da vegetação ao longo do tempo, facilitando a compreensão de como as condições ambientais podem afetar as áreas arbóreas.

Na Figura 14 são apresentados os histogramas para cada mapa de NDVI. O histograma para o ano de 2018 (Figura 14a) mostra uma maior concentração de valores de NDVI até 0,7, indicando uma vegetação arbórea com alto vigor. Em contraste, os valores de NDVI de 2023 (Figura 14b) apresentam uma maior concentração entre 0,8 e 0,95. O padrão de 2023 sugere um crescimento da vegetação arbórea comparado à 2018, e isso pode ser possível recuperação da vegetação após um estresse térmico ou hídrico. Embora as imagens de 2018 e 2023 tenham sido capturadas no mesmo período do ano (mês de

abril), fatores como a variação nos padrões de precipitação, temperatura ou outros elementos ambientais ao longo dos anos podem ter influenciado esse aumento no vigor da vegetação observado em 2023. Dessa forma, os menores valores de NDVI em 2018 sugere um cenário de vegetação arbórea mais fragilizada, possivelmente, devido à estresse hídrico ou outros fatores climáticos adversos comparado ao observado em 2023.

Figura 14 - Histograma dos NDVIs: (a) histograma NDVI 2018; (b) histograma NDVI 2023; (c) histograma NDVI 2023-2018.



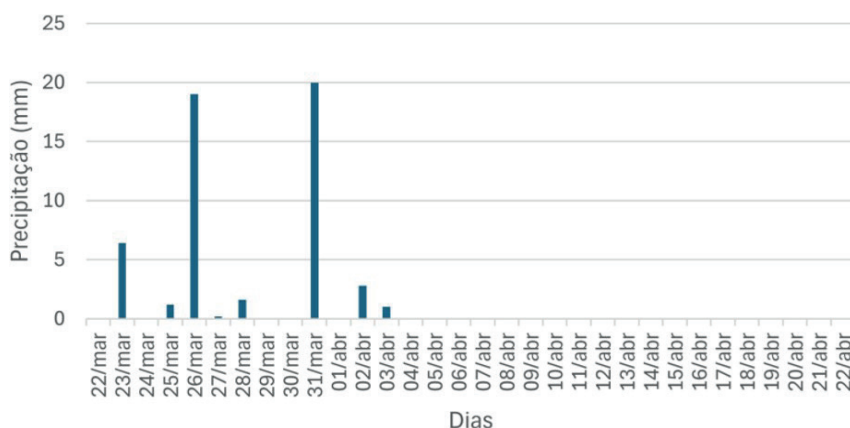
Fonte: Os autores, 2025.

O histograma da diferença de NDVI entre 2023 e 2018 (Figura 14c), revela uma maior frequência de valores positivos entre 0,1 e 0,25, corroborando a elevação no vigor da vegetação de 2018 para 2023. Isso reforça a hipótese de crescimento ou recuperação da vegetação, sugerindo que, mesmo sendo imagens da mesma estação do ano, houve um aumento no vigor das áreas de vegetação entre os dois períodos, possivelmente devido a fatores ambientais

ou de manejo que favoreceram o crescimento da vegetação em 2023. Segundo os dados disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025), observou-se um aumento na precipitação nos 30 dias anteriores à data de aquisição das imagens *PlanetScope*. Os gráficos apresentados nas Figuras 15 e 16 mostram os dados das precipitações durante esse período.

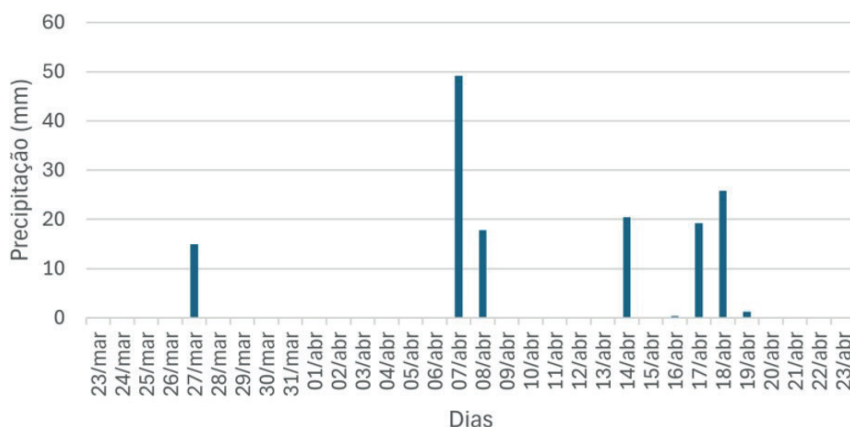
Os dados de precipitação confirmam que as chuvas podem ter sido um dos fatores que influenciaram para um maior vigor da vegetação em 2023. Para o ano de 2018, o último registro de precipitação ocorreu no dia 03/04/2018, com 1 mm de chuva, cerca de 19 dias antes da captura da imagem *PlanetScope*. Esse intervalo de tempo, com uma precipitação relativamente baixa e distante da data da imagem, pode ter contribuído para o menor vigor da vegetação observada em 2018. Em contraste, para o ano de 2023, o último dia de precipitação foi apenas 4 dias antes da captura da imagem, com uma precipitação de aproximadamente 67,2 mm entre os dias 14/04/2023 e 19/04/2023. Essa precipitação pode ter fornecido a umidade necessária para o crescimento e recuperação da vegetação, explicando o maior vigor observado em 2023. Esses dados sugerem que a disponibilidade recente de água, especialmente em 2023, desempenhou um papel importante no aumento do vigor da vegetação entre os dois anos analisados.

Figura 15 - Valores de precipitação (mm) no município de Presidente Prudente – SP, entre os dias 22/03/2018 e 22/04/2018.



Fonte: Os autores, 2025.

Figura 16 - Valores de precipitação (mm) no município de Presidente Prudente – SP, entre os dias 23/03/2023 e 23/04/2023.



Fonte: Os autores, 2025.

CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou a capacidade dos algoritmos Random Forest e Support Vector Machine na classificação de regiões arbóreas urbanas em imagens multiespectrais *PlanetScope*, para os anos de 2018 e 2023, no município de Presidente Prudente - SP. Os resultados mostraram que, de maneira geral, ambos os modelos são eficientes na tarefa proposta, pois as métricas ponderadas foram altas. No entanto, a capacidade dos modelos é reduzida quando se analisa o desempenho por classe, especialmente para a classe de interesse que é a classe 'árvore'.

Ainda que estratégias possam ser aplicadas para aprimorar os resultados da classe 'árvore', por exemplo, com o aumento dos dados de treinamento provenientes de imagens de diferentes locais e datas, os experimentos deste trabalho são essenciais para evidenciar a complexidade do problema enfrentado pelos algoritmos. Em estudos de mapeamento de vegetação arbórea em cidades, é esperado encontrar dificuldades devido à complexidade dessas áreas. Fatores como a variação estrutural urbana e as diferenças no tipo e na densidade da vegetação tornam a tarefa mais desafiadora.

A análise temporal, que comparou os anos de 2018 e 2023, indicou um aumento no vigor da vegetação em 2023, refletido nas diferenças dos histogramas de NDVI, e isso pode estar associado à diferença de precipitação entre

esses dois períodos. Esses achados apontam para um crescimento ou recuperação da vegetação no ano de 2023, o que é relevante para o monitoramento de vegetação em áreas urbanas.

Os resultados deste estudo contribuem para o entendimento da saúde e monitoramento de regiões arbóreas urbanas, especialmente quando analisados em combinação com dados ambientais, como a precipitação. Contudo, as limitações encontradas na classificação da vegetação arbórea indicam que há potencial para aprimorar os métodos empregados, abrindo oportunidades para futuras pesquisas e desenvolvimentos na área.

Agradecimentos

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida e incentivo à ciência. Agradecemos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro mediante os processos 305814/2023-0; 403213/2023-1; 135614/2024-4 e 308481/2022-4.

REFERÊNCIAS

BREIMAN, L. Random Forests. *Machine Learning*, Holanda, v. 45, 5-32, 2001.<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

CORTES, C., & VAPNIK, V. Support-vector networks. *Machine Learning*, Holanda, v. 203, 273-297, 1995. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidade e Estados. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/presidente-prudente.html>>. Acesso em: 17 jun. 2025a.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Malha de Setores Censitários. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/26565-malhas-de-setores-censitarios-divisoes-intramunicipais.html?edicao=41826&t=acesso-ao-produto>>. Acesso em: 17 jun. 2025b.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia: Tempo. Disponível em: <<https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A707>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

LARY, D. J. Artificial Intelligence in Geoscience and Remote Sensing. *Geoscience and Remote Sensing New Achievements*. InTech, 2010. <https://doi.org/10.5772/9104>

MOURATIDIS, K. Urban planning and quality of life: A review of pathways linking the built environment to subjective well-being. *Cities*, v. 115, 103229, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2021.103229>

ONISHI, M., & ISE, T. Explainable identification and mapping of trees using UAV RGB image and deep learning. *Scientific Reports*, v. 11, 903, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79653-9> PLANET. Planet Imagery Product Specifications. 2019. Disponível em: <<https://assets.planet.com/docs/combined-imagery-product-spec-april-2019.pdf>>. Acesso em: 17 jun. 2025.

SAAD, M. H. M. *et al.* State of the Art of Urban Smart Vertical Farming Automation System: Advanced Topologies, Issues and Recommendations. *Electronics*, v. 10(12), 1422, 2021. <https://doi.org/10.3390/electronics10121422> SHAFIQUE, M. *et al.* An overview of carbon sequestration of green roofs in urban areas. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 47, 126515, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126515>

ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO AOS JARDINS TERAPÊUTICOS: ESTRATÉGIAS DE CUIDADO PARA PESSOAS IDOSAS COM DEMÊNCIA

Ciro Férrer Herbster Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

O acelerado envelhecimento populacional, somado às crescentes vulnerabilidades socioespaciais e aos impactos da crise climática, demanda soluções integradas que promovam o envelhecimento sustentável. O aumento de pessoas idosas com demência, aliado ao despreparo ou à ausência de agentes do cuidado, agrava esse cenário, especialmente em contextos urbanos marcados por desigualdades. No Brasil, as projeções apontam que, até 2029, o número de pessoas com 60 anos ou mais ultrapassará o de crianças e adolescentes de 0 a 14 anos e, até 2050, estima-se que 5,7 milhões da população idosa seja diagnosticada com algum tipo de demência. Ambientes externos, como jardins terapêuticos, têm sido implementados em instituições de cuidados, porém, muitas vezes, não consideram adequadamente os desafios sensoriais vivenciados por pessoas com demência, podendo comprometer seu bem-estar e cognição. Este estudo investigou a relação entre objetivos terapêuticos e qualidades projetuais de jardins sensoriais ao ar livre por meio de uma revisão integrativa da literatura (2015–2025) nas áreas de gerontologia ambiental, neurociência cognitiva e paisagem urbana. Dos 4.865 artigos inicialmente encontrados, 12 atenderam aos critérios de inclusão. A análise resultou na formulação de um modelo de projeto com diretrizes terapêutico-sensoriais aplicáveis ao espaço urbano. Constatou-se que jardins terapêuticos sensoriais, quando bem planejados, não apenas favorecem a saúde mental e a funcionalidade de pessoas com demência, mas também contribuem para a formação de microclimas que mitigam o estresse térmico urbano. Assim, estes espaços integram cuidado, sustentabilidade e adaptação climática, promovendo cidades mais inclusivas e resilientes ao envelhecimento.

Palavras-chave: Envelhecimento; demência; sustentabilidade; jardins terapêuticos; espaço urbano.

ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL: DESAFIOS ATUAIS E FUTUROS

A sustentabilidade consolidou-se como eixo estruturante do desenvolvimento nas sociedades contemporâneas. Desde sua formulação inicial a partir de 1980, com a criação da Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento no Encontro de Nairóbi (1982), junto à publicação do Relatório Nosso Futuro Comum (1987), foi possível chegar a uma definição de desenvolvimento sustentável, compreendido como “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem às suas próprias necessidades” (KRONEMBERGER, 2011, p.21). No Brasil, a Constituição Federal de 1988, inspirada nessas novas ideias, incorporou outras questões relativas à proteção ambiental e ao desenvolvimento sustentável, tais como: a justiça social, a solidariedade, a erradicação da pobreza, a redução das desigualdades sociais e a igualdade de gênero e raça (KRONEMBERGER, 2011). Destaca-se, ainda, o avanço constitucional na garantia de direitos sociais às pessoas idosas, ao estabelecer, de modo explícito, o dever solidário do Estado, da família e da sociedade na proteção desse grupo etário (BRASIL, 2016).

Antes da promulgação da Constituição de 1988, as iniciativas governamentais voltadas às pessoas idosas restringiam-se, majoritariamente, ao campo previdenciário, com ênfase em benefícios econômicos e aposentadorias (FERNANDES; SOARES, 2012). O Estatuto da Pessoa Idosa, promulgado em 2003 e fundamentado na Política Nacional do Idoso (1994), estabeleceu o envelhecimento como tema prioritário nas políticas sociais, assegurando direitos fundamentais relacionados à saúde física e mental, à vida social e moral, à liberdade e à dignidade. Além disso, o Estatuto prevê sanções para condutas que atentem contra a integridade da pessoa idosa (BRASIL, 2003). Tais diretrizes constituem a base normativa e orientadora para a promoção de um envelhecimento ativo, saudável e sustentável, conforme propõe a Estratégia Brasil Amigo da Pessoa Idosa (BRASIL, 2018). Esta iniciativa tem como objetivo apoiar municípios e comunidades na implementação de ações voltadas ao desenvolvimento humano e à valorização do envelhecimento, buscando enfrentar vulnerabilidades que comprometem a qualidade de vida na velhice e dificultam a construção de trajetórias de envelhecimento com plenitude e equidade (BRASIL, 2018). Nesse

sentido, o envelhecimento da população brasileira tornou-se uma dimensão fundamental das discussões sobre sustentabilidade, exigindo abordagens que integrem as esferas social, econômica e ambiental.

A literatura especializada no envelhecimento evidencia uma diversidade de concepções voltadas à promoção da qualidade de vida na velhice, refletindo a centralidade da experiência humana no debate sobre desenvolvimento sustentável (ARANCO *et al.*, 2022; IECOVICH, 2014). Entre essas noções, destacam-se: envelhecimento ativo, bem-sucedido, produtivo, positivo, saudável e sustentável (WU; KAUSHIK, 2015). O envelhecimento saudável, por exemplo, não se limita aos aspectos biomédicos, como a ausência de doenças, mas compreende dimensões subjetivas, funcionais e relacionais, como a autonomia, a participação social e a percepção de bem-estar (OMS, 2015). Desde 2002, o envelhecimento ativo foi incorporado ao marco político da Organização Mundial da Saúde (OMS), com ênfase na permanência da saúde física e na participação em atividades culturais, sociais, econômicas e espirituais. Grazuleviciute-Vileniske *et al.* (2020) destaca a importância das redes de apoio, do convívio significativo e do ambiente físico na promoção da saúde mental e da inclusão de pessoas idosas. O espaço urbano, por sua vez, deve favorecer a acessibilidade, a mobilidade e a permanência de pessoas idosas em espaços públicos, o que implica um compromisso ético e técnico com as normativas de inclusão (GRAZULEVICIUTE-VILENISKE *et al.*, 2020).

No plano econômico e ambiental, os desafios habitacionais exigem respostas que superem a lógica da institucionalização em larga escala, reconhecidamente insustentáveis. O custo de implantação e manutenção de Instituições de Longa Permanência para Idosos (ILPIs), assegurando simultaneamente o cumprimento de normas e padrões mínimos de cuidado, é significativamente elevado — superando a capacidade financeira da maior parte da população idosa residente em países de baixa e média renda (LLOYD-SHERLOCK *et al.*, 2021). A tendência crescente é a valorização do envelhecimento no lugar (em inglês, *aging in place*) — conceito que passou a ser promovido a partir de 1994 pela Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Envelhecer no lugar expressa o desejo de permanecer no ambiente doméstico habitual, com dignidade, autonomia e vínculos preservados. Conforme a OMS,

a grande maioria das pessoas idosas preferem permanecer nas suas próprias casas ou viver com familiares, sempre que possível (OMS, 2015).

Contudo, a permanência no domicílio exige adequações arquitetônicas e urbanísticas, bem como apoio financeiro e redes de cuidado articuladas em nível comunitário. Autores como Carr *et al.* (2013) e Carletto e Cambiaghi (2008) propõem o Design Universal como caminho para qualificar a moradia e assegurar condições de vida digna e sustentável para a população idosa no espaço urbano. Outros estudos, como os de Albuquerque e Santiago (2025) e de Diniz *et al.* (2022), destacam o potencial da caminhabilidade e da acessibilidade urbana como estratégia para adequar os territórios às necessidades das populações que envelhecem.

Os diferentes modelos de envelhecimento analisados — ativo, saudável e no lugar — dialogam com os princípios do desenvolvimento sustentável. Enquanto os dois primeiros enfatizam o bem-estar subjetivo e a participação social, o envelhecimento no lugar articula sustentabilidade econômica e ambiental com o pertencimento e os vínculos comunitários. Em comum, todos eles reconhecem o papel central do ambiente construído na promoção do envelhecimento digno e integrado à comunidade.

Política Nacional de Cuidado Integral às Pessoas com Doença de Alzheimer e Outras Demências

A transição demográfica acelerada em curso no Brasil, marcada pelo crescimento expressivo da população com 60 anos ou mais, tem implicado profundas transformações na organização dos serviços públicos, sobretudo nas áreas da saúde, do lazer e da assistência social, que demandam expansão e readequação para atender a esse novo perfil etário. Estima-se que, nas próximas duas décadas e meia, o número de pessoas idosas no país dobre — um processo que, na França, levou aproximadamente 145 anos para que a proporção da população idosa aumentasse de 10% para 20% (MREJEN; NUNES; GIACOMIN, 2023). Em 2022, o Brasil alcançou a marca de 15,6% de pessoas idosas em sua população total, representando um crescimento de 56% em relação ao Censo de 2010 (IBGE, 2022).

Esse fenômeno está diretamente relacionado à transição epidemiológica, caracterizada pela diminuição das doenças infecciosas e pelo crescimento das doenças crônicas não transmissíveis (DCNTs). Tal processo decorre, principalmente, do aumento da expectativa de vida, impulsionado pelas transformações nas políticas públicas e pelos investimentos progressivos no sistema de saúde (FRANCISCO; BACURAU; ASSUMPÇÃO, 2022). Entre os anos de 2020 e 2040, a demanda por cuidados voltados a crianças deverá registrar uma redução de aproximadamente 20,5%, ao passo que, para a população idosa, projeta-se um aumento expressivo de 130,9% (CAMARANO, 2022).

Além disso, conforme a Pesquisa Nacional de Saúde (PNS) de 2019, quase metade dos adultos e das pessoas idosas no Brasil apresenta uma ou mais DCNTs. Entre elas, 13,3% relataram ter deixado de realizar atividades habituais em decorrência de problemas de saúde. As mulheres são mais afetadas do que os homens, e indivíduos com 80 anos ou mais têm uma probabilidade três vezes maior de desenvolver DCNTs em comparação com aqueles na faixa dos 60 anos. A demanda por cuidado é mais acentuada entre os idosos em situação de pobreza e entre aqueles com menor nível de escolaridade. Estima-se que 71,5% das pessoas idosas no Brasil dependem exclusivamente dos serviços prestados no Sistema Único de Saúde (IBGE, 2021).

Nesse sentido, o aumento de pessoas idosas eleva a probabilidade do aumento das síndromes demenciais¹. Estima-se que 55 milhões de pessoas convivam com demência no mundo e que este número triplique até 2050. No Brasil e na América Latina, espera-se um aumento de 200% no número de casos, considerado a sétima principal causa de morte no mundo e, em um número crescente de países, constata-se como a principal (BERTOLA *et al.*, 2023). Atualmente, cerca de 100 mil novos casos de brasileiros com demência são diagnosticados por ano, sendo que 55% deles podem ser considerados Doença de Alzheimer (DA). Conforme o Relatório Nacional sobre a Demência (ReNaDe), cerca de 8,5%

¹ Síndromes demenciais são condições clínicas caracterizadas por um declínio progressivo e adquirido das funções cognitivas — como memória, linguagem, atenção, raciocínio, orientação espacial e julgamento — que comprometem a autonomia e as atividades cotidianas da pessoa. Esse conjunto de sintomas decorre de doenças neurodegenerativas ou de lesões cerebrais diversas e afeta, de maneira significativa, o funcionamento social, ocupacional e afetivo do indivíduo (BERTOLA *et al.*, 2023).

da população com 60 anos ou mais convivem com a doença, representando um número aproximado de 1,8 milhão de casos. Até 2050, a projeção é que 5,7 milhões de pessoas sejam diagnosticadas no país (BRASIL, 2024a). O estudo concluiu que a doença é mais prevalente entre as mulheres, com 9,1% dos diagnósticos. Dentre os homens avaliados, foram evidenciados 7,7% de casos entre a população masculina com 60 anos ou mais (BRASIL, 2024a).

Com o objetivo de estruturar um plano de ação integrada entre o poder público, os prestadores de serviço, a comunidade acadêmica e a sociedade civil, foi sancionada, em 4 de junho de 2024, a Lei nº 14.878/2024, que institui a Política Nacional de Cuidado Integral às Pessoas com Doença de Alzheimer e Outras Demências. A nova legislação estabelece princípios e diretrizes para o cuidado dessas condições e determina que o Ministério da Saúde promova campanhas de informação e conscientização em unidades de saúde de diferentes níveis, incluindo clínicas, hospitais públicos e privados, postos de saúde, unidades básicas e de pronto atendimento (BRASIL, 2024b).

DEMÊNCIA, JARDINS TERAPÊUTICOS E ESPAÇO URBANO: PERSPECTIVAS DE CUIDADO MULTIDISCIPLINAR

No contexto da demência, os prejuízos de memória comprometem o funcionamento sensorial, especialmente nos estágios mais avançados. A progressiva perda sensorial acentua o declínio cognitivo, dificulta a interação com o ambiente e tende a favorecer o isolamento social, manifestando-se tanto em espaços internos quanto externos (BERTOLA *et al.*, 2023; DUARTE; JACINTO, 2023).

Como extensão significativa do ambiente construído, os jardins, sejam eles sensoriais ou terapêuticos, influenciam diretamente o desempenho funcional, as capacidades cognitivas e sensoriais, além das interações físicas e sociais entre pessoas de todas as idades (COOPER-MARCUS; BARNES, 1995; 1999). Nesse sentido, o planejamento de áreas externas deve considerar as necessidades específicas de pessoas idosas com demência, bem como de seus cuidadores e familiares, oferecendo condições que favoreçam a realização de atividades com segurança e dignidade.

Embora haja um aumento expressivo nas pesquisas voltadas a ambientes externos acessíveis e inclusivos, ainda se observa uma lacuna entre os objetivos

terapêuticos formulados por especialistas e as qualidades projetuais efetivamente incorporadas aos jardins sensoriais, sobretudo no que diz respeito às demandas sensoriais por parte dos usuários e às especificidades do espaço ao ar livre, como a topografia, o clima, a vegetação nativa, dentre outras características ambientais (MURRONI *et al.*, 2021).

Diante disso, objetiva-se investigar a relação entre os atributos de design presentes em jardins terapêuticos e as necessidades biopsicossociais de pessoas com demência. Para isso, o estudo parte da análise das características clínicas e comportamentais associadas à demência, bem como dos desafios impostos ao ambiente construído. Na sequência, são identificados, com base em uma abordagem teórica e prática, os objetivos terapêuticos e os princípios de projeto aplicáveis aos elementos paisagísticos.

A metodologia adotada consistiu em uma Revisão Integrativa da Literatura (RIL), proposta por Botelho, Cunha e Macedo (2011), abrangendo publicações entre 2015 e 2025. Foram selecionados artigos revisados por pares nas áreas de gerontologia ambiental, neurociência cognitiva e paisagismo urbano. Do total de 4.865 estudos inicialmente identificados, apenas 12 atenderam aos critérios de inclusão estabelecidos. Com base na análise, buscou-se propor um modelo de projeto para jardins terapêuticos direcionado às pessoas com demência, passível de integração em espaços urbanos como áreas de lazer inclusivas e sensorialmente adequadas.

Demências: tipologias, sintomas e necessidades do cuidado

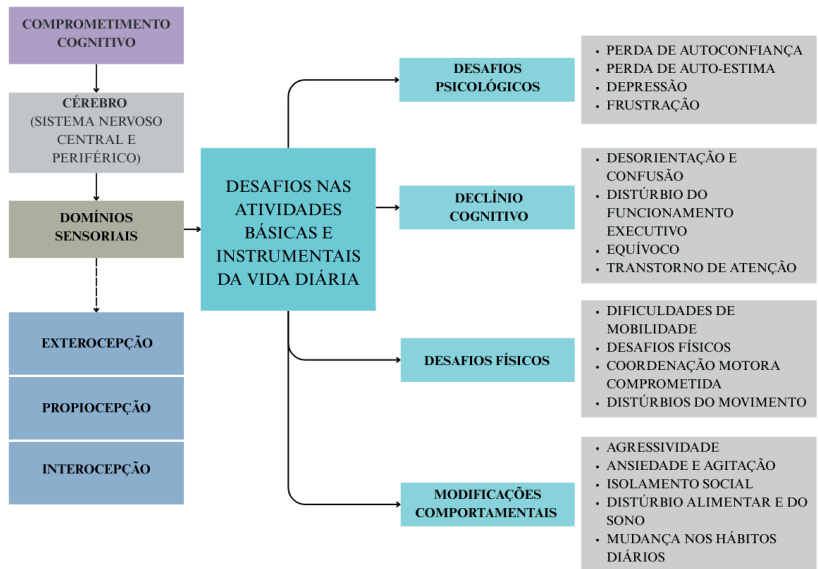
A demência é uma síndrome neurodegenerativa progressiva que engloba um conjunto de doenças que afetam o funcionamento cerebral, comprometendo principalmente as funções cognitivas (LIVINGSTON *et al.*, 2024). Seus sintomas incluem alterações de memória, dificuldades de comunicação, concentração, julgamento, organização e planejamento, além de mudanças de comportamento e humor. Os efeitos da demência variam entre os indivíduos, dependendo de fatores como a personalidade prévia e o modo como a doença afeta o cérebro (LIVINGSTON *et al.*, 2024). Existem diferentes tipologias de demência, sendo a Doença de Alzheimer a forma mais prevalente, correspondendo a aproximadamente 50% a 70% dos casos no mundo. A Demência Vascular representa a

segunda causa mais frequente, abrangendo entre 10% e 35% dos diagnósticos. Em seguida, destacam-se a Demência com Corpos de Lewy e a Demência Fronto-Temporal, cada uma respondendo por cerca de 5% dos casos, configurando quadros clínicos distintos tanto em sintomatologia quanto em progressão (BERTOLA *et al.*, 2023; LIVINGSTON *et al.*, 2024).

Conforme Hong e colaboradores (2024), as pessoas idosas com demência, especialmente em estágios mais avançados, tendem a apresentar o comprometimento de múltiplos domínios cognitivos, resultando em alterações significativas na percepção sensorial — incluindo as esferas exteroceptiva (visão, audição, olfato, paladar e tato), interoceptiva (captação de sinais internos do corpo) e proprioceptiva (consciência da posição e do movimento do corpo no espaço). O estudo de Xiao *et al.* (2021) demonstra que a redução da acurácia funcional desses sistemas pode desencadear uma série de manifestações clínicas, como alucinações, desorientação espacial, instabilidade postural e dificuldades na realização das atividades básicas da vida diária (Xiao *et al.*, 2021).

Tais disfunções comprometem a interação com o ambiente e as relações interpessoais, ampliam a dependência de cuidados especializados e afetam diretamente a autonomia e a qualidade de vida da pessoa idosa com demência. Conforme sintetizado na Figura 1, tais alterações repercutem de maneira significativa no comportamento e na forma como as pessoas com demência experienciam os espaços físicos.

Figura 1 - Desafios diários das pessoas idosas com demência decorrentes do comprometimento cognitivo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Hong *et al.* (2024) e Xiao *et al.* (2021).

De acordo com a revisão sistemática de Mangili *et al.* (2023), os comportamentos de pessoas com demência são influenciados pelas interações com o ambiente físico, social e cultural. Assim, intervenções terapêuticas que atuam sobre fatores ambientais modificáveis tendem a ser mais eficazes. No âmbito da arquitetura e do urbanismo, busca-se aplicar evidências científicas no planejamento de espaços habitacionais que respeitem as necessidades cognitivas e funcionais das pessoas com demência. A presença de estímulos sensoriais ajustados pode favorecer a participação em atividades diárias e sociais, reduzir situações de estresse e melhorar as interações no cotidiano, beneficiando também os cuidadores (FLEMING; ZEISEL; BENNETT, 2020).

O Quadro 1 descreve as modificações neurofisiológicas decorrentes da demência em cada domínio sensorial abordado anteriormente. Tais modificações demonstram a importância do projeto de ambientes sensorialmente responsivos, a exemplo dos jardins terapêuticos, capazes de mitigar os efeitos das modificações sensoriais e promover experiências significativas e seguras para pessoas idosas com demência (HONG *et al.*, 2024; MANGILI *et al.*, 2023; XIAO *et al.*, 2021).

Quadro 1 - Modificações decorrentes da demência em cada domínio sensorial.

SISTEMA SENSORIAL	SISTEMA SENSORIAL
Visual	A perda visual na demência compromete a percepção e interpretação das informações visuais, gerando dificuldades de reconhecimento, percepção de profundidade, confusão espacial, alterações na percepção de cores, desorientação, dificuldades de mobilidade, alucinações visuais e alterações no ritmo circadiano.
Audição	A hipersensibilidade sonora é comum, tornando ruídos cotidianos fontes de grande desconforto. Sons de fundo podem interferir na comunicação, causar desorientação, ansiedade, frustração e alucinações auditivas. O ambiente acústico exerce forte influência sobre o comportamento de pessoas com demência.
Tátil	A sensibilidade ao toque pode estar aumentada ou diminuída, dificultando a interação física com o ambiente. A perda dessa conexão tátil pode resultar em isolamento social e afastamento do ambiente familiar.
Olfativo	A disfunção olfativa altera a percepção de odores agradáveis e sinais de alerta (como alimentos estragados, fumaça ou vazamento de gás), afetando o bem-estar, a segurança e o engajamento em atividades cotidianas.
Gustativo	Frequentemente associado ao olfato, o comprometimento do paladar pode alterar a percepção de sabores de alimentos e bebidas, afetando negativamente a alimentação e a qualidade de vida.
Proprioceptivo	Redução da estabilidade postural, aumentando o risco de quedas; dificuldade na percepção do movimento corporal e da orientação espacial; comprometimento na coordenação motora fina, interferindo em atividades como vestir-se, alimentar-se ou manusear objetos; desorganização do esquema corporal, dificultando a execução de movimentos automatizados.
Interoceptivo	Alterações na percepção da dor (hipo ou hipersensibilidade), dificultando o reconhecimento e a verbalização de desconfortos; perda da noção de fome ou sede, favorecendo quadros de desnutrição ou desidratação; redução da consciência corporal visceral, impactando no controle esfincteriano; dificuldade em expressar desconfortos fisiológicos, o que pode contribuir para comportamentos considerados agitados ou inadequados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Hong *et al.*, (2024), Mangili *et al.* (2023) e Xiao *et al.* (2021).

Jardins Terapêuticos: qual o potencial restaurativo dos ambientes naturais?

Os pesquisadores Cooper-Marcus e Barnes (1995; 1999) introduziram o conceito de *Healing Gardens*, compreendidos como ambientes planejados com rigor técnico e sensível atenção aos aspectos psicossociais, voltados à promoção do bem-estar, à recuperação da saúde e ao alívio físico e emocional. Em seus estudos, os autores delinearam os princípios fundamentais de projeto desses jardins terapêuticos, destacando a necessidade de acessibilidade universal, a escolha criteriosa de plantas que estimulem os sentidos e favoreçam a reconexão com a natureza, a inclusão de espaços destinados a atividades como jardinagem, contemplação, meditação e exercícios, além da criação de áreas que estimulem

a convivência e propiciem experiências de relaxamento e redução do estresse (COOPER-MARCUS; BARNES, 1995;1999).

A expressão *Healing Garden* tornou-se amplamente difundida em contextos acadêmicos, especialmente em referência aos jardins localizados em hospitais e unidades terapêuticas. No entanto, Hartig e Cooper-Marcus (2006) argumentam que a expressão “cura” pode ser inadequada, uma vez que sugere uma capacidade intrínseca do ambiente de curar, quando, na realidade, esses espaços atuam como complemento aos tratamentos médicos. Por isso, propõem o uso de termos como “jardim terapêutico” ou “jardim restaurativo”, que expressam de forma mais precisa o papel desses ambientes no apoio ao processo de recuperação e promoção da saúde.

O termo “terapêutico”, embora abrangente, refere-se, de modo geral, à promoção do bem-estar físico ou psicológico a partir de experiências consideradas benéficas aos indivíduos. De acordo com Sillmann, Marques e Fabrino (2024), os espaços exteriores terapêuticos correspondem a ambientes naturais ou seminaturais capazes de restabelecer a conexão das pessoas com o meio ambiente, contribuindo para a manutenção ou recuperação da saúde física e mental. Tal relação, por sua vez, repercute positivamente no bem-estar geral. Hartig e Cooper-Marcus (2006) acreditam que esses espaços podem assumir diferentes configurações, a depender das demandas dos usuários, incluindo: áreas destinadas a pessoas com deficiência, pessoas idosas, ambientes hospitalares, jardins voltados ao público infantil, hortas comunitárias, ou ainda jardins projetados com foco em condições clínicas específicas, como pessoas idosas com demência, a exemplo da Doença de Alzheimer, ou com Doença de Parkinson (HARTIG; COOPER-MARCUS, 2006).

No contexto lusófono, é comum o uso da expressão “jardim sensorial”, frequentemente associada a espaços que favorecem experiências multissensoriais por meio de estímulos táteis, visuais, auditivos, olfativos e gustativos oriundos da natureza. No entanto, diferentemente dos jardins terapêuticos, esses espaços nem sempre possuem finalidade clínica, podendo ter propósitos estritamente pedagógicos ou ornamentais (SILLMANN; MARQUES; FABRINO, 2024).

Destaca-se que os jardins terapêuticos não se destinam exclusivamente a pessoas em condição de cuidado, mas também a indivíduos saudáveis, de diferentes faixas etárias, corpos, culturas e identidades de gênero. Esses espaços

promovem a sociabilidade entre os usuários, ao mesmo tempo em que oferecem oportunidades de contemplação, relaxamento e conforto tanto para visitantes quanto para profissionais que atuam no local (HARTIG; COOPER-MARCUS, 2006). Assim, os jardins terapêuticos podem assumir diferentes configurações e escalas, adaptando-se às necessidades dos contextos residenciais, institucionais, comunitários ou urbanos em que estão inseridos.

As evidências sobre os impactos positivos do contato com a natureza na saúde humana têm se multiplicado, destacando o papel central da interação com plantas. Diversos estudos têm elucidado os mecanismos que sustentam essa relação, abrangendo desde a simples observação de paisagens naturais — mesmo por janelas — até a participação ativa em práticas como a jardinagem e a horticultura terapêutica. Os efeitos dessas interações podem ser agrupados em cinco dimensões principais: cognitiva, comportamental, psicológica, física e social (Quadro 2). Entre os ganhos psicológicos, destacam-se a melhora do bem-estar subjetivo (STEPANSKY; DELBERT; BUCEY, 2022), a redução dos níveis de cortisol (SOUTER-BROWN; HINCKSON; DUNCAN, 2021), a indução de estados de relaxamento e, sobretudo, a mitigação do estresse (YOUNG *et al.*, 2020).

Quadro 2 - Benefícios proporcionados pelos jardins terapêuticos.

BENEFÍCIOS PROPORCIONADOS PELOS JARDINS TERAPÊUTICOS	
Cognitivos	Estímulo às funções cognitivas; Promoção da autonomia; Ativação multissensorial; Apoio à tomada de decisão; Presença de figuras e elementos familiares; Estímulo ao mapeamento mental e orientação espacial; Reforço da identidade pessoal; Facilitação da comunicação interpessoal; Recuperação da memória espacial e topográfica.
Psicológicos	Promoção de privacidade, tanto para familiares/cuidadores quanto para as pessoas idosas com demência; Reforço da noção de propriedade e controle sobre o espaço; Fomento ao sentimento de pertencimento; Fortalecimento da autoestima e autoconfiança; Estímulo à evocação de memórias (reminiscência).
Físicos	Oferta de ambientes seguros e protegidos; Suporte à mobilidade independente; Promoção do relaxamento físico e mental; Regulação microclimática adequada; Estímulo à prática de exercícios físicos leves; Implementação de trilhas acessíveis para caminhada; Disponibilização de áreas sombreadas e estruturas de abrigo; Integração de estratégias de sustentabilidade ambiental; Incentivo a atividades físicas adaptadas.
Comportamentais	Apoio a uma ampla gama de habilidades funcionais; Estímulo à regulação emocional e melhora do humor; Oferta de atividades significativas e prazerosas; Valorização de interesses pessoais e passatempos; Estímulo à orientação e reconhecimento espacial; Inclusão de atividades hortícolas terapêuticas; Incentivo a tarefas cotidianas familiares e compreensíveis.

BENEFÍCIOS PROPORCIONADOS PELOS JARDINS TERAPÊUTICOS	
Sociais e Interativos	Integração dos ambientes interno e externo; Estímulo à observação e interação com a fauna local; Promoção da participação ativa e do engajamento social; Oferta de atividades estruturadas com suporte à interação; Estímulo à socialização espontânea e mediada; Disponibilização de mobiliário acessível e confortável; Valorização do trabalho colaborativo e atividades em grupo.

Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Stepansky, Delbert e Bucey (2022), Souter-Brown, Hinckson e Duncan (2021) e Young *et al.* (2020).

A diminuição do estresse pode ser observada por meio de alterações fisiológicas, como a redução da frequência cardíaca e dos níveis de cortisol. Souter-Brown, Hinckson e Duncan (2021) identificaram, por exemplo, que após trinta minutos de permanência em um jardim sensorial, os participantes apresentaram queda nos níveis de cortisol, além de relatar maior sensação de bem-estar e produtividade. De forma semelhante, Twohig-Bennett e Jones (2018) associaram a exposição à natureza à redução da pressão arterial, dos batimentos cardíacos e do hormônio do estresse. Do ponto de vista físico, os benefícios incluem a melhora do equilíbrio e da preservação do sistema locomotor, das articulações e da musculatura; melhor regulação da pressão arterial e da frequência cardíaca; além de diminuição da tensão muscular, ganhos na coordenação motora e manutenção das capacidades físicas (SOUTER-BROWN; HINCKSON; DUNCAN, 2021).

Han, Park e Ahn (2018) observaram que a horticultura terapêutica aplicada a pessoas idosas resultou em ganhos funcionais como maior força muscular, flexibilidade, agilidade, equilíbrio e resistência aeróbica. Além dos benefícios individuais, os jardins terapêuticos favorecem as interações sociais, fortalecem vínculos e promovem a inclusão intergeracional, a educação ambiental e práticas pedagógicas inclusivas (HAN; PARK; AHN, 2018). O ambiente terapêutico, quando devidamente projetado, contribuiu para o desenvolvimento de habilidades cognitivas, motoras e comunicativas de pessoas idosas com demência, especialmente em estágios iniciais, além de possibilitar privacidade e restauração atencional da rede de cuidado familiar.

Estudo de caso: *Longfor Yinian Apartment Rehabilitation Garden*

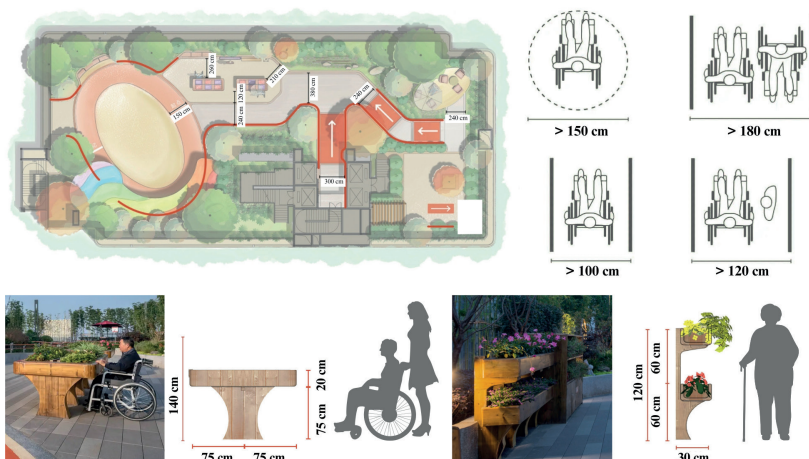
Após a análise dos antecedentes históricos, das funções e dos princípios que orientam o desenho de jardins sensoriais, o *Longfor Yinian Apartment Rehabilitation Garden* foi selecionado como estudo de caso por atender integralmente aos critérios técnicos e terapêuticos característicos dessa tipologia (GVL, 2025). Enquanto o Brasil contava com 15,6% de sua população composta por pessoas com 60 anos ou mais em 2022, a China já apresentava, em 2017, uma proporção de 17,3% de idosos (ONU, 2024).

Em ambos os contextos, observa-se uma tendência demográfica marcada pela diminuição nas taxas de natalidade, situando-se abaixo do nível de reposição populacional — estimado em 2,1 filhos por mulher, valor considerado necessário para garantir a estabilidade populacional entre gerações (ONU, 2024). Como consequência, há um aumento progressivo da população longeva, paralelamente à redução do número de potenciais cuidadores, sobretudo jovens e familiares, o que gera um desequilíbrio entre a demanda por cuidados e a disponibilidade de suporte intergeracional.

O projeto foi concebido em resposta às demandas de cuidado de pessoas idosas, com o propósito de promover a interação intergeracional e o aprendizado mútuo entre jovens profissionais da saúde e os residentes. Implantado no *Care Building*, da região de *Glorious City*, trata-se do primeiro empreendimento voltado ao cuidado de idosos do grupo *Chongqing Longfor Hengzhuo Property Development*. O jardim suspenso foi desenvolvido pelo escritório GVL+Dr. Zhang Ling a partir do conceito de “paisagem solidária”, incorporando princípios de sustentabilidade e acolhimento na proposta paisagística (GVL, 2025).

A zona destinada à terapia de jardinagem foi projetada com canteiros elevados em madeira, adaptados a diferentes níveis de mobilidade, incluindo o uso por pessoas cadeirantes. As plataformas de plantio variam em altura, alcançando até 1,20 metro, possibilitando a execução de atividades que estimulam os membros superiores e promovem o engajamento tátil, visual e olfativo (Figura 2). Uma fonte de irrigação manual integra a experiência, contribuindo para o contato direto com a natureza, o que favorece tanto o relaxamento quanto a estimulação cognitiva.

Figura 2 - Projeto de Acessibilidade implementado no *Chongqing Longfor Hengzhao Property Development Garden, China*.

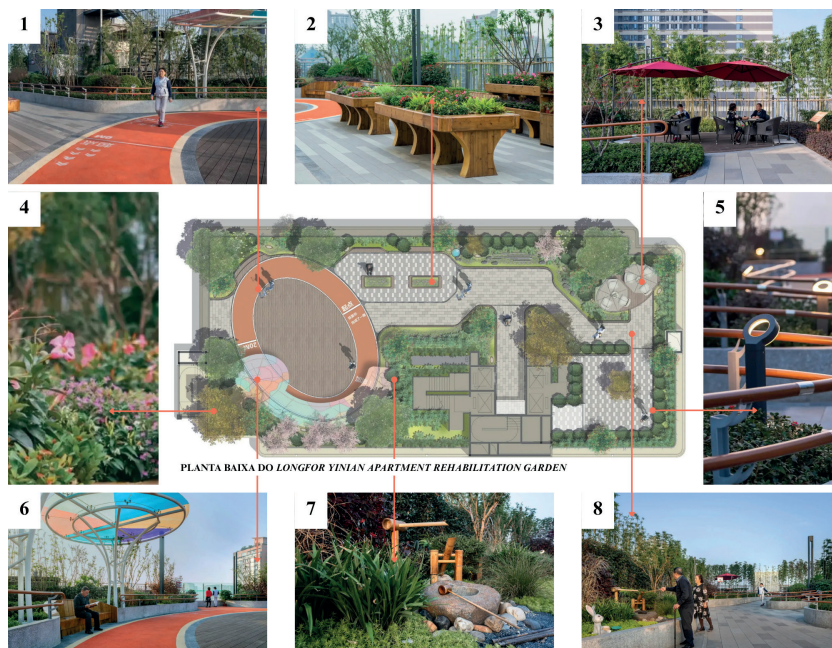


Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nas fotografias do GVL Group (2025).

O espaço de convivência foi estruturado para favorecer interações sociais espontâneas e significativas. Os assentos estão organizados em configuração triangular, o que permite conversas sem o confronto direto de olhares, facilitando a comunicação entre diferentes gerações. A integração visual com o restante do jardim amplia a percepção de acolhimento e pertencimento, reforçando os laços comunitários e familiares.

A acessibilidade foi cuidadosamente considerada em todas as etapas do projeto. O percurso é totalmente livre de degraus e rampas com largura mínima de 2,40 metros foram incluídas para permitir a circulação simultânea de cadeiras de rodas (Figura 4). Corrimãos duplos em duas alturas (0,75 m e 0,90 m) asseguram apoio seguro para pessoas com diferentes estaturas. Os pisos são antiderrapantes e os mobiliários, fixos e com bordas arredondadas, garantem conforto e prevenção de acidentes (Figura 3).

Figura 3 - Ambientes do projeto *Chongqing Longfor Hengzhuo Property Development Garden*. 1) Pista para caminhadas; 2) Hortas acessíveis; 3) Áreas sombreadas para encontros sociais; 4) Vegetação nativa e aromática; 5) Barras de apoio com duas alturas envolvida por iluminação elétrica devidamente planejada; 6) Pisos antiderrapantes; 7) Fontes sonoras de água; 8) Estímulo ao contato direto com a natureza local.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base nas fotografias do GVL Group (2025).

A estimulação multissensorial é outra diretriz a ser considerada. O jardim incorpora elementos naturais que ativam os cinco sentidos: aromas de plantas, sons da água e do canto dos pássaros, texturas táteis variadas e espécies com cores contrastantes. Essa composição sensorial favorece a ativação cognitiva, a redução do estresse e a criação de experiências significativas no cotidiano dos usuários (GVL, 2025).

Por fim, o projeto também contempla aspectos ligados à memória afetiva e ao cuidado humanizado. Elementos nostálgicos, como murais temáticos, estações de bonde e placas de ônibus, evocam lembranças do passado e servem como dispositivos terapêuticos (GLV, 2025). Esses recursos fortalecem a identidade dos idosos, estimulam a rememoração e contribuem para a construção de vínculos emocionais entre os usuários, cuidadores e visitantes.

Jardins Terapêuticos para Pessoas Idosas com Demência - Diretrizes de Projeto

Com base na análise anterior dos objetivos terapêuticos voltados à demência e das qualidades projetuais dos jardins sensoriais, observa-se uma relação recíproca entre esses objetivos e os atributos de design de jardins concebidos para pessoas com desafios sensoriais associados à demência. As diretrizes projetuais mais eficazes em relação a cada objetivo terapêutico foram identificadas no estudo de caso, conforme ilustrado na Figura 2 e 3. Tais diretrizes, descritas no Quadro 3, estão diretamente associadas aos objetivos terapêuticos e orientam os elementos que compõem o jardim, atendendo às diversas necessidades das pessoas com demência.

Quadro 3 - Diretrizes para projetos de jardins terapêuticos destinados para pessoas com demência.

DIRETRIZES PARA PROJETOS DE JARDINS TERAPÊUTICOS DESTINADOS PARA PESSOAS COM DEMÊNCIA	
DIRETRIZ	COMPONENTES A SEREM CONSIDERADOS NO PROJETO
Proporcionar um ambiente estimulante, equilibrado e controlado	. Redução de ruídos, considerando que o excesso de sons constitui um dos estímulos mais prejudiciais a pessoas com demência. Fontes de ruído incluem o tráfego, sons urbanos, equipamentos e pessoas. A mitigação pode ser obtida pela escolha de locais silenciosos e pelo uso de materiais que absorvam sons. . Consideração das características morfológicas dos elementos paisagísticos que estimulam os sentidos da visão e do tato — como cor, luz, textura, contraste, movimento, forma e tamanho — bem como aqueles que ativam os sentidos da audição, olfato e paladar, promovendo a integração multissensorial com o ambiente.
Segurança e proteção sem gerar desconforto ou sensação de confinamento	. Iluminação adequada, que favoreça a mobilidade e seja compatível com suas funções. . Utilização de cercas vivas, paredes vegetadas ou treliças com plantas em altura apropriada, que definem caminhos e áreas sem gerar sensação de aprisionamento. . Tecnologias não invasivas voltadas à segurança, como dispositivos de detecção e monitoramento.
Implementar elementos que favoreçam a orientação espacial	. Emprego de cores, contrastes e texturas para identificar caminhos, pisos e elementos. . Inserção de sinais e referências visuais para indicar a função dos espaços. . Evitar superfícies brilhantes ou reflexivas que possam causar confusão visual ou serem mal interpretadas. . Uso de sinalização adequada para indicar entradas, saídas e demais áreas. . Integração de elementos familiares à vivência dos usuários.
Engajar a participação em atividades cotidianas	. Criação de espaços para práticas terapêuticas ao ar livre, como horticultura, reminiscência, cuidado de animais e jardinagem. . Inclusão de áreas para atividades musicais com controle acústico. . Ambientes de convivência com características familiares e sons ou aromas evocativos. . Estímulo à atividade física por meio de caminhos seguros, antiderrapantes e acessíveis.

DIRETRIZES PARA PROJETOS DE JARDINS TERAPÊUTICOS DESTINADOS PARA PESSOAS COM DEMÊNCIA	
DIRETRIZ	COMPONENTES A SEREM CONSIDERADOS NO PROJETO
Estimular a autoconfiança e autoestima, mesmo que temporariamente	. Apresentar caminhos claros entre os espaços internos e externos. . Evitar percursos confusos e áreas inseguras. . Fomentar a interação social e o uso das habilidades preservadas.
Fomentar vínculos sociais com familiares e cuidadores	. Espaços adequados para encontros familiares em diferentes escalas, tanto íntimos quanto para grupos maiores. . Áreas pessoais e privativas que a pessoa possa utilizar de forma independente. . Ambientes compartilháveis e seguros que promovam atividades em conjunto com familiares. . Inclusão de elementos que reflitam a bagagem cultural da pessoa, valorizando suas referências identitárias no espaço.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base na revisão integrativa de literatura.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa tem como foco a investigação da relação entre o envelhecimento sustentável, os objetivos terapêuticos voltados ao cuidado de pessoas com demência e as qualidades projetuais requeridas para o desenvolvimento de jardins terapêuticos sensíveis às demandas desse público. Como resultado, o trabalho propõe um conjunto de diretrizes projetuais orientadas pela lógica terapêutica e sustentável, fundamentadas em princípios do design sensorial e voltadas à promoção da saúde e do bem-estar de pessoas idosas com demência.

Diante do envelhecimento acelerado da população brasileira e da crescente demanda por cuidados contínuos, sobretudo em áreas urbanas caracterizadas por desigualdades no acesso a serviços, essa proposta configura-se como uma estratégia complementar relevante. A inserção de ambientes terapêuticos na paisagem urbana pode favorecer o envelhecimento sustentável mediante à estimulação sensorial, cognitiva e motora benéfica aos usuários, ao fortalecimento de vínculos sociais e à redução da sobrecarga imposta aos sistemas formais e informais de cuidado.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, C. F. H.; SANTIAGO, Z. M. P. "Acessibilidade e Envelhecimento Saudável em Foco: A Promoção do Neurourbanismo e do Aprendizado em Comunidades Longevas mediada pelo Design Ativo". In: LOURENÇO, Amanda (org). **Educação e Políticas Públicas Hoje**. Deerfield Beach, FL: Pembroke Collins, 2025.
- ARANCO, N. *et al.* Aging in Latin America and the Caribbean: social protection and quality of life of older persons. **Publications Interamerican Development Bank (IDB) Org.**, 8 jun. 2022.
- BARRETT, P.; SHARMA, M.; ZEISEL, J. Optimal spaces for those living with dementia: principles and evidence. **Building Research & Information**, v. 47, n. 6, p. 734–746, 11 jul. 2018.
- BERTOLA, L. *et al.* Prevalence of Dementia and Cognitive Impairment No Dementia in a Large and Diverse Nationally Representative Sample: The ELSI-Brazil Study. **The Journals of Gerontology. Series A, Biological Sciences and Medical Sciences**, 2023.
- BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. DE A.; MACEDO, M. O Método da Revisão Integrativa nos Estudos Organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121, 2011.
- BRASIL. **Constituição de 1988**. Constituição da República Federativa do Brasil: Brasília: Senado Federal, Coordenação de Edições Técnicas, 2016.
- _____. **Lei nº 10.741, de 01 de outubro de 2003**. Dispõe sobre o Estatuto do Idoso e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 140, n. 192, p. 1–6, 1 out. 2003.
- _____. **Lei nº 14.878, de 4 de junho de 2024**. Institui a Política Nacional de Cuidado Integral às Pessoas com Doença de Alzheimer e Outras Demências. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 4 jun. 2024b.
- _____. Ministério da Saúde. Secretaria de Atenção Primária à Saúde. Departamento de Gestão do Cuidado Integral. **Relatório nacional sobre a demência (ReNaDe): Epidemiologia, (re)conhecimento e projeções futuras/** Ministério da Saúde, Secretaria de Atenção Primária à Saúde, Departamento de Gestão do Cuidado Integral. – Brasília : Ministério da Saúde, 2024a.
- _____. Ministério do Desenvolvimento Social. **Estratégia Brasil Amigo da Pessoa Idosa - Documento Técnico**. Caminhos para o envelhecimento ativo, saudável, cidadão e sustentável. Processo de integração de políticas públicas para que comunidades e cidades se tornem mais amigas da pessoa idosa. Brasília, DF, 2018.
- CAMARANO, Ana Amélia. Saúde Amanhã: Textos para Discussão 89. **Os idosos brasileiros: muito além dos 60?** Rio de Janeiro: Fiocruz/Presidência, 2022.
- CARLETTO, A. C.; CAMBIAGHI, S. **Desenho Universal: um conceito para todos**. São Paulo: Instituto Mara Gabrilli, 2008.
- CARR, K. *et al.* Universal Design: A Step toward Successful Aging. **Journal of Aging Research**, v. 2013, p. 1–8, 30 jan. 2013.
- COOPER-MARCUS, C.; BARNES, M. **Gardens in the Healthcare Facilities: Uses, therapeutic benefits, and design recommendations**. Martinez: The Center for Health, 1995.
- COOPER-MARCUS, C.; BARNES, M. **Healing Gardens: therapeutic benefits and design recommendations**. New York: Wiley, 1999.

DIAS, C. M. DA S. *et al.* Tecendo redes de envelhecimento ativo, saudável e sustentável: Uma análise de ações vinculadas às políticas públicas em saúde, lazer e assistência social em Itabaiana/SE. **Revista Kairós-Gerontologia**, v. 27, n. 2, 2024.

DINIZ, C. X. *et al.* Mobilidade e acessibilidade de pessoas idosas nos espaços sociais urbanos: revisão integrativa da literatura. **Revista Kairós-Gerontologia**, v. 24, 2022.

DUARTE, E. S. R.; JACINTO, A. F. Behavioral and psychological symptoms of dementia in the long-term care setting: assessment of aged adults and intervention for caregivers. **Dementia & Neuropsychologia**, v. 17, p. e20230018, 11 dez. 2023.

FERNANDES, M. T. DE O.; SOARES, S. M. O desenvolvimento de políticas públicas de atenção ao idoso no Brasil. **Revista da Escola de Enfermagem da USP**, v. 46, 2012.

FLEMING, R.; ZEISEL, J.; BENNETT, K. **World Alzheimer Report 2020: Design Dignity Dementia: dementia-related design and the built environment** Volume 1, London, England: Alzheimer's Disease International, 2020.

FRANCISCO, P. M. S. B.; BACURAU, A. G. DE M.; ASSUMPÇÃO, D. DE. **Prevalência de doenças crônicas e posse de plano de saúde em idosos: comparação dos dados da PNS de 2013 e 2019.** Cadernos de Saúde Pública, v. 38, n. 8, 2022.

GLV - GVL GROUP + DR.ZHANG LING. **Longfor Yinian Apartment Rehabilitation Garden by GVL.** Moool, Landscape, GroupGVL, 2025. Disponível em: <<https://moool.com/en/longfor-yinian-apartment-rehabilitation-garden-by-gvl.html>>. Acesso em: 12 jun. 2025.

GRAZULEVICIUTE-VILENISKE, I. *et al.* Aging, Living Environment, and Sustainability: What Should be Taken into Account? **Sustainability**, v. 12, n. 5, 2020.

HAN, A.R.; PARK, S.A.; AHN, B.E. Reduced stress and improved physical functional ability in elderly with mental health problems following a horticultural therapy program. **Complementary Therapies in Medicine**, v.38, p.19-23, 2018.

HARTIG, T.; COOPER-MARCUS, C. Essay: healing gardens: places for nature in health care. **The Lancet**, v.368, n.1, p.36-37, 2006.

HONG, S. *et al.* Aging-associated sensory decline and Alzheimer's disease. **Molecular Neurodegeneration**, v. 19, n. 1, 4 dez. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo: O número de idosos no Brasil cresceu 57,4% em 12 anos.** Governo Federal, Brasil, 2022.

_____. **Pesquisa Nacional de Saúde (PNS), 2019: Ciclos de Vida.** Brasil / IBGE, Coordenação de Trabalho e Rendimento. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

IECOVICH, E. Aging in place: From theory to practice. **Anthropological notebooks**, v. 20, n. 1, 30 mar. 2014.

KRONEMBERGER, D. **Desenvolvimento local sustentável: uma abordagem prática.** São Paulo: Editora Senac, 2011.

LIVINGSTON, G. *et al.* Dementia prevention, intervention, and care: 2024 report of the Lancet standing Commission. **The Lancet**, v. 404, n. 10452, 1 jul. 2024.

LLOYD-SHERLOCK, P. *et al.* An emergency strategy for managing COVID-19 in long-term care facilities in low and middle-income countries: the CIAT Framework. **Global Platform**, v.3, 2021.

LYKKESLET, E. *et al.* Sensory stimulation—A way of creating mutual relations in dementia care. **International Journal of Qualitative Studies on Health and Well-being**, v. 9, n. 1, p. 23888, jan. 2014.

MANGILI, S. *et al.* Built environment impact on people with dementia (PwD) health and well-being outcomes: a systematic review of the literature. **PubMed**, v. 94, 2023.

MREJEN, M.; NUNES, L.; GIACOMIN, K. **Envelhecimento populacional e saúde dos idosos: O Brasil está preparado?** Estudo Institucional n. 10. São Paulo: Instituto de Estudos para Políticas de Saúde, 2023.

MURRONI, V. *et al.* Effectiveness of Therapeutic Gardens for People with Dementia: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 18, p. 9595, 12 set. 2021.

OMS - ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **The World Report on Ageing and Health**. WHO Press: World Health Organization, 2015.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Population Division. World Population Prospects 2024: Summary of Results**. United Nations Department of Economic and Social Affairs (UN-DESA), 2024.

SILLMANN, T. A.; MARQUES, P. O.; FABRINO, C. Therapeutic gardens: historical context, foundations, and landscaping. **Ornamental Horticulture**, v. 30, 1 jan. 2024.

SOUTER-BROWN, G.; HINCKSON, E.; DUNCAN, S. Effects of a sensory garden on workplace wellbeing: a randomized control trial. **Landscape and Urban Planning**, 2021.

STEPANSKY, K.; DELBERT, T.; BUCEY, J.C. Active student engagement within a university's therapeutic sensory garden green space: pilot study of utilization and student perceived quality of life. **Urban Forestry & Urban Greening**, v.67, 2022.

TWOHIG-BENNETT, C.; JONES, A. The Health Benefits of the Great outdoors: a Systematic Review and meta-analysis of Greenspace Exposure and Health Outcomes. **Environmental Research**, v. 166, n. 1, p. 628–637, out. 2018.

WU, W.; KAUSHIK, I. Design for Sustainable Aging: Improving Design Communication Through Building Information Modeling and Game Engine Integration. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 926–933, 2015.

XIAO, Z. *et al.* Sensory impairments and cognitive decline in older adults: A review from a population-based perspective. **Aging and Health Research**, v. 1, n. 1, 2021.

YOUNG, C.; HOFMANN, M.; FREY, D.; MORETTI, M.; BAUER, N. Psychological restoration in urban gardens related to garden type, biodiversity and garden-related stress. **Landscape and Urban Planning**, v.198, 2020.

TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO PARA DETECÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS EM ÁREAS VERDES URBANAS: UMA REVISÃO CRÍTICA

Kezia Soares Barros

Salomão Tibcherani

Beatriz de Mello Massimino

Ana Paula Marques Ramos

Lucas Prado Osco

RESUMO

As áreas verdes urbanas desempenham funções ecológicas fundamentais, mas enfrentam ameaças crescentes de processos erosivos que comprometem sua integridade e funcionalidade. Este trabalho apresenta uma revisão crítica das técnicas de sensoriamento remoto aplicáveis à detecção de feições erosivas em áreas verdes urbanas, analisando a evolução metodológica desde processamento digital tradicional até a aprendizagem profunda. A análise abrange dados publicamente disponíveis, incluindo Landsat, Sentinel-2 e plataformas de processamento em nuvem, bem como abordagens metodológicas categorizadas em processamento digital tradicional, aprendizagem de máquina clássica e aprendizagem profunda. Os resultados evidenciam que métodos tradicionais baseados em índices de vegetação mantêm relevância para monitoramento rápido (precisão 60-80%), enquanto algoritmos de aprendizagem de máquina como SVM e Random Forest demonstram superior capacidade para complexidade urbana (80-94%). A aprendizagem profunda, especialmente CNNs e Vision Transformers, representa o estado-da-arte com precisões de 92-98% e melhorias de até 25% comparado aos métodos tradicionais. A democratização através de dados gratuitos e plataformas como Google Earth Engine criou condições sem precedentes para monitoramento operacional. Tendências futuras incluem integração multi-sensor, sensoriamento em tempo real, IA explicável e tecnologias emergentes. Limitações identificadas incluem necessidade de dados de treinamento volumosos, interpretabilidade limitada de deep learning e escassez de estudos específicos para erosão urbana. A convergência de dados abertos, algoritmos avançados e processamento distribuído oferece oportunidades transformadoras para resiliência urbana e sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; erosão urbana; aprendizagem de máquina; Deep Learning; áreas verdes urbanas; dados abertos.

INTRODUCAO

As áreas verdes urbanas desempenham funções ecológicas fundamentais nos ambientes urbanos contemporâneos, oferecendo serviços ecossistêmicos essenciais como regulação climática, purificação do ar, gestão de águas pluviais, conservação da biodiversidade e promoção do bem-estar humano (Polovina *et al.*, 2021; Shahtahmassebi *et al.*, 2021). No contexto atual de crescimento urbano acelerado, as iniciativas de infraestrutura verde têm se concentrado no monitoramento de espaços verdes urbanos, especialmente em áreas urbanas de alta densidade, onde a pressão sobre os recursos naturais disponíveis é particularmente intensa. Contudo, esses valiosos espaços enfrentam múltiplas ameaças que comprometem sua integridade e funcionalidade ecológica.

A erosão do solo pode causar danos significativos aos espaços verdes urbanos, afetando a biodiversidade e diminuindo o apelo estético das cidades. Os processos erosivos, tanto hídricos quanto eólicos, são intensificados no ambiente urbano devido a fatores como alta densidade populacional, infraestrutura extensa e padrões de drenagem natural alterados, que contribuem para o aumento do escoamento superficial, redução da infiltração e aceleração da erosão do solo. O monitoramento convencional de feições erosivas em áreas urbanas apresenta limitações consideráveis em termos de custo, escala temporal e espacial de observação. As tecnologias de sensoriamento remoto emergiram como meios valiosos para coleta e análise de dados, reduzindo a necessidade de levantamentos de campo que demandam muito tempo. Essa capacidade de monitoramento sistemático e em larga escala torna-se particularmente relevante considerando que o número de estudos científicos relevantes para análise de espaços verdes urbanos assistida por sensoriamento remoto tem aumentado rapidamente desde 2000.

No entanto, importantes lacunas metodológicas persistem na literatura especializada. Existem poucos exemplos de detecção de mudanças, biomassa e carbono e avaliação da saúde da vegetação dentro dos espaços verdes urbanos, e há uma notável carência de estudos focados especificamente na detecção de processos erosivos. Além disso, a maioria dos estudos tem se concentrado em espaços verdes urbanos que cobrem grandes extensões areais, com menos estudos de pequenos trechos como árvores de rua, jardins urbanos, espaços

recreativos e parques públicos, apesar de coletivamente essas áreas menores poderem cobrir áreas substanciais e serem particularmente vulneráveis à erosão.

As abordagens metodológicas para detecção automática de feições erosivas têm evoluído significativamente com os avanços em processamento digital de imagens e inteligência artificial. Várias técnicas de sensoriamento remoto e modelos baseados em SIG têm sido aplicados para identificar distribuição espacial e temporal, investigar suscetibilidade à erosão por voçorocas e mapear classes de risco a fim de minimizar a erosão do solo. Paralelamente, métodos de aprendizagem profunda têm se mostrado excelentes para classificação de sensoriamento remoto, oferecendo novas possibilidades para a detecção automática de processos erosivos. Apesar desse progresso tecnológico, existe uma falta de revisão abrangente de abordagens de sensoriamento remoto e sensores comumente usados na avaliação de espaços verdes urbanos, particularmente no que se refere à aplicação específica para detecção de erosão. Há uma grande necessidade de desenvolver abordagens analíticas mais eficazes que sejam adequadas às particularidades do ambiente urbano e às características específicas das feições erosivas nesse contexto.

Diante desse cenário, o presente trabalho tem por objetivo revisar e discutir criticamente as técnicas de sensoriamento remoto para detecção de processos erosivos (hídrica e eólica) em áreas verdes urbanas. Por meio de revisão de literatura, são analisadas as principais abordagens metodológicas, desde processamento digital tradicional até técnicas de inteligência artificial, considerando os dados disponíveis, suas potencialidades e limitações no contexto do monitoramento de erosão em espaços verdes urbanos, com análise crítica das tendências atuais e identificação de lacunas de pesquisa.

IMPORTÂNCIA DO MAPEAMENTO DE FEIÇÕES EROSIVAS EM ÁREAS VERDES URBANAS

Funções Ecológicas das Áreas Verdes Urbanas

As áreas verdes urbanas constituem elementos fundamentais para a sustentabilidade de ambientes urbanos saudáveis e suas populações humanas, fornecendo importantes benefícios ecológicos, ambientais e culturais, incluindo conservação da biodiversidade e bem-estar humano. Pesquisas conduzidas em 56 áreas urbanas globalmente demonstram que espaços verdes urbanos e áreas naturais próximas suportam níveis similares de multisserviços do solo, evidenciando seu valor ecológico intrínseco. Os serviços ecossistêmicos proporcionados pelas áreas verdes urbanas podem ser categorizados em três grupos principais: provisão, regulação e manutenção, e serviços culturais (Seto *et al.*, 2012; McPhearson *et al.*, 2014). Os espaços verdes urbanos fornecem maiores quantidades de serviços culturais, como espirituais e religiosos, recreação e ecoturismo, e estéticos, em comparação com outros serviços ecossistêmicos (Bertram & Rehdanz, 2013). Entre os serviços regulatórios, destacam-se o controle climático, a melhoria da qualidade do ar, o gerenciamento de águas pluviais e a conservação da biodiversidade (Huang *et al.*, 2017).

As áreas verdes urbanas regulam o microclima regional por meio de sombreamento, evapotranspiração, aumento dos movimentos de ar e incremento das trocas de calor, o que mitiga os efeitos da ilha de calor urbana em escala urbana (Baró *et al.*, 2014; Oral *et al.*, 2021). Além disso, a vegetação nos espaços verdes pode não apenas interceptar a precipitação e reduzir o escoamento superficial, mas também proporcionar maior infiltração pluvial, diminuindo a frequência de inundações urbanas e custos de tratamento de águas pluviais (Zhang *et al.*, 2021). A infraestrutura verde urbana é crucial na manutenção da fertilidade do solo e promoção da saúde do solo dentro dos ambientes urbanos (Spanò *et al.*, 2017), com práticas como agricultura urbana, compostagem e remediação do solo enriquecendo a matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e atividade microbiana, melhorando a estrutura, fertilidade e produtividade do solo. Através da fotossíntese da folhagem e enraizamento, as plantas absorvem CO₂ do ar e removem material particulado, gases de exaustão e dióxido de

nitrogênio através da combinação da evaporação de água da terra e superfícies aquáticas (Hewitt *et al.*, 2020).

Processos Erosivos em Ambiente Urbano

As paisagens urbanas são caracterizadas por alta densidade populacional, infraestrutura extensa e padrões de drenagem natural alterados (Rodriguez *et al.*, 2013). Esses fatores contribuem para o aumento do escoamento superficial, redução da infiltração e aceleração da erosão do solo. A transformação de espaços não desenvolvidos em ambientes urbanos resulta em alterações marcantes na paisagem, com dinâmicas espaciais e temporais de mudança variando entre países desenvolvidos e em desenvolvimento. As superfícies impermeáveis exacerbam os processos de escoamento superficial, enquanto o escoamento de áreas permeáveis permanece incerto devido à dinâmica variável de infiltração (Franz *et al.*, 2014). O desenvolvimento urbano altera os ciclos hidrológicos naturais, o que pode ter consequências sérias para a disponibilidade de água e risco de inundação. A presença de superfícies impermeáveis, como estradas e edifícios, impede que a água da chuva se infiltre no solo.

A modificação alteração antropogênica das paisagens para acelerar a construção de edifícios e infraestrutura impactará os processos dominantes de geração de escoamento e caminhos de fluxo principais, tendo um impacto substancial nos limites de captação e caminhos de drenagem. Atividades de construção, gradação inadequada do terreno e cobertura vegetal inadequada amplificam ainda mais o risco de erosão nas áreas urbanas. Durante a fase de desenvolvimento urbano, observa-se um aumento imediato na produção de sedimentos à medida que as superfícies são despojadas de sua cobertura natural e seus solos nus ficam expostos (Wolman, 1967; Nelson & Booth, 2002). À medida que as áreas urbanas se expandem e amadurecem, o suprimento de sedimento grosso é gradualmente reduzido conforme os solos são selados e superfícies impermeáveis impedem a interação com o material nu abaixo (Duncan, 1999).

Impactos da Erosão em Áreas Verdes Urbanas

A erosão do solo em áreas urbanas tem impactos amplos. Ela leva à perda de solo superficial fértil, redução da qualidade da água em corpos d'água próximos, aumento de incidentes de inundação e comprometimento da estabilidade da infraestrutura. A erosão também pode prejudicar os espaços verdes urbanos, afetando a biodiversidade e diminuindo o apelo estético das cidades (Ecological Improvements, 2023). A perda da capacidade de retenção de nutrientes e água do solo pode ter um impacto negativo no estabelecimento de futuros gramados e plantios paisagísticos. Além disso, a erosão do solo deixada sem controle em encostas e canais adjacentes a edifícios, vias e outras infraestruturas pode minar e desestabilizar fundações e bases de estradas, causando falhas nessas estruturas.

Os efeitos da erosão do solo vão além da perda de terra fértil. Ela levou ao aumento da poluição e sedimentação em córregos e rios, obstruindo as vias navegáveis e causando declínios em peixes e outras espécies. E terras degradadas também são frequentemente menos capazes de reter água, o que pode piorar as inundações (World Wildlife Fund, 2024). As mudanças climáticas exerceram impactos notáveis nos serviços ecossistêmicos de suporte urbano, alterando os processos fundamentais que sustentam os ambientes urbanos. O aumento das temperaturas e padrões alterados de precipitação influenciam a saúde e composição do solo, afetando a circulação de nutrientes e fertilidade do solo (Scholes, 2016; Weiskopf *et al.*, 2020; Bakure *et al.*, 2022). Isso torna os espaços verdes urbanos particularmente vulneráveis aos processos erosivos, comprometendo sua capacidade de fornecer serviços ecossistêmicos essenciais.

A erosão severa do solo apresenta desafios significativos como resultado de atividades humanas de longo prazo e suas formas de relevo e clima propensos à erosão. O desmatamento é uma consequência primária da expansão urbana. Florestas são frequentemente desmatadas para dar lugar a áreas residenciais, desenvolvimentos comerciais e projetos de infraestrutura como estradas e ferrovias. O desmatamento das árvores também aumenta a erosão do solo, causando sedimentação de cursos d'água e degradando a fertilidade do solo.

POTENCIAL DO SENSORIAMENTO REMOTO

O monitoramento tradicional de feições erosivas em ambientes urbanos apresenta limitações significativas que tornam o sensoriamento remoto uma alternativa atrativa. As tecnologias de sensoriamento remoto emergiram como meios valiosos para coleta e análise de dados, reduzindo a necessidade de levantamentos de campo que demandam muito tempo. Os métodos convencionais de monitoramento de erosão enfrentam desafios relacionados a custos operacionais elevados, limitações de escala temporal e espacial, dificuldades de acesso em áreas urbanas densas e necessidade de recursos humanos especializados para levantamentos de campo extensivos. Sem controle efetivo da erosão do solo, será necessária manutenção mais frequente e muitas vezes mais cara das estruturas de controle de sedimentos para prevenir o escoamento excessivo para áreas fora do local.

A complexidade do ambiente urbano, com sua heterogeneidade espacial e temporal, torna particularmente desafiador o monitoramento sistemático de processos erosivos usando apenas métodos convencionais. A necessidade de monitoramento contínuo e em múltiplas escalas espaciais demanda abordagens tecnológicas mais avançadas e eficientes. Adicionalmente, a infraestrutura verde urbana ajuda a mitigar a erosão e compactação do solo, reduzindo o risco de degradação da terra e melhorando a resiliência dos solos urbanos a estressores ambientais (Spanò *et al.*, 2017). O sensoriamento remoto oferece capacidades únicas para detectar e monitorar essas funções protetivas da infraestrutura verde urbana.

Ao confiar em plantas, solo e sistemas naturais para gerenciar o escoamento pluvial, a infraestrutura verde aborda problemas hídricos urbanos e aumenta a resiliência climática. O sensoriamento remoto permite quantificar e mapear a efetividade dessas soluções baseadas na natureza em escala urbana, fornecendo informações cruciais para o planejamento e gestão de espaços verdes. É essencial quantificar os serviços ecossistêmicos (especialmente os regulatórios) e estudar suas relações com características estruturais e funcionais dos elementos e locais da infraestrutura verde urbana (por exemplo, cobertura vegetal e erosão do solo) (Machado, 2004). As tecnologias de sensoriamento

remoto oferecem ferramentas poderosas para essa quantificação sistemática e monitoramento temporal.

No contexto dos jardins comunitários urbanos, estes contribuem para a sustentabilidade ecológica fornecendo agroecossistemas que podem melhorar a qualidade do solo e reduzir o escoamento de água da chuva por erosão do solo (Cilliers *et al.*, 2020). O sensoriamento remoto pode auxiliar na identificação e monitoramento desses espaços, bem como na avaliação de sua efetividade na prevenção de processos erosivos. A capacidade do sensoriamento remoto de fornecer dados consistentes, repetitivos e em múltiplas escalas espaciais e temporais o torna uma ferramenta fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação de solo em áreas verdes urbanas. Esta tecnologia permite a integração de dados ambientais com informações socioeconômicas, facilitando uma abordagem holística para o planejamento e gestão sustentável de espaços verdes urbanos.

Dados de Sensoriamento Remoto Disponíveis Publicamente

A detecção e monitoramento de feições erosivas em áreas verdes urbanas pode ser realizada utilizando uma ampla gama de dados de sensoriamento remoto disponíveis gratuitamente ao público. A disponibilidade de dados de sensoriamento remoto gratuitos tem crescido significativamente nas últimas décadas, impulsionada por iniciativas governamentais e programas espaciais dedicados ao monitoramento ambiental global. Análises da base de dados Web of Science Core Collection confirmaram o uso generalizado de missões globais de dados abertos em estudos de monitoramento e conservação da terra, com missões de dados abertos ganhando popularidade em comparação com missões de satélite comerciais, apresentando crescimento de 6,2 vezes entre 2010 e 11,5 vezes em 2019 (Praticò *et al.*, 2021).

O programa Landsat representa a espinha dorsal do sensoriamento remoto gratuito global, fornecendo o mais longo registro contínuo baseado no espaço das terras da Terra, com as primeiras imagens tendo mais de 40 anos. Esta iniciativa conjunta NASA/USGS culminou no Landsat 8, lançado em 2013, que carrega o Operational Land Imager (OLI) e o Thermal Infrared Sensor (TIRS) com 9 bandas ópticas e 2 bandas termais. O sensor oferece resolução espacial

de 15-30m para bandas multiespectrais e tempo de revisita de 16 dias, cobrindo uma faixa de 185 quilômetros de largura da Terra com resolução suficiente para distinguir características como centros urbanos, fazendas, florestas e outros usos da terra (NASA/USGS, 2024). Para aplicações de detecção de erosão urbana, as bandas do Landsat são fundamentais para identificação de solo exposto através das bandas visíveis, análise de vegetação via infravermelho próximo, e detecção de umidade do solo através das bandas infravermelhas de ondas curtas.

Complementando o programa Landsat, o Sentinel-2 faz parte do programa Copernicus da Agência Espacial Europeia e representa o início de uma nova era em imagens de satélite abertas e gratuitas. Com dois satélites circulando na Terra, o Sentinel-2 oferece resolução de 10 metros em vermelho, verde, azul e infravermelho próximo, atualmente a melhor resolução espacial disponível gratuitamente para dados ópticos, com novas imagens de uma área a cada 5 dias (SkyWatch, 2022). O sistema possui 13 bandas espectrais que variam de bandas costeiras a infravermelho de ondas curtas, com resoluções espaciais de 10m, 20m e 60m dependendo da banda, oferecendo capacidades espectrais superiores ao Landsat para análise detalhada de vegetação e propriedades do solo em ambiente urbano.

Uma inovação recente na disponibilidade de dados abertos é representada pelo programa Harmonized Landsat Sentinel (HLS), uma iniciativa da NASA para produzir uma constelação virtual de dados de reflectância de superfície combinando observações do Landsat 8-9 e Sentinel-2. Esta harmonização radiométrica permite observações globais da terra a cada 2-3 dias com resolução espacial uniforme de 30 metros, representando um avanço significativo para monitoramento de erosão urbana devido à alta frequência temporal e consistência radiométrica entre sensores diferentes (NASA, 2024).

Para monitoramento em escala regional e análise de tendências temporais, o MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) constitui o principal instrumento nos satélites Terra e Aqua da NASA, adquirindo imagens da Terra em 36 bandas espectrais com resolução de 250 m a 1 km dependendo da banda. O MODIS oferece dados diários globais e é tradicionalmente utilizado em estudos de monitoramento e conservação da terra, sendo particularmente útil para análise de processos erosivos em escala metropolitana e regional. Similarmente, o VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) a bordo dos

satélites Suomi-NPP e NOAA-20 fornece dados de observação da Terra com resolução de 375m a 750m, oferecendo capacidades complementares para monitoramento diário de mudanças ambientais.

A disponibilidade de dados de radar representa outro avanço importante para detecção de erosão urbana, especialmente através do Sentinel-1 que fornece dados de radar C-band de abertura sintética, sendo atualmente o único conjunto de dados SAR gratuito disponível. O SAR é amplamente utilizado em aplicações que requerem monitoramento constante e detecção de mudanças ao longo do tempo, operando independentemente de condições atmosféricas e proporcionando capacidade de imageamento dia e noite através de nuvens (SkyWatch, 2022). Para detecção de erosão urbana, os dados Sentinel-1 oferecem sensibilidade única à rugosidade superficial e capacidade de análise interferométrica para detecção de subsidência, com revisita de 6-12 dias dependendo da localização.

A componente topográfica é fundamental para estudos de erosão, sendo suportada por diversos modelos digitais de elevação gratuitos. O SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) fornece dados de elevação global com resolução de 30m, essenciais para análise de declividade, modelagem hidrológica e caracterização geomorfológica. O ASTER GDEM oferece dados de elevação global com resolução de 30m, particularmente útil para estudos detalhados de topografia urbana. Mais recentemente, o Copernicus DEM representa um modelo digital de superfície que inclui todas as características naturais e construídas acima do solo, disponível gratuitamente em três instâncias com resoluções de 10m, 30m e 90m (Sentinel Hub, 2024).

O acesso a esses dados é facilitado por diversas plataformas desenvolvidas especificamente para democratizar o uso de sensoriamento remoto. O USGS Earth Explorer é considerado uma das melhores fontes gratuitas de dados de sensoriamento remoto, fornecendo acesso a dados históricos de mais de 40 anos do programa Landsat, além de dados de vários outros satélites com critérios de busca personalizáveis baseados em localização, data e tipo de sensor (Atlas, 2024). O Google Earth Engine representa uma plataforma de análise geoespacial baseada em nuvem que permite aos usuários visualizar e analisar imagens de satélite, permanecendo gratuito para uso acadêmico e de pesquisa, incluindo acesso aos dados Landsat Collection 2, Sentinel-2 e numerosos produtos

derivados (NASA, 2024). O Sentinel Hub complementa essas opções tornando dados de satélite facilmente acessíveis através de seu GIS em nuvem, oferecendo pré-visualização em resolução completa, funcionalidade de time-lapse e ferramentas de análise para área ou ponto específico.

Para detecção efetiva de feições erosivas em áreas verdes urbanas, a combinação adequada de resolução espacial e temporal é fundamental. Os dados Sentinel-2 (10m, 5 dias) representam atualmente o melhor compromisso entre resolução espacial e temporal para monitoramento urbano gratuito, enquanto para análises em escala regional, os dados harmonizados HLS (30m, 2-3 dias) oferecem frequência temporal superior. A disponibilidade de múltiplas bandas espectrais permite aplicação de diversos índices de vegetação e solo para detecção de erosão, incluindo NDVI, SAVI e EVI para monitoramento de vigor vegetativo, NDWI e MNDWI para detecção de umidade superficial, Bare Soil Index para identificação de solo exposto, e índices Red Edge para análise de estresse vegetal disponíveis no Sentinel-2.

A integração multi-sensor representa uma abordagem particularmente promissora para detecção de erosão urbana, combinando dados ópticos (Landsat, Sentinel-2), radar (Sentinel-1) e topográficos (SRTM, ASTER, Copernicus DEM) para criar abordagens integradas que utilizam informações espectrais, texturais e topográficas. Esta combinação permite melhor discriminação de feições erosivas em ambiente urbano complexo, superando limitações individuais de cada tipo de sensor e aproveitando suas respectivas vantagens complementares para caracterização abrangente de processos erosivos em áreas verdes urbanas. O Quadro 1 a seguir procura sintetizar as principais características dos sensores disponíveis que podem ser aplicados no levantamento de áreas erodidas.

Quadro 1 - Características dos principais sensores de dados abertos para detecção de erosão urbana.

Sensor/ Programa	Agência	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Bandas Espectrais	Período Disponível	Principais Aplicações para Erosão
Landsat 8/9 OLI	NASA/ USGS	15-30m	16 dias	9 ópticas + 2 termais	2013-presente	Solo exposto, vegetação, umidade
Sentinel-2 MSI	ESA	10-60m	5 dias	13 espectrais	2015-presente	Análise detalhada vegetação, estresse
HLS	NASA	30m	2-3 dias	Harmonizado L8+S2	2013-presente	Monitoramento alta frequência
MODIS	NASA	250m-1km	Diário	36 espectrais	2000-presente	Tendências regionais, fenologia
VIIRS	NOAA	375-750m	Diário	22 espectrais	2011-presente	Monitoramento diário, mudanças
Sentinel-1 SAR	ESA	5-40m	6-12 dias	C-band (radar)	2014-presente	Rugosidade, subsidência, todo-tempo
SRTM DEM	NASA	30m/90m	Estático	Elevação	2000	Topografia, declividade, drenagem
ASTER GDEM	NASA/ METI	30m	Estático	Elevação	2009	Topografia urbana detalhada
Copernicus DEM	ESA	10-90m	Estático	Elevação + estruturas	2021-presente	Superfície urbana completa

Fonte: Autoria própria (2025).

ABORDAGENS METODOLÓGICAS PARA DETECÇÃO DE FEIÇÕES EROSIVAS

A detecção de feições erosivas em áreas verdes urbanas tem evoluído significativamente com o desenvolvimento de novas tecnologias de processamento digital de imagens e métodos de inteligência artificial. As abordagens metodológicas podem ser categorizadas em três grandes grupos evolutivos: processamento digital tradicional, aprendizagem de máquina clássica e aprendizagem profunda. Cada categoria apresenta características distintas, vantagens específicas e limitações que devem ser consideradas na seleção da metodologia mais adequada para diferentes contextos de aplicação urbana.

O processamento digital tradicional constitui a base histórica das técnicas de sensoriamento remoto para detecção de mudanças ambientais. Os índices de vegetação representam uma das ferramentas mais amplamente utilizadas, sendo o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) o mais popular desde sua introdução na década de 1970. O NDVI explora a diferença normalizada entre as bandas do vermelho e infravermelho próximo, baseando-se no princípio de que a vegetação saudável absorve intensamente a luz vermelha enquanto reflete fortemente no infravermelho próximo devido à estrutura celular das folhas (Xue & Su, 2017). Para detecção de erosão urbana, valores de NDVI próximos a zero ou negativos indicam áreas de solo exposto, enquanto valores entre 0,1 e 0,2 caracterizam solo nu, e valores acima de 0,2 indicam presença de vegetação. A principal vantagem do NDVI reside na sua simplicidade interpretativa e capacidade de destacar áreas de vegetação degradada que podem indicar processos erosivos iniciais. Entretanto, o NDVI apresenta limitações significativas relacionadas à influência do brilho do solo subjacente, especialmente em áreas com cobertura vegetal esparsa comum em ambientes urbanos, e perda de sensibilidade em áreas de alta biomassa.

Para superar as limitações do NDVI, foram desenvolvidos índices ajustados para o solo, como o SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index) que incorpora um fator de correção L para reduzir a influência do background do solo. O SAVI é particularmente útil em ambientes urbanos onde a cobertura vegetal é heterogênea e há presença significativa de solo exposto. Variações como MSAVI2 (Modified Soil-Adjusted Vegetation Index) foram desenvolvidas sem depender do princípio da linha do solo, sendo amplamente utilizadas em análise de crescimento de plantas, pesquisa de desertificação, estimativa de rendimento de pastagens e análise de erosão do solo (Xue & Su, 2017). Além dos índices de vegetação, métodos tradicionais incluem classificação supervisionada utilizando algoritmos como Máxima Verossimilhança, que assume distribuição normal dos dados espectrais, e métodos não-paramétricos como k-NN e Árvores de Decisão que são mais flexíveis quanto às distribuições dos dados.

A análise de textura constitui outra abordagem tradicional importante, utilizando medidas estatísticas como as de Haralick para caracterizar a rugosidade superficial e identificar áreas erodidas que apresentam padrões texturais específicos. A detecção de mudanças através de análise multitemporal permite

identificar processos erosivos pela comparação de imagens de diferentes épocas, utilizando técnicas de diferenciação, razão entre imagens ou análise de componentes principais. Embora essas técnicas tradicionais apresentem vantagens como simplicidade de implementação, baixo custo computacional e alta interpretabilidade, suas limitações incluem dependência de limiares definidos pelo usuário, dificuldade em lidar com cenários complexos típicos do ambiente urbano e sensibilidade a variações atmosféricas e de iluminação.

O desenvolvimento da aprendizagem de máquina revolucionou a classificação de imagens de sensoriamento remoto, oferecendo métodos mais robustos para lidar com a complexidade dos dados espectrais. Meta-análises de mais de 250 artigos científicos demonstraram que algoritmos como Support Vector Machine (SVM) e Random Forest (RF) se destacaram como os mais utilizados e eficazes para classificação de imagens de sensoriamento remoto (Thanh Noi & Kappas, 2020). O SVM opera construindo um hiperplano de separação ótimo no espaço de características, maximizando a margem entre classes diferentes. Para detecção de erosão urbana, o SVM apresenta capacidade superior de lidar com dados de alta dimensionalidade e pequenos conjuntos de treinamento, características comuns em aplicações de sensoriamento remoto. A principal vantagem do SVM reside na sua capacidade de encontrar soluções globalmente ótimas e lidar eficientemente com espaços de características não-lineares através do uso de kernels. Entretanto, o SVM é sensível a dados ruidosos e sua performance pode degradar significativamente com amostras de treinamento incorretamente rotuladas, aspecto particularmente relevante em ambientes urbanos heterogêneos.

O Random Forest emerge como uma alternativa robusta, construindo múltiplas árvores de decisão e combinando seus resultados através de votação majoritária. Para aplicações de erosão urbana, o RF oferece vantagens significativas incluindo reduzido tempo de classificação, capacidade de lidar com dados ausentes e robustez a ruído. Estudos comparativos mostraram que quando conjuntos de treinamento são reduzidos para apenas 10 pixels, SVM e RF ainda mantiveram altos níveis de precisão (79,57% e 76,55%, respectivamente), enquanto métodos tradicionais como Máxima Verossimilhança apresentaram queda significativa de precisão para 52,56% (Kupidura *et al.*, 2019). A baixa sensibilidade ao tamanho da amostra de treinamento representa

uma grande vantagem desses algoritmos, especialmente para SVM. Por outro lado, o RF demonstrou tempo de classificação significativamente menor (3 minutos) comparado ao SVM (16 minutos) nos mesmos conjuntos de dados.

Métodos ensemble como Bagging e Boosting representam estratégias avançadas de aprendizagem de máquina que combinam múltiplos classificadores para melhorar a precisão geral. Esses métodos são particularmente úteis para detecção de erosão urbana onde a variabilidade espacial e espectral é alta. O Bagging reduz a variância do modelo através de múltiplas amostras bootstrap, enquanto o Boosting foca em melhorar o desempenho em amostras difíceis de classificar. Algoritmos como AdaBoost e Gradient Boosting têm mostrado eficácia na classificação de características complexas de superfície urbana. A principal limitação dos métodos de aprendizagem de máquina clássica reside na necessidade de engenharia manual de características e dependência de conhecimento especializado para seleção de atributos relevantes.

A revolução da aprendizagem profunda (Deep Learning) trouxe capacidades sem precedentes para detecção automática de feições erosivas através de redes neurais convolucionais (CNNs). Como modelos feed-forward de múltiplas camadas, as CNNs podem extrair características diretamente de grandes volumes de dados de imagem, sendo particularmente eficazes na exploração de características semânticas complexas. Estudos aplicando CNNs para predição de erosão do solo em áreas costeiras demonstraram melhorias de precisão de 25,57% comparado aos métodos tradicionais como RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), evidenciando a superioridade das CNNs em capturar relações não-lineares complexas entre fatores de erosão (Zhang *et al.*, 2023). As CNNs apresentam arquitetura hierárquica com camadas convolucionais, de pooling e totalmente conectadas, permitindo extração automática de características em múltiplas escalas espaciais.

Arquiteturas clássicas como AlexNet, VGG, ResNet, DenseNet e EfficientNet têm sido adaptadas para aplicações de sensoriamento remoto, cada uma oferecendo vantagens específicas. Experimentos demonstraram que modelos baseados em CNNs mais profundas com maior número de camadas convolucionais são capazes de superar eficientemente desafios como aparência heterogênea de imagens de satélite de sensoriamento remoto, característica fundamental para detecção de erosão em ambientes urbanos complexos (Helber

et al., 2019). Para aplicações específicas de segmentação de feições erosivas, arquiteturas como U-Net têm se mostrado particularmente eficazes devido à sua capacidade de preservar informações espaciais detalhadas através de conexões de salto entre camadas encoder e decoder.

Métodos avançados de aprendizagem profunda incluem Vision Transformers (ViTs), que representam uma mudança paradigmática na análise de imagens de sensoriamento remoto. Diferentemente das CNNs que dependem de operações convolucionais, os Vision Transformers utilizam mecanismos de auto-atenção multi-cabeça como bloco de construção principal para derivar relações contextuais de longo alcance entre pixels nas imagens (Bazi *et al.*, 2021). A arquitetura ViT divide imagens em patches não-sobrepostos, que são então achatados e transformados em sequências através de embedding. Para manter informações sobre posição, o embedding posicional é adicionado a esses patches, e a sequência resultante é alimentada para várias camadas de atenção multi-cabeça para gerar a representação final.

Para aplicações de sensoriamento remoto, os Vision Transformers têm demonstrado desempenho superior em tarefas de classificação de cenas, obtendo precisões médias de classificação de 98,49%, 95,86%, 95,56% e 93,83% nos datasets Merced, AID, Optimal31 e NWPU, respectivamente (Bazi *et al.*, 2021). A capacidade dos ViTs de capturar dependências globais e aprender relações espaciais complexas oferece vantagens significativas sobre redes neurais convolucionais tradicionais, especialmente para detecção de erosão urbana onde padrões espaciais de longo alcance podem ser críticos. A NASA desenvolveu o SatVision, um modelo Vision Transformer de larga escala treinado com dados MODIS, demonstrando que ViTs podem extrair representações visuais gerais robustas e capturar padrões visuais de alto nível, semântica e relações espaciais que podem ser aproveitadas para uma ampla gama de tarefas de análise (NASA, 2023).

Uma inovação particularmente relevante para monitoramento de erosão é o Temporo-Spatial Vision Transformer (TSViT), que processa séries temporais de imagens de satélite dividindo registros SITS em patches não-sobrepostos no espaço e tempo, que são tokenizados e subsequentemente processados por um codificador têmporo-espacial fatorizado (Tarasiou *et al.*, 2023). Para aplicações urbanas específicas, o MeViT (Medium-Resolution Vision Transformer) foi

desenvolvido para segmentação semântica de imagens Landsat, demonstrando eficácia superior em dados de resolução média com precisão de 92,22%, recall de 94,69%, F1 score de 93,44% e IoU médio de 83,63% (Panboonyuen, 2024). Essas arquiteturas especializadas mostram como os ViTs podem ser adaptados para diferentes resoluções e aplicações específicas de sensoriamento remoto.

A principal vantagem dos Vision Transformers para detecção de erosão urbana reside na capacidade de processar contexto global e modelar dependências de longo alcance, características essenciais para identificar padrões erosivos complexos que podem se estender por grandes áreas. Além disso, os ViTs tendem a requerer menos parâmetros que CNNs grandes para níveis de desempenho similares, especialmente em cenários com dados abundantes, graças às suas capacidades de processamento de contexto global. Entretanto, as limitações incluem alta demanda computacional, necessidade de grandes quantidades de dados de treinamento e menor eficiência em cenários com dados limitados comparado às CNNs que possuem bias indutivos mais apropriados para análise de imagens.

A principal vantagem da aprendizagem profunda reside na extração automática de características eliminando a necessidade de engenharia manual de atributos, capacidade de modelar relações não-lineares complexas e adaptabilidade a diferentes tipos de dados de sensoriamento remoto. Entretanto, as limitações incluem necessidade de grandes volumes de dados de treinamento, alta demanda computacional, natureza de “caixa preta” que limita a interpretabilidade dos resultados e susceptibilidade a overfitting em pequenos conjuntos de dados. Para aplicações de erosão urbana, onde dados rotulados podem ser limitados e a interpretabilidade é importante para tomada de decisões de gestão, essas limitações devem ser cuidadosamente consideradas.

A integração de múltiplas abordagens metodológicas representa uma tendência crescente para maximizar as vantagens de cada método. Fusão de dados multi-sensor combinando informações ópticas, radar e topográficas com diferentes algoritmos de classificação tem demonstrado resultados superiores para detecção de processos erosivos complexos. Técnicas de transfer learning permitem aproveitar modelos pré-treinados em grandes conjuntos de dados e adaptá-los para aplicações específicas de erosão urbana, reduzindo significativamente os requisitos de dados de treinamento. Abordagens híbridas que

combinam índices de vegetação tradicionais como entrada para algoritmos de aprendizagem de máquina têm mostrado eficácia em manter interpretabilidade enquanto melhoram a precisão da classificação.

O processamento em nuvem através de plataformas como Google Earth Engine tem democratizado o acesso a métodos avançados de detecção de erosão, permitindo análises em larga escala com recursos computacionais distribuídos. Essa tendência é particularmente importante para monitoramento de erosão urbana onde análises multitemporais de grandes áreas são necessárias para compreender padrões espaciais e temporais dos processos erosivos. A combinação de dados abertos como Landsat e Sentinel-2 com algoritmos de aprendizagem de máquina implementados em plataformas de nuvem representa uma abordagem promissora para monitoramento operacional de erosão em áreas verdes urbanas.

A seleção da abordagem metodológica mais adequada depende de múltiplos fatores incluindo disponibilidade de dados, recursos computacionais, precisão requerida, interpretabilidade necessária e escala de aplicação. Para aplicações de monitoramento rápido e em larga escala, métodos tradicionais baseados em índices podem ser suficientes. Para detecção precisa de feições erosivas específicas em ambiente urbano complexo, métodos de aprendizagem profunda podem ser necessários. A tendência atual aponta para integração de múltiplas abordagens aproveitando as vantagens complementares de cada metodologia para criar sistemas robustos e eficazes de detecção de erosão urbana. O Quadro 2 a seguir apresenta, de maneira sintetizada, as condições observadas nos trabalhos investigados no que se refere aos métodos empregados.

Quadro 2 - Comparação das abordagens metodológicas para detecção de feições erosivas.

Categoria	Método	Vantagens	Limitações	Precisão Típica*	Complexidade Computacional	Interpretabilidade
Processamento Digital Tradicional	NDVI/SAVI	Simplicidade, baixo custo, alta interpretabilidade	Dependência de limiares, sensibilidade atmosférica	60-80%	Baixa	Alta
	Classificação Supervisionada	Metodologia estabelecida, controle de parâmetros	Dependência de amostras, distribuições de dados	65-85%	Baixa-Média	Alta
	Análise de Textura	Sensibilidade a padrões superficiais	Dependência de janela de análise, computação intensiva	70-85%	Média	Média
	Detecção de Mudanças	Identifica mudanças temporais diretas	Requer registro preciso, sensível a variações sazonais	60-80%	Baixa-Média	Alta
Aprendizagem de Máquina	Support Vector Machine	Eficaz com pequenos datasets, solução global ótima	Sensível a ruído, seleção de parâmetros complexa	80-92%	Média-Alta	Baixa
	Random Forest	Robusto a ruído, rápido, lida com dados ausentes	Pode haver overfitting, menos interpretável	82-94%	Média	Média
	Ensemble Methods	Combina vantagens de múltiplos modelos	Complexidade aumentada, maior custo computacional	85-95%	Alta	Baixa
Aprendizagem Profunda	Vision Transformers	Processamento de contexto global, dependências de longo alcance	Demanda computacional alta, necessidade de muitos dados	92-98%	Muito Alta	Muito Baixa
	CNN Clássicas	Extração automática de características, alta precisão	Grande volume de dados necessário, computação intensiva	88-96%	Muito Alta	Muito Baixa
	U-Net/Segmentação	Preserva detalhes espaciais, segmentação precisa	Complexidade arquitetural, interpretabilidade limitada	90-98%	Muito Alta	Muito Baixa
	Transfer Learning	Aproveita modelos pré-treinados, menos dados necessários	Dependência de similaridade de domínios	85-95%	Alta	Muito Baixa

Fonte: Autoria própria (2025).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho evidenciou a evolução significativa das técnicas de sensoriamento remoto para detecção de feições erosivas em áreas verdes urbanas. A análise demonstrou que métodos tradicionais baseados em índices de vegetação (NDVI, SAVI) mantêm relevância para monitoramento rápido devido à simplicidade e interpretabilidade, apresentando precisões típicas de 60-80%. Algoritmos de aprendizagem de máquina, especialmente Support Vector Machine e Random Forest, demonstraram superior capacidade para lidar com a complexidade urbana, alcançando precisões de 80-94% e mantendo performance elevada mesmo com conjuntos de treinamento reduzidos. O advento da aprendizagem profunda marcou uma revolução na detecção automática de erosão, com CNNs e Vision Transformers demonstrando melhorias substantivas de até 25% na precisão comparado aos métodos tradicionais, atingindo precisões de 92-98%. A democratização do acesso através de dados gratuitos (Landsat, Sentinel-2) e plataformas de processamento em nuvem (Google Earth Engine) criou condições sem precedentes para a implementação operacional. A iniciativa HLS, oferecendo observações globais a cada 2-3 dias, representa um avanço paradigmático para monitoramento em tempo real.

O futuro da detecção de erosão urbana será moldado por tendências convergentes que prometem transformar as capacidades de monitoramento. O aprimoramento da resolução espacial e temporal de imagens de satélite e UAV facilitará o monitoramento mais frequente e detalhado de áreas urbanas (Kumar *et al.*, 2024). A integração multi-sensor, combinando dados ópticos, termais, LiDAR e hiperespectrais, proporcionará análises mais robustas e abrangentes. O desenvolvimento em direção ao sensoriamento em tempo real, suportado por IoT e tecnologias 5G, viabiliza observação contínua e resposta rápida a eventos erosivos (Chen *et al.*, 2024). Avanços em IA incluindo transfer learning e técnicas de IA explicável, abordarão limitações atuais de interpretabilidade e reduzirão requisitos de dados de treinamento. A integração com modelos de previsão operacionais produzirá previsões de mudanças similares aos relatórios meteorológicos modernos (Armstrong *et al.*, 2024). Tecnologias emergentes como realidade aumentada oferecerão novas formas de visualização de riscos erosivos para gestores e público. A democratização através de constelações

de pequenos satélites e drones de baixo custo expandirá capacidades de monitoramento local, enquanto iniciativas de ciência cidadã criaram redes de observação mais densas e responsivas.

Esta revisão apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A ênfase em dados publicamente disponíveis, embora justificada pela democratização do acesso, pode ter subestimado capacidades de sensores comerciais de alta resolução para detecção de erosão em pequena escala. A heterogeneidade metodológica dos estudos revisados dificultou comparações diretas de performance entre diferentes abordagens, especialmente considerando variações em áreas de estudo, tipos de erosão e métricas de avaliação. A escassez de estudos especificamente focados em erosão urbana limitou a análise a extrapolações de aplicações mais gerais de sensoriamento remoto. Além disso, a rápida evolução das técnicas de deep learning pode ter resultado em defasagem temporal entre publicação dos estudos e estado-da-arte atual. A falta de padronização em conjuntos de dados de validação para erosão urbana impede avaliações sistemáticas de performance entre diferentes metodologias.

A convergência de dados abertos, algoritmos avançados de IA e plataformas de processamento distribuído criou oportunidades sem precedentes para desenvolvimento de soluções inovadoras de monitoramento de erosão urbana. A transição de métodos tradicionais para aprendizagem profunda demonstra ganhos substanciais em precisão, mas requer equilíbrio cuidadoso entre performance e interpretabilidade. Os principais desafios futuros incluem desenvolvimento de frameworks integrados para fusão multi-sensor, criação de conjuntos de dados padronizados para validação, e tradução de avanços tecnológicos em ferramentas práticas para gestores urbanos. A superação desses desafios requer colaboração interdisciplinar entre cientistas da computação, especialistas em sensoriamento remoto, urbanistas e gestores ambientais. O campo está posicionado para contribuir significativamente para resiliência urbana e sustentabilidade ambiental através de sistemas de monitoramento mais eficazes, responsivos e acessíveis. O sucesso dessas iniciativas dependerá da capacidade de traduzir avanços científicos em soluções práticas que atendam às necessidades reais de gestão de erosão em áreas verdes urbanas, promovendo cidades mais sustentáveis e resilientes aos desafios ambientais contemporâneos.

REFERÊNCIAS

- ADVEXURE. LiDAR and Drones: A New Era in Topographical Mapping & Surveying. 2024. Disponível em: <https://advexure.com/blogs/news/lidar-and-drones-a-new-era-in-topographical-mapping-surveying>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- ARMSTRONG, S. B. *et al.* The future of coastal monitoring through satellite remote sensing. *Cambridge Prisms: Coastal Futures*, v. 2, e8, 2024.
- ASI - AGENZIA SPAZIALE ITALIANA. PRISMA Mission. 2019. Disponível em: <https://www.eoportal.org/satellite-missions/prisma-hyperspectral>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- ATLAS. USGS Earth Explorer: Best Free Source for Satellite Imagery. 2024. Disponível em: <https://atlas.co/data-sources/usgs-earth-explorer/>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- BAKURE, D. *et al.* Climate change impacts on urban supporting ecosystem services. *Environmental Science & Policy*, v. 125, p. 89-102, 2022.
- BARÓ, F. *et al.* Contribution of ecosystem services to air quality and climate regulation in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, v. 126, p. 15-25, 2014.
- BAZI, Y. *et al.* Vision transformers for remote sensing image classification. *Remote Sensing*, v. 13, n. 3, p. 516, 2021.
- BERTRAM, C.; REHDANZ, K. Preferences for cultural urban ecosystem services: Comparing attitudes, perception, and use. *Ecosystem Services*, v. 12, p. 187-199, 2013.
- CAVALLI, R. M. *et al.* The Weight of Hyperion and PRISMA Hyperspectral Sensor Characteristics on Image Capability to Retrieve Urban Surface Materials in the City of Venice. *Sensors*, v. 23, n. 1, p. 454, 2023.
- CHEN, H. *et al.* How will AI transform urban observing, sensing, imaging, and mapping? *npj Urban Sustainability*, v. 4, n. 12, 2024.
- CILLIERS, S. *et al.* Urban green infrastructure: bridging biodiversity conservation and sustainable urban development through adaptive management approach. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 8, p. 580, 2020.
- DLR - DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT. EnMAP Mission. 2024. Disponível em: <https://www.enmap.org/>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- DUNCAN, J. M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, v. 125, n. 4, p. 254-269, 1999.
- ECOLOGICAL IMPROVEMENTS. Managing Soil Erosion in Cities and Metropolises. 2023. Disponível em: <https://www.ecologicalimprovements.com/blog/erosion-in-urban-landscapes-managing-soil-erosion-in-cities-and-metropolises>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. Sentinel-2 Mission. 2024. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- FLYABILITY. LiDAR Drone: Everything you need to know about LiDARs on UAVs. 2025. Disponível em: <https://www.flyability.com/blog/lidar-drone>. Acesso em: 02 jun. 2025.
- FRANZ, C. *et al.* Urban sediment dynamics: a comprehensive review. *Water Research*, v. 48, p. 285-303, 2014.
- HELBER, P. *et al.* EuroSAT: A Novel Dataset and Deep Learning Benchmark for Land Use and Land Cover Classification. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 12, n. 7, p. 2217-2226, 2019.

HEWITT, C. N. *et al.* Using green infrastructure to improve urban air quality. *Environmental Science & Technology*, v. 54, n. 14, p. 8559-8567, 2020.

HUANG, C. *et al.* Green spaces as an indicator of urban health: evaluating its changes in 28 megacities. *Remote Sensing*, v. 9, n. 12, p. 1266, 2017.

KUMAR, A. *et al.* Advancing horizons in remote sensing: a comprehensive survey of deep learning models and applications in image classification and beyond. *Neural Computing and Applications*, v. 36, p. 5755-5801, 2024.

KUPIDURA, P. *et al.* Comparison of Support Vector Machine and Random Forest Algorithms for Invasive and Expansive Species Classification Using Airborne Hyperspectral Data. *Remote Sensing*, v. 12, n. 3, p. 516, 2019.

LANDSCAPE. State of Satellite Imagery. 2024. Disponível em: <https://landscape.satsummit.io/capture/resolution-considerations.html>. Acesso em: 02 jun. 2025.

LI, W. *et al.* Comparison of UAV-based LiDAR and digital aerial photogrammetry for measuring crown-level canopy height in the urban environment. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 181, p. 146-166, 2022.

MACHADO, A. Naturalness and ecological integrity in urban ecosystems. *Landscape and Urban Planning*, v. 68, n. 2-3, p. 239-255, 2004.

MAXAR TECHNOLOGIES. WorldView and QuickBird Satellite Imagery. 2024. Disponível em: <https://collections.sentinel-hub.com/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

MCPHEARSON, T. *et al.* Urban ecosystem services for resilience planning and management in New York City. *Ambio*, v. 43, n. 4, p. 502-515, 2014.

NASA. Google Earth Engine for Research. 2024. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/data/data-access/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

NASA. SatVision: A Large Vision Transformer Model Trained with MODIS Satellite Imagery. 2023. Disponível em: <https://www.nas.nasa.gov/SC23/research/project24.html>. Acesso em: 02 jun. 2025.

NASA/USGS. Landsat Science. 2024. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

NELSON, E. J.; BOOTH, D. B. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology*, v. 264, n. 1-4, p. 51-68, 2002.

ORAL, H. V. *et al.* A review of nature-based solutions for urban heat island mitigation. *Urban Climate*, v. 36, p. 100784, 2021.

PANBOONYUEN, T. MeViT: A Medium-Resolution Vision Transformer for Semantic Segmentation on Landsat Satellite Imagery for Agriculture in Thailand. 2024. Disponível em: <https://kaopanboonyuen.github.io/publication/mevit-a-medium-resolution-vision-transformer/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

POLOVINA, S. *et al.* Soil erosion assessment and prediction in urban landscapes: a new G2 model approach. *Scientific Reports*, v. 11, n. 1, p. 4154, 2021.

PRATICÒ, S. *et al.* Global Open Data Remote Sensing Satellite Missions for Land Monitoring and Conservation: A Review. *Land*, v. 9, n. 11, p. 402, 2021.

RODRIGUEZ, F. *et al.* Urbanization and hydrology: a review of processes and impacts. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 3, p. 401-420, 2013.

SCHOLES, R. J. Climate change and ecosystem services. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, v. 7, n. 4, p. 537-550, 2016.

SENTINEL HUB. Sentinel Hub Collections. 2024. Disponível em: <https://collections.sentinel-hub.com/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

SETO, K. C. *et al.* Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 40, p. 16083-16088, 2012.

SHAHTAHMASSEBI, A. *et al.* Remote sensing of urban green spaces: A review. *Remote Sensing*, v. 13, n. 18, p. 3736, 2021.

SKYWATCH. Top 10 Free Sources of Satellite Data. 2022. Disponível em: <https://skywatch.com/free-sources-of-satellite-data/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

SPANÒ, M. *et al.* Urban green infrastructure: bridging biodiversity conservation and sustainable urban development. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 27, p. 247-259, 2017.

TARASIOU, M. *et al.* ViTs for SITS: Vision Transformers for Satellite Image Time Series. *arXiv preprint arXiv:2301.04944*, 2023.

THANH NOI, P.; KAPPAS, M. Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 13, p. 6308-6325, 2020.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Data Citation Guidelines. 2024. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/data-citation>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WEISKOPF, S. R. *et al.* Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. *Science of the Total Environment*, v. 733, p. 137782, 2020.

WINGTRA. LiDAR vs. Photogrammetry: What sensor to choose for a given application. 2025. Disponível em: <https://wingtra.com/lidar-drone/lidar-vs-photogrammetry-what-sensor-to-choose/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

WOLMAN, M. G. A cycle of sedimentation and erosion in urban river channels. *Geografiska Annaler*, v. 49, n. 2-4, p. 385-395, 1967.

WORLD WILDLIFE FUND. What is Erosion? Effects of Soil Erosion and Land Degradation. 2024. Disponível em: <https://www.worldwildlife.org/threats/soil-erosion-and-degradation>. Acesso em: 02 jun. 2025.

XUE, J.; SU, B. Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, v. 2017, p. 1353691, 2017.

YELLOWSCAN. Lidar Drone: Everything you need to know about LiDARs on UAVs. 2023. Disponível em: <https://www.yellowscan.com/knowledge/lidar-drone/>. Acesso em: 02 jun. 2025.

ZHANG, K. *et al.* Applying Convolutional Neural Network to Predict Soil Erosion: A Case Study of Coastal Areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 3, p. 2513, 2023.

ZHANG, Z. *et al.* Planning London's green spaces in an integrated water management approach to enhance future resilience in urban stormwater control. *Journal of Hydrology*, v. 597, p. 126126, 2021.

ESTADO DE CONSERVAÇÃO DE VEGETAÇÃO ADJACENTE A CÓRREGOS URBANOS NO SUDESTE DE GOIÁS - BRASIL

Aristides Dutra De Oliveira
Universidade Estadual de Goiás (UEG)

Isadora Lopes Pires
Universidade Estadual de Goiás (UEG)

Erikson Leonardo Santos De Miranda
Universidade Estadual de Goiás (UEG)

Ismael Martins Pereira
Universidade Estadual de Goiás (UEG)

Vagner Santiago do Vale
Universidade Estadual de Goiás (UEG)



RESUMO

Florestas ripárias urbanas são essenciais para a manutenção da biodiversidade e serviços ecossistêmicos, embora estejam sujeitas a intensas pressões antrópicas. Este estudo avaliou o estado de conservação da vegetação ripária ao longo de cinco córregos urbanos no município de Ipameri-GO. Foram amostradas 23 parcelas urbanas e 13 parcelas rurais, nas quais se mensuraram riqueza de espécies, densidade, área basal e índices de diversidade e realizado dendrograma de similaridade florística entre as parcelas na zona urbana de rural. As florestas urbanas apresentaram menor densidade arbórea, área basal e riqueza estimada quando comparadas às áreas rurais. Apesar da elevada diversidade florística nas áreas urbanas, observou-se elevada ocorrência de espécies exóticas, como *Mangifera indica* e *Leucaena leucocephala*, nestas áreas. Análises de similaridade (índice de Jaccard) revelaram segregação florística entre os ambientes, com apenas duas parcelas urbanas se agrupando com as rurais, localizadas em parque municipal protegido. Os resultados indicam que a introdução de espécies exóticas, aliada à fragmentação e à pressão urbana, compromete a integridade ecológica das florestas ripárias urbanas. Recomenda-se o manejo de espécies invasoras e o plantio de espécies nativas, especialmente frutíferas, para promover a conservação e restauração ecológica em áreas urbanas do Cerrado.

Palavras-chave: Floresta ripária; mata ciliar; Cerrado; diversidade florística; urbanização; espécies exóticas.

INTRODUÇÃO

Florestas situadas próximo a recursos hídricos atuam como pilares ecológicos que asseguram a estabilidade dos ecossistemas e a continuidade dos serviços ambientais.

Segundo o Novo Código Florestal Brasileiro, lei 12.651 (BRASIL, 2012), a degradação dessas florestas viola a legislação ambiental e compromete serviços ecossistêmicos essenciais, como a proteção de recursos bióticos e abióticos, a regulação do fluxo de água e a preservação da biodiversidade, gerando impactos negativos para o equilíbrio ecológico e para a sociedade (VALE *et al.*, 2015; VALE *et al.*, 2018).

Assim, desempenham um papel crucial na manutenção da biodiversidade e na provisão de serviços ecossistêmicos porém são influenciadas por fatores antrópicos que afetam sua composição e diversidade (GOMES *et al.* 2021, SILVA *et al.*, 2021, VALE *et al.*, 2021, VALE *et al.*, 2023). Porém, os fragmentos florestais em zonas rurais e urbanas enfrentam pressões antrópicas distintas sendo necessários estudos comparativo para se compreender até que ponto a redução na sua extensão e conectividade, comprometem serviços ambientais e causam a diminuição da resiliência ecossistêmica, impactando negativamente o meio ambiente e as comunidades humanas (MARIANO *et al* 2024).

Devido a carência de estudos detalhados focados em florestas ripárias contrastando áreas urbanas e rurais no Cerrado, especialmente em pequenos municípios, existe uma dificuldade na adoção de estratégias de conservação e gestão ambiental, sobretudo em áreas urbanas (COLLI; DIANESE, 2020). Neste sentido são necessários estudos de fitossociologia, abordagem amplamente utilizada para avaliar a estrutura e composição de comunidades florestais, fornecendo informações detalhadas sobre a diversidade de espécies, densidade, frequência e área basal (FELFILO *et al.*, 2011). Esses estudos de campo são essenciais para compreender a dinâmica ecológica e o estado de conservação das florestas e são a base para comparação entre florestas distintas.

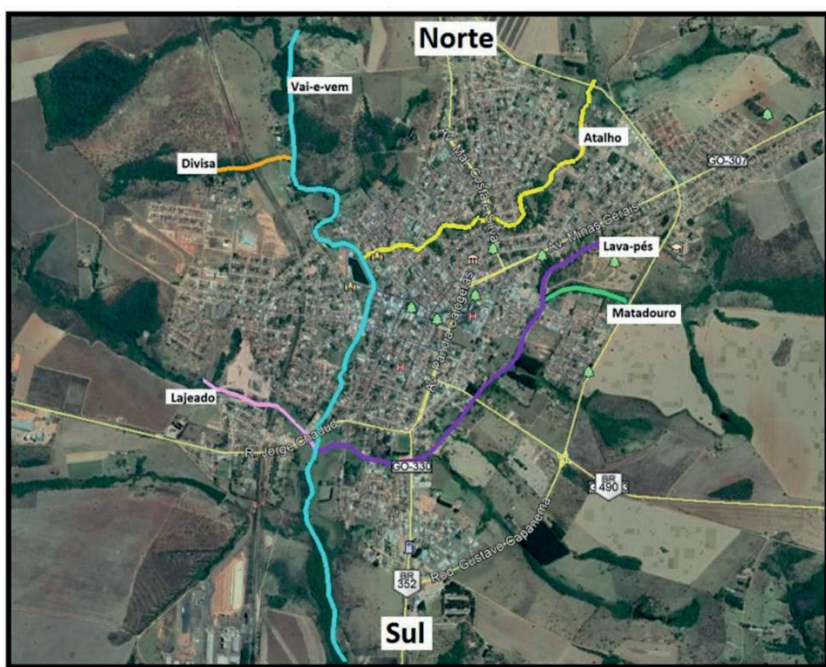
Este estudo comparou dados de fitossociologia em florestas ciliares presentes dentro do perímetro urbano na cidade de Ipameri-GO com estudos já realizadas em florestas ciliares localizadas na zona rural em Reservas Legais e consideradas em bom estágio de conservação, conforme demonstra.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi conduzido em 23 parcelas de 20x20m localizadas em cinco córregos na cidade de Ipameri-GO (Figura 1). Essas parcelas foram comparadas com outras parcelas situadas em áreas rurais, especificamente em matas ciliares protegidas que estão em bom estado de conservação.

Figura 1 - Córregos e Ribeirões da cidade de Ipameri-GO que tiveram suas matas ciliares avaliadas em campo por meio de inventário florestal e com uso de imagens aéreas com drone.



Clima da região

A região apresenta o clima tropical, onde as características apresentadas são invernos secos e com verões chuvosos. Segundo a UEG (2025) em 2024, o total anual de precipitação registrado foi de 1.527 mm, concentrando-se mais de 95% no período chuvoso de março a outubro. A partir de abril os índices

pluviométricos apresentam uma redução progressiva, seguindo o padrão climatológico da região, com valores mínimos observados entre maio e agosto, período no qual os acumulados mensais atingiram 0,0 mm. A média de temperatura no período chuvoso foi de 25,8°C e 21,8°C no período seco.

Este clima caracteriza-se como Aw, cuja letra A representa o clima tropical (com temperaturas médias anuais superiores a 18° C) e a letra w representa uma estação seca no inverno, segundo a classificação de Koppen-Geiger (CARDOSO *et al.*, 2014).

Coleta de dados em campo

Composição florística e estrutura horizontal: Foram amostradas 23 parcelas no perímetro urbano de Ipameri-GO distribuídas em cinco córregos da cidade (Figura 1). Em cada parcela foram identificadas as espécies arbóreas e medidos a circunferência (utilizando fita métrica) e a altura (utilizando um clinômetro Haglof) de todos os indivíduos arbóreos vivos com circunferência igual ou superior a 15 cm, mensurado a 1,30 m do solo ($C_{1,30} \geq 15$ cm). Estes dados foram comparados com 13 parcelas amostradas em quatro florestas ciliares próximas a cidade de Ipameri-GO, todas localizadas em Reservas Legais na zona rural da região de Ipameri e a porção próximo aos recursos hídricos (onde foram plotadas as parcelas) estão no interior florestal e de 80 a 100 m de distância da borda florestal (SOUZA *et al.*, 2021; MARIANO *et al* 2024) sendo consideradas em bom estágio de conservação.

Para cada árvore foi calculada a área basal (área ocupada pela seção transversal do caule das árvores a $C_{1,30}$). Baseado no número de árvores totais, soma das áreas basais de todas as árvores e número de parcelas em que as espécies foram amostradas, foram calculados os seguintes parâmetros fitossociológicos: densidade relativa (proporção do número de árvores de cada espécie em relação ao total da comunidade), dominância relativa (proporção da área basal de uma espécie em relação à área basal total da comunidade), frequência relativa (proporção da frequência absoluta da espécie em relação a soma de todas as frequências absolutas de todas as espécies) e valor de importância em porcentagem.

Florestas Urbanas x Rurais (riqueza, densidade e área basal)

Após aferição da normalidade dos dados pelo teste de Liliefors (TERÁN-GARCIA; PÉREZ-FERNÁNDES, 2024) a riqueza e a área basal foram considerados não normais, logo optou-se por testes não paramétricos para se verificar se existe diferença entre a mediana da riqueza, densidade e área basal entre a zona urbana e rural pelo teste de Brunner-Munzel (BRUNNER; MUNZEL, 2000) próprio para dados não paramétricos.

Riqueza e estimadores de riqueza: A riqueza de espécies (número de espécies presentes em cada parcela), o índice de diversidade de Shannon e a equitabilidade de Pielou foram calculados e comparados entre as parcelas presentes nas zonas urbanas e rurais. O teste t de Hucheson foi realizado para a comparação dos índices de diversidades de Shannon. A riqueza de espécies foi estimada por meio de 1.000 randomizações, utilizando o estimador Chao 1 indicado para amostragens pequenas (CHAO *et al.*, 2009), utilizando-se o software ESTIMATES 7.5, conforme os métodos de Colwell (2013).

Florestas Urbanas x Rurais - Similaridade florística e estrutural

A similaridade das parcelas da zona urbana e rural foi comparada para a presença e ausência de espécies pelo coeficiente de similaridade de Jaccard (FÁVERO; BELFIORE, 2024). Este índice varia de 0,0 a 1,0, onde valores próximos a 1,0 indicam alta similaridade e valores próximos a 0,0 indicam baixa similaridade. A técnica de agrupamento média de grupo foi utilizada para confecção de um dendrograma de similaridade para ambos os índices. A média de grupo foi considerada como a melhor técnica para realização de dendrogramas para dados de inventários florestais e possui elevado coeficiente de correlação cofenética em comparação a outras técnicas de agrupamento (ALBUQUERQUE *et al.*, 2016). O coeficiente de correlação cofenética, equivalente ao coeficiente de Pearson, serve para medir a concordância entre os agrupamentos obtidos e a matriz de distâncias original (CAPP; NIENOV, 2020), foram calculados para os dendrogramas.

RESULTADOS

Composição florística e estrutura horizontal na zona urbana

A amostragem resultou em um total de 308 indivíduos arbóreos vivos (345 ind. ha⁻¹), pertencentes a 99 espécies distribuídas em 20 famílias botânicas (Tabela 1). A elevada diversidade florística observada nas florestas ciliares urbanas, refletida pelo Índice de Shannon ($H' = 4,32$) e pela Equabilidade de Pielou ($J' = 0,91$), indica uma estrutura vegetal relativamente homogênea entre a vegetação arbórea. (Tabela 2).

Tabela 1 - Lista dos parâmetros fitossociológicos, em ordem decrescente de VI%, das espécies presentes de 20 áreas de Cerrado na cidade de Ipameri/GO. N° = número de indivíduos; DeR = densidade relativa; DoR = dominância relativa; FrR = frequência relativa; FrA = frequência absoluta; VI% = valor de importância; AB =Área basal; Ab.ha-1= Área basal por hectare.

Espécies	Ind,ha ⁻¹	DeR	DoR	FrA	FrR	VI%
<i>Mangifera indica</i>	11,36	2,90	9,80	4,00	2,31	5,0
<i>Inga laurina</i>	14,77	3,77	6,80	7,00	4,05	4,9
<i>Anadenanthera peregrina</i>	15,91	4,06	5,52	4,00	2,31	4,0
<i>Cecropia pachysrachya</i>	18,18	4,64	1,97	8,00	4,62	3,7
<i>Guarea guidonea</i>	14,77	3,77	3,07	6,00	3,47	3,4
<i>Sapium haemateospermium</i>	13,64	3,48	3,89	5,00	2,89	3,4
<i>Tapirira guianensis</i>	13,64	3,48	2,84	4,00	2,31	2,9
<i>Platonia insignis</i>	2,27	0,58	6,70	2,00	1,16	2,8
<i>Psidium guajava</i>	17,05	4,35	0,98	5,00	2,89	2,7
<i>Matayba guianensis</i>	13,64	3,48	2,50	3,00	1,73	2,6
<i>Handroanthus albus</i>	4,55	1,16	5,45	1,00	0,58	2,4
<i>Musa ssp</i>	12,50	3,19	3,04	1,00	0,58	2,3
<i>Machaerium acutifolium</i>	4,55	1,16	3,44	2,00	1,16	1,9
<i>Leucaena leucocephala</i>	7,95	2,03	1,69	3,00	1,73	1,8
<i>Xylopia aromatica</i>	7,95	2,03	0,38	4,00	2,31	1,6
<i>Zanthoxylum rhoifolium</i>	5,68	1,45	0,90	4,00	2,31	1,6
<i>Tibouchina granulosa</i>	6,82	1,74	1,52	2,00	1,16	1,5
<i>Virola urbaniana</i>	10,23	2,61	0,87	2,00	1,16	1,5
<i>Ceiba speciosa</i>	2,27	0,58	3,39	1,00	0,58	1,5
<i>Nectandra cissiflora</i>	4,55	1,16	1,06	3,00	1,73	1,3
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	6,82	1,74	0,88	2,00	1,16	1,3
<i>Qualea grandiflora</i>	4,55	1,16	1,43	2,00	1,16	1,3

Espécies	Ind,ha⁻¹	DeR	DoR	FrA	FrR	VI%
<i>Machaerium acutifolium</i>	3,41	0,87	0,85	3,00	1,73	1,2
<i>Myrcia splendens</i>	4,55	1,16	0,74	3,00	1,73	1,2
<i>Curatella americana</i>	5,68	1,45	1,12	2,00	1,16	1,2
<i>Tachigali subvelutina</i>	4,55	1,16	0,94	2,00	1,16	1,1
<i>Erythroxylum campestre</i>	4,55	1,16	0,17	3,00	1,73	1,0
<i>Erythrina speciosa</i>	4,55	1,16	0,71	2,00	1,16	1,0
<i>Persea americana</i>	2,27	0,58	1,30	2,00	1,16	1,0
<i>Randia armata</i>	5,68	1,45	0,40	2,00	1,16	1,0
<i>Siparuna guianensis</i>	5,68	1,45	0,32	2,00	1,16	1,0
<i>Aleurites moluccanus</i>	4,55	1,16	1,18	1,00	0,58	1,0
<i>Coussarea hydrangeaefolia</i>	6,82	1,74	0,64	1,00	0,58	1,0
<i>Senegalia polyphylla</i>	6,82	1,74	0,59	1,00	0,58	1,0
<i>Handroanthus heptaphyllus</i>	1,14	0,29	1,88	1,00	0,58	0,9
<i>Spondias mombin</i>	3,41	0,87	1,31	1,00	0,58	0,9
<i>Cayaponia racemosa</i>	4,55	1,16	0,71	1,00	0,58	0,8
<i>Dipteryx alata</i>	4,55	1,16	0,53	1,00	0,58	0,8
<i>Mauritia flexuosa</i>	2,27	0,58	1,31	1,00	0,58	0,8
<i>Anacardium occidentale</i>	2,27	0,58	0,32	2,00	1,16	0,7
<i>Mimosa caesalpiniaefolia</i>	2,27	0,58	0,30	2,00	1,16	0,7
<i>Myrsine guianensis</i>	3,41	0,87	0,10	2,00	1,16	0,7
<i>Enterolobium contortisliquum</i>	1,14	0,29	1,15	1,00	0,58	0,7
<i>Inga vera</i>	2,27	0,58	1,00	1,00	0,58	0,7
<i>Spondias dulcis</i>	1,14	0,29	1,13	1,00	0,58	0,7
<i>Tapirira obtusa</i>	2,27	0,58	0,98	1,00	0,58	0,7
<i>Cestrum intermedium</i>	2,27	0,58	0,05	2,00	1,16	0,6
<i>Lithraea molleoides</i>	2,27	0,58	0,13	2,00	1,16	0,6
<i>Chrysophyllum gonocarpum</i>	2,27	0,58	0,76	1,00	0,58	0,6
<i>Inga sessilis</i>	4,55	1,16	0,19	1,00	0,58	0,6
<i>Miconia cuspidata</i>	2,27	0,58	0,64	1,00	0,58	0,6
<i>Acrocomia aculeata</i>	1,14	0,29	0,66	1,00	0,58	0,5
<i>Citrus reticulata</i>	3,41	0,87	0,18	1,00	0,58	0,5
<i>Eucalyptus ssp.</i>	1,14	0,29	0,63	1,00	0,58	0,5
<i>Genipa amaricana</i>	1,14	0,29	0,54	1,00	0,58	0,5
<i>Guarea macrophylla</i>	2,27	0,58	0,36	1,00	0,58	0,5
<i>Inga edulis</i>	2,27	0,58	0,40	1,00	0,58	0,5
<i>Platypodium elegans</i>	1,14	0,29	0,61	1,00	0,58	0,5

Espécies	Ind,ha⁻¹	DeR	DoR	FrA	FrR	VI%
<i>Syagrus oleracea</i>	2,27	0,58	0,46	1,00	0,58	0,5
<i>Tabebuia ochracea</i>	2,27	0,58	0,32	1,00	0,58	0,5
<i>Bambusa vulgaris</i>	2,27	0,58	0,09	1,00	0,58	0,4
<i>Cecropia angustifolia</i>	1,14	0,29	0,27	1,00	0,58	0,4
<i>Dalbergia miscolobium</i>	1,14	0,29	0,29	1,00	0,58	0,4
<i>Guazuma ulmifolia</i>	1,14	0,29	0,27	1,00	0,58	0,4
<i>Myrsine umbellata</i>	1,14	0,29	0,47	1,00	0,58	0,4
<i>Plinia cauliflora</i>	2,27	0,58	0,18	1,00	0,58	0,4
<i>Qualea parviflora</i>	1,14	0,29	0,36	1,00	0,58	0,4
<i>Roystonea oleracea</i>	1,14	0,29	0,20	1,00	0,58	0,4
<i>Schinus terebinthifolia</i>	1,14	0,29	0,18	1,00	0,58	0,4
<i>Tachigali chrysophylla</i>	1,14	0,29	0,26	1,00	0,58	0,4
<i>Vernonia</i> sp	1,14	0,29	0,25	1,00	0,58	0,4
<i>Leptolobium elegans</i>	1,14	0,29	0,06	1,00	0,58	0,3
<i>Annona emarginata</i>	1,14	0,29	0,05	1,00	0,58	0,3
<i>Bauhinia forticata</i>	1,14	0,29	0,05	1,00	0,58	0,3
<i>Blepharocalyx salicifolius</i>	1,14	0,29	0,02	1,00	0,58	0,3
<i>Bowdichia virgilioides</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Calophyllum brasiliense</i>	1,14	0,29	0,02	1,00	0,58	0,3
<i>Cariniana estrellensis</i>	1,14	0,29	0,05	1,00	0,58	0,3
<i>Cestrum laevigatum</i>	1,14	0,29	0,07	1,00	0,58	0,3
<i>Cinnamomum verum</i>	1,14	0,29	0,14	1,00	0,58	0,3
<i>Coccoloba mollis</i>	1,14	0,29	0,17	1,00	0,58	0,3
<i>Croton urucurana</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Cupania vernalis</i>	1,14	0,29	0,15	1,00	0,58	0,3
<i>Diospyros hispida</i>	1,14	0,29	0,05	1,00	0,58	0,3
<i>Erythroxylum daphnites</i>	1,14	0,29	0,11	1,00	0,58	0,3
<i>Erythroxylum deciduum</i>	1,14	0,29	0,04	1,00	0,58	0,3
<i>Eugenia klotzchiana</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Eugenia pyriformis</i>	1,14	0,29	0,06	1,00	0,58	0,3
<i>Guettarda pohliana</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Guettarda viburnoides</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Joannesia princeps</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
<i>Maclura tinctoria</i>	1,14	0,29	0,07	1,00	0,58	0,3
<i>Matayba elaeagnoides</i>	1,14	0,29	0,06	1,00	0,58	0,3
<i>Miconia minutiflora</i>	1,14	0,29	0,15	1,00	0,58	0,3

Espécies	Ind,ha ⁻¹	DeR	DoR	FrA	FrR	VI%
<i>Nectandra lanceolata</i>	1,14	0,29	0,15	1,00	0,58	0,3
<i>Rudgea virburnoides</i>	1,14	0,29	0,09	1,00	0,58	0,3
<i>Schefflera morototoni</i>	1,14	0,29	0,02	1,00	0,58	0,3
<i>Tabebuia roseoalba</i>	1,14	0,29	0,05	1,00	0,58	0,3
<i>Terminalia argentea</i>	1,14	0,29	0,03	1,00	0,58	0,3
Não identificada	11,36	2,90	1,60	4,00	2,31	2,3

Fonte: Próprios autores.

Tabela 2 - Parâmetros gerais entre florestas ciliares consideradas conservadas e presentes na zona rural e florestas ciliares na zona urbana de Ipameri-GO. a = resultado do teste t de hutchenson (t = 0,028177, df =719,46, p = 0,977).

Parâmetro	Urbana	Rural
Área amostral (ha ⁻¹)	0,92	0,52
Riqueza de espécies total	99	109
Chao1 Estimador (0,52 ha ⁻¹)	105	137
Densidade de Árvores.ha ⁻¹	317b	1275a
Área Basal (m ² .ha ⁻¹)	10,32b	26,35a
Shannon_(H)	4,29a	4,15a
Equitabilidade (J)	0,90a	0,87a

Fonte: Próprios autores.

A composição florística foi composta majoritariamente por espécies nativas que apresentaram ampla distribuição (alta frequência relativa), densidade e dominância, no entanto as exóticas Manga - *Mangifera indica* (1° em VI%), Bananeira - *Musa spp* (12° em VI%) e Leucena - *Leucaena leucocephala* (14° em VI) estiveram entre as 20 mais importantes dessas florestas ciliares urbanas.

Dentre as espécies nativas mais importantes ocorreram desde espécies comuns em florestas ciliares e ambientes úmidos, como *Inga laurina*, *Cecropia pachystachya*, *Guarea guidonea*, generalistas de ambientes florestais como *Tapirira guianensis*, *Anadenanthera peregrina* e *Matayba guianensis* assim como típicas de cerrados como *Xylopia aromatica*, *Machaerium acutifolium*, *Qualea grandiflora* e *Curatella americana*.

O fato de haverem espécies exóticas e uma mistura entre espécies mais típicas de diversos ambientes favoreceu a alta riqueza total encontrada dentro da zona urbana de Ipameri.

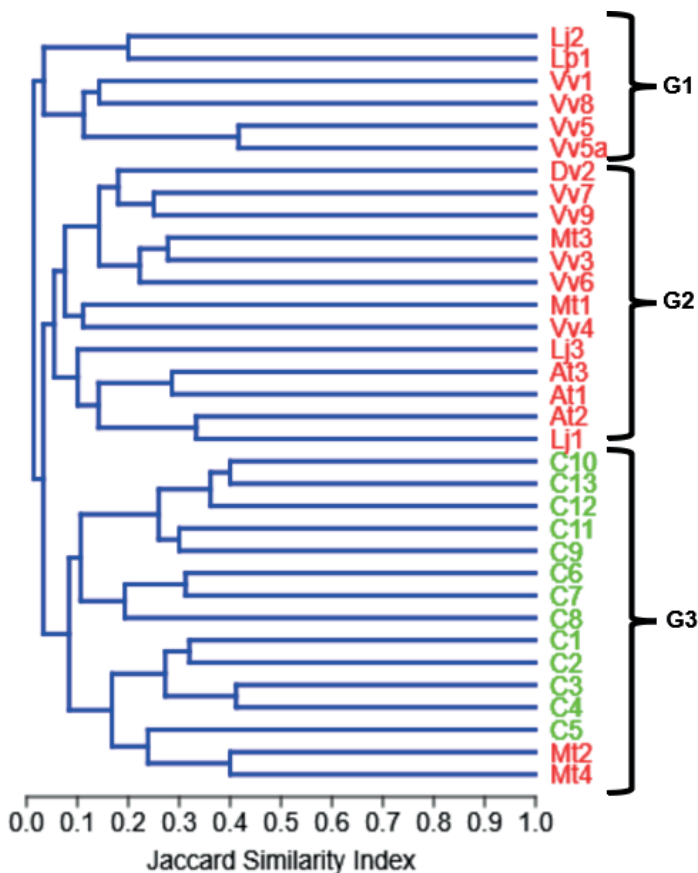
Florestas Urbanas x Rurais - Riqueza e estimadores de riqueza

A riqueza total de espécies, o índice de diversidade de Shannon (teste t de Hutcheson) e a Equitabilidade de Pielou foram semelhantes entre a florestas na zona urbana e rural (Tabela 2). No entanto a área amostral da zona urbana foi quase o dobro em relação a zona rural, logo, apesar da riqueza de espécies ser semelhante, o estimador de riqueza para a área amostral da zona rural demonstrou que a área urbana obteve 28% a menos de espécies. As florestas ciliares urbanas apresentaram menores valores de riqueza, densidade e área basal em relação às florestas ciliares presentes na zona urbana (Tabela 2 1, BM = -98.81, $p < 0.001$).

Florestas Urbanas x Rurais - Similaridade florística

O dendrograma de similaridade baseado no índice de Jaccard (que considera a presença ou ausência das espécies nas parcelas) entre as parcelas da zona urbana e rural demonstraram haver separação de dois grupos. O G1 formado apenas por parcelas na zona urbana com maioria presente no córrego Vai-e-vem (Vv5, VV5a, Vv8, Vv1, Vv6, Lj2, Lp1) e o segundo formado pelas demais parcelas. Este 2º grupo pode ser subdividido em outros dois grupos bastante distintos; o G2 formado por 13 parcelas dos córregos do Atalho, Divisa, Vai-e-Vem, Lajeado e Matadouro e o G3 formado por todas as parcelas da zona rural e duas da zona urbana (Mt2, M4) (Figura 2).

Figura 2 - Dendrograma de similaridade para o Índice de Jaccard em parcelas plotadas em florestas ciliares presentes em áreas conservadas da zona rural (em verde) e no perímetro urbano (em vermelho) de Ipameri-GO. O coeficiente de correlação cofenética foi de 0,81. Este coeficiente avalia a fidelidade de um dendrograma em representar as distâncias entre os objetos agrupados, em relação à matriz original de dissimilaridades.



Fonte: Próprios autores.

DISCUSSÃO

Composição florística e estrutura horizontal

Os resultados demonstram que as florestas ciliares urbanas de Ipameri (Goiás – Brasil) apresentam riqueza total próximo as florestas ciliares localizadas na zona rural, mas esse padrão é fortemente influenciado pela predominância de espécies exóticas.

Quando as exóticas são excluídas, a riqueza urbana diminui significativamente e, quando analisado o número de espécies por parcelas é evidenciado uma menor riqueza de espécies na zona urbana. Florestas ciliares estão entre as formações mais ricas e diversas de espécies pela presença de espécies capazes de habitar diferentes ambientes, desde espécies mais típicas de áreas mais secas (geralmente em região mais declivosa), espécies típicas de ambientes parcialmente alagados ou alagados na estação chuvosa e ambientes frequentemente alagados (VALE *et al.*, 2018).

A inserção de espécies exóticas adaptáveis a ambientes perturbados e estas, devido ao seu potencial reprodutivo e adaptativo, dominam a paisagem reduzindo a biodiversidade nativa (ARONSON *et al.*, 2017; GAERTNER *et al.*, 2017). Este fenômeno ocorreu em praticamente todas as parcelas e córregos da cidade e deve ser comum para outros centros urbanos de cidades do interior do Cerrado Brasileiro.

Em contraste, as áreas rurais, por sofrerem menos distúrbios e estarem mais conectadas a ecossistemas naturais, sustentam uma vegetação predominantemente nativa.

Isso reforça a ideia de que espécies exóticas devem prosperar de forma mais agressiva e invasora em locais com forte a pressão antrópica, como fragmentação de habitat, poluição e preferências de plantio seletivo (YANG *et al.*, 2022) e este efeito ocorre em cidades de pequeno porte presentes no Brasil Central.

Muitas espécies exóticas presentes em áreas urbanas, particularmente as frutíferas (*Musa spp.*, *Mangifera indica*, *Persea americana*), desempenham importantes funções socioecológicas, sendo amplamente cultivadas pela população local devido ao seu valor alimentício e contribuição para o bem-estar social, o que as torna componentes relevantes para a segurança alimentar urbana (CLARK; NICHOLAS, 2013). Como observado em outros estudos, essas espécies frutíferas exóticas geralmente apresentam baixa capacidade de colonização em ecossistemas naturais adjacentes, reduzindo assim a necessidade de manejo intensivo.

No entanto, a presença de espécies exóticas invasoras, como *Leucaena leucocephala*, representa um cenário distinto. Introduzida no Brasil originalmente para alimentação animal (FLORY; LIEURANCE, 2021), essa espécie demonstra alto potencial de dispersão e competição, colonizando áreas que poderiam

ser ocupadas por espécies nativas ou mesmo por exóticas com função social (LIMA *et al.*, 2019). Estudos recentes comprovam que *L. leucocephala* altera significativamente a composição do solo e inibe o estabelecimento de outras plantas através de mecanismos alelopáticos (KOUTIKOS *et al.*, 2023), o que justifica plenamente ações de manejo seletivo.

Nesse contexto, a manutenção das espécies frutíferas exóticas de valor sociocultural, como mangueiras e abacateiros, é relevante, desde que não demonstrem comportamento invasivo em fragmentos naturais (TROPPMAIR; BIANCHINI, 2020) e para *L. Leucocephala* o ideal seria a sua substituição gradativa por espécies nativas que ofereçam serviços ecossistêmicos similares como sombreamento e fixação de nitrogênio sem os impactos negativos das espécies invasoras (DANTAS; SILVA, 2021).

Florestas Urbanas x Rurais (riqueza, densidade e área basal)

O estudo evidencia uma marcante redução na densidade arbórea, riqueza de espécies e área basal nas zonas urbanas de Ipameri quando comparadas às áreas rurais adjacentes. Este padrão encontra respaldo em diversos estudos que demonstram como o processo de urbanização frequentemente resulta em menor cobertura vegetal, principalmente devido à substituição de áreas naturais por infraestrutura construída e à remoção de árvores pelos moradores (KENDAL *et al.*, 2018; NOWAK *et al.*, 2022).

A literatura especializada em ecologia urbana tem demonstrado consistentemente que populações arbóreas com tão poucos indivíduos enfrentam elevado risco de extinção local devido a múltiplos fatores inter-relacionados (LOUVET *et al.*, 2024). Entre estes se destacam os chamados “efeitos de pequena população”, que incluem menor variabilidade genética e maior vulnerabilidade a flutuações demográficas aleatórias (LOPEZARAÚJO & ZÁRATE, 2023). Nestes casos as populações de espécies têm problemas decorrentes do isolamento reprodutivo, onde indivíduos solitários frequentemente enfrentam dificuldades para efetiva polinização ou dispersão de sementes (FAHRIG, 2021) e assim, existe dependência quase absoluta de intervenção humana para sua manutenção devido a sua capacidade limitada de regeneração natural sem manejo ativo (ALMEIDA *et al.*, 2020).

Esta situação configura um círculo vicioso particularmente preocupante, pois a perda progressiva de espécies raras tende a promover uma simplificação ainda mais acentuada da comunidade arbórea urbana, comprometendo significativamente sua resiliência ecológica (HAHN *et al.*, 2022). A ausência de corredores verdes funcionais combinadas com o alto grau de fragmentação característico das áreas urbanas cria um ambiente particularmente hostil para processos naturais de recolonização, tornando imprescindível a implementação de estratégias de intervenção humana planejada. Tais estratégias devem incluir tanto plantios de espécies nativas adequadas ao ambiente urbano quanto um manejo adaptativo contínuo que considere as dinâmicas ecológicas específicas de cada área (LEONG *et al.*, 2021). Esta abordagem integrada representa a alternativa mais promissora para reverter o atual quadro de empobrecimento vegetal observado na arborização urbana de Ipameri.

Florestas Urbanas x Rurais - Similaridade florística

O dendrograma de similaridade demonstrou uma clara segregação vegetal, com as parcelas Mt2 e Mt4 do Parque Municipal da Cidade agrupando-se próximas as das áreas rurais conservadas. Esta similaridade sugere que o status de proteção do parque, caracterizado por reduzida pressão antrópica e ausência de espécies exóticas invasoras, tem sido eficaz em manter uma comunidade vegetal com características próximas às condições naturais. Outros estudos recentes que destacam o papel fundamental de unidades de conservação urbanas como refúgios para a biodiversidade nativa (ARONSON *et al.*, 2017; BENINDI *et al.*, 2022), reforçando sua importância estratégica como núcleos de dispersão para áreas adjacentes quando adequadamente manejados (TZOULAS *et al.*, 2021).

As parcelas degradadas apresentaram composição vegetal significativamente distinta das áreas preservadas, com redução na riqueza de espécies e dominância de pioneiras generalistas (*Cecropia pachystachya*), conforme documentado em estudos comparativos sobre impactos antrópicos em florestas ripárias (DURIGAN *et al.*, 2020; MARTINS *et al.*, 2022). Em contraste, as áreas protegidas dentro do Parque Municipal exibiram maior complexidade estrutural e diversidade vegetal, incluindo espécies tardias exigentes em umidade (*Protium heptaphyllum*).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Tendo em vista os resultados obtidos e a variedade de condições das áreas ripárias na zona urbana, como recomendação, deve-se haver o manejo e controle de espécies exóticas com alto poder de regeneração, sobretudo para *L. leucocephala*, principalmente com a retirada das árvores de grande porte e em fase de reprodutiva. Recomenda-se também o replantio de espécies nativas de valor conservacionista e frutíferas nativas, sobretudo aquelas presentes nas florestas ripárias da região, em regiões da zona urbana que possuem poucas construções e espaço apropriado para a sua recuperação.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. A. *et al.* Comparação entre coeficientes de similaridade: uma aplicação em ciências florestais. *Matemática e Estatística em Foco*, v. 4, n. 2, p. 102–114, 2016.
- ALMEIDA, D. R. A. *et al.* The role of urban forestry in maintaining biodiversity. *Urban Ecosystems*, v. 23, p. 893–907, 2020.
- ARONSON, M. F. J. *et al.* Biodiversity in the city: key challenges for urban green space management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 15, n. 4, p. 189–196, 2017.
- BENINDI, M. *et al.* The role of urban parks in maintaining native biodiversity in tropical cities. *Urban Ecosystems*, v. 25, n. 2, p. 345–359, 2022.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, nº 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, e nº 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória nº 2.166-67, de 24 de agosto de 2001. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, ano 149, n. 101, p. 1, 28 maio 2012.
- BRUNNER, E.; MUNZEL, U. The nonparametric Behrens–Fisher problem: asymptotic theory and a small sample approximation. *Biometrical Journal*, New York, v. 42, n. 1, p. 17–25, 2000.
- CAPP, E.; NIENOV, O. H. (Orgs.). Bioestatística quantitativa aplicada. Porto Alegre: UFRGS, 2020. ISBN 978-65-86232-43-1. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/213116>.
- CARDOSO, M. R. D. *et al.* Classificação climática de Köppen Geiger para o estado de Goiás e o Distrito Federal. *Acta Geográfica*, Boa Vista, v. 8, n. 16, p. 40–55, jan./mar. 2014. DOI: 10.5654/actageo2014.0004.0016.
- CHAO, A. *et al.* Estimating the number of species in a stochastic abundance model. *Ecology*, v. 90, n. 4, p. 1125–1133, 2009. DOI: 10.1890/07-2147.1.

CLARK, K. H.; NICHOLAS, K. A. Introducing urban food forestry: a multifunctional approach to increase food security and provide ecosystem services. *Landscape Ecology*, v. 28, n. 9, p. 1649–1669, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9903-z>.

COLLI, G. R.; DIANESE, J. C. Biodiversidade e Conservação do Cerrado: Avanços Recentes e Antigos Desafios. *Biodiversity and Conservation*, v. 29, n. 4, p. 1237-1256, 2020.

COLWELL, R. K. Species richness estimation from probabilities of observing new species. *Biodiversity and Conservation*, v. 22, n. 5, p. 1199–1211, 2013. DOI: 10.1007/s10531-013-0451-7.

DANTAS, T. *et al.* Eficácia de métodos de controle para *Leucaena leucocephala* em áreas urbanas. *Revista Árvore*, v. 47, e4732, 2023.

DANTAS, T.; SILVA, L. C. Substituição de invasoras por nativas em áreas verdes urbanas. *Boletim de Pesquisa Ambiental*, n. 28, p. 22-35, 2021.

DURIGAN, G. *et al.* Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. *Forest Ecology and Management*, v. 458, 117802, 2020.

FAHRIG, L. Why do several small patches hold more species than few large patches? *Global Ecology and Biogeography*, v. 30, n. 7, p. 1309–1322, 2021.

FÁVERO, L. P. L.; BELFIORE, P. P. Manual de análise de dados: estatística e modelagem multivariada com Excel®, SPSS®, Stata®, R® e Python®. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2024.

FELFILI, J. M. *et al.* Fitossociologia no Brasil: métodos e estudos de casos. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011. v. 1. 558 p.

FLORY, S. L.; LIEURANCE, D. Managing invasive *Leucaena leucocephala* in tropical ecosystems. *Biological Invasions*, v. 23, p. 3385–3399, 2021.

GAERTNER, M. *et al.* Non-native species in urban environments: patterns, processes, impacts and challenges. *Biological Invasions*, v. 19, n. 11, p. 3333–3353, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10530-017-1598-7>.

GOMES, L. J. P. *et al.* Conservation status of riparian forests in the Brazilian Cerrado. *Journal for Nature Conservation*, v. 60, 125968, 2021.

HAHN, M. *et al.* Urban tree population dynamics: assessing extinction debt in cities. *Journal of Applied Ecology*, v. 59, n. 4, p. 1045–1055, 2022.

KENDAL, D. *et al.* A global comparison of diversity in urban green spaces. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 29, p. 13–24, 2018.

LEONG, M. *et al.* Biodiversity conservation in urban environments. *Conservation Biology*, v. 35, n. 3, p. 800–810, 2021.

LIMA, R. A. *et al.* Invasão biológica por *Leucaena leucocephala* no Brasil. *Biodiversidade Brasileira*, v. 9, n. 1, p. 110-125, 2019.

LOPEZARAÚJO, L.; ZÁRATE, J. Genetic consequences of small population size in urban trees. *Urban Ecosystems*, v. 26, p. 123–135, 2023.

LOUVET, A. *et al.* Assessing the extinction risk of the spontaneous flora in urban tree bases. *PLOS Computational Biology*, v. 20, n. 6, e1012191, 2024.

MARIANO, G. V. P. *et al.* Edge effect in Cerrado Seasonal Semideciduous Forests. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 34, n. 2, 2024. DOI: 10.5902/1980509867155.

MARTINS, S. V. *et al.* Ecological restoration in degraded riparian zones in Brazil. *Restoration Ecology*, v. 30, e13535, 2022.

NOWAK, D. J. *et al.* The decline of urban tree cover in global cities. *Nature Sustainability*, v. 5, p. 642–650, 2022.

SILVA, A. C. *et al.* Ecotonal patterns in riparian forests of central Brazil. *Flora*, v. 274, 151743, 2021.

SOUZA, A. G. V. *et al.* Atributos microbiológicos do solo sob áreas eucalipto e florestas estacionais. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 132, e3673, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18671/scifor.v49n132.03>.

TERÁN GARCÍA, E.; PÉREZ FERNÁNDEZ, R. A robust alternative to the Lilliefors test of normality. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 2024. DOI: 10.1080/00949655.2023.2291138.

TROPPEMAIR, H.; BIANCHINI, E. Árvores urbanas: funções e conflitos. *Revista do Instituto Florestal*, v. 32, p. 67-79, 2020.

TZOULAS, K. *et al.* Urban green infrastructure as a tool for biodiversity conservation. *Landscape and Urban Planning*, v. 210, p. 104065, 2021.

VALE, V. S. *et al.* Changes in soil moisture and riparian forest structure after a dam construction. *Iheringia. Série Botânica*, v. 73, n. 3, p. 250–260, 2018. DOI: 10.21826/2446-8231201873304.

VALE, V. S. *et al.* Effects of reduced water flow in a riparian forest community: a conservation approach. *Journal of Tropical Forest Science*, v. 27, n. 1, p. 13–24, 2015.

VALE, V. S. *et al.* Impacts on seasonal dry forests located for several years near dams in the Araguari River Basin. *Scientia Forestalis*, v. 49, n. 130, e3542, 2021. Disponível em: <https://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr130/2318-1222-scifor-49-130-e3542.pdf>.

VALE, V. S. *et al.* Response groups of plants from deciduous and semi deciduous forests based on dynamic rates: evaluating impacts imposed by dams. *Advances in Forestry Science*, v. 10, n. 3, 2023. DOI: 10.34062/afs.v10i3.14648.

YANG, X. *et al.* Global change and biological invasions. *Journal of Plant Ecology*, v. 15, n. 3, p. 425–428, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtac013>.

AVANÇOS NA MODELAGEM DE NICHOS ECOLÓGICO DE ESPÉCIES DE ÁREAS ÚMIDAS: CONTRIBUIÇÕES PARA A SUSTENTABILIDADE E GESTÃO AMBIENTAL

Aline Lopes

Universidade Cesumar (UniCesumar)

Lilian Cristine Camillo

Universidade Cesumar (UniCesumar)

Paula Polastri

Universidade Cesumar (UniCesumar)

Giuliette Barbosa Mano

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia (INPA)

Maria Teresa Fernandez Piedade

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazonia (INPA)

RESUMO

A modelagem de nicho ecológico (ENM – Ecological Niche Modeling) consolidou-se como uma ferramenta relevante para prever a distribuição de espécies frente a alterações climáticas e pressões antrópicas. Sua aplicação em espécies associadas a áreas úmidas nos Neotrópicos tem crescido, dada a alta biodiversidade e vulnerabilidade desses ecossistemas. Este trabalho revisa avanços metodológicos recentes na modelagem de espécies de áreas úmidas neotropicais, com foco na inclusão de variáveis edáficas e hidrológicas, fatores bióticos e dados genéticos. A partir de uma revisão narrativa de 50 estudos publicados entre 2017 e 2024, identificaram-se quatro eixos principais: (i) uso de dados edáficos e climáticos; (ii) estratégias para espécies pouco amostradas; (iii) integração de fatores bióticos; e (iv) maior amplitude de nicho hidrológico em espécies amazônicas. Apesar de modelos como MaxEnt, GAM e SVM alcançarem alta acurácia ($AUC > 0,9$), persistem desafios como viés amostral e ausência de validação empírica. A integração de dados de sensoriamento remoto, atributos funcionais e informações genéticas melhora significativamente a robustez dos modelos. Além de sua relevância preditiva, os ENMs emergem como ferramentas fundamentais para promover a conservação e o uso sustentável de áreas úmidas, contribuindo para a gestão ambiental baseada em evidências. Conclui-se que, embora promissores, os ENMs demandam avanços na qualidade dos dados e abordagens multivariadas para apoiar estratégias de conservação em áreas úmidas tropicais.

Palavras-chave: Conservação; plantas aquáticas; MaxEnt; modelagem preditiva; variáveis hidrológicas.

INTRODUÇÃO

A modelagem de nicho ecológico (ENM, do inglês Ecological Niche Modeling) tem se consolidado como ferramenta essencial para prever a distribuição de espécies, sobretudo em contextos de mudanças climáticas, pressão antrópica e perda de habitats naturais (Elith & Leathwick, 2009; Guisan *et al.*, 2017). Essa abordagem baseia-se na relação entre as ocorrências conhecidas de uma espécie e variáveis ambientais, permitindo inferir áreas potencialmente adequadas para sua sobrevivência e reprodução. Nos últimos anos, a aplicação de ENMs tem crescido significativamente para espécies associadas a áreas úmidas nos Neotrópicos, ambientes caracterizados por elevada biodiversidade, serviços ecossistêmicos relevantes e alta vulnerabilidade ecológica (Junk *et al.*, 2011; Luize *et al.*, 2024).

Para espécies de áreas úmidas neotropicais, os modelos atuais, como MaxEnt e outros algoritmos de aprendizado de máquina, têm mostrado desempenho satisfatório na previsão de padrões de distribuição, especialmente quando variáveis ambientais relevantes (clima, hidrologia, solo) são incluídas (Gómez *et al.*, 2020; Valencia-Rodríguez *et al.*, 2021; Velazco *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2021; Sumbh *et al.*, 2025). No entanto, a eficácia desses modelos pode ser limitada por fatores como a ausência de dados bióticos, viés amostral, falta de variáveis hidrológicas detalhadas e a não consideração de adaptações genéticas locais (Ikeda *et al.*, 2017; Bothwell *et al.*, 2020; Chevalier *et al.*, 2024; Mendes *et al.*, 2020).

Além de seu papel técnico e científico, a modelagem de nicho ecológico representa uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade, especialmente em ecossistemas frágeis como as áreas úmidas neotropicais. Ao permitir a identificação de áreas prioritárias para conservação e prever respostas de espécies a cenários de mudança ambiental, os ENMs contribuem diretamente para o planejamento territorial, o manejo adaptativo e a definição de políticas públicas baseadas em evidências. Nesse contexto, avanços metodológicos na modelagem tornam-se fundamentais para integrar o conhecimento ecológico à gestão ambiental sustentável, promovendo o equilíbrio entre conservação da biodiversidade e uso racional dos recursos naturais.

Em função da complexidade ambiental desses ecossistemas, avanços recentes têm enfatizado a necessidade de incorporar variáveis ambientais

refinadas, como dados edáficos e hidrológicos, além de considerar interações bióticas e dispersão ativa (Velazco *et al.*, 2017; Thuiller, 2024). No entanto, a escassez de registros para muitas espécies e a heterogeneidade espacial das áreas úmidas ainda representam desafios consideráveis. Estudos vêm apontando que integrar variáveis específicas de ambientes aquáticos e utilizar algoritmos robustos pode aumentar significativamente a acurácia dos modelos, tornando-os mais úteis para fins de conservação, manejo e planejamento territorial (Valencia-Rodríguez *et al.*, 2021; Galante *et al.*, 2018).

Estudos recentes destacam que a integração de dados de sensoriamento remoto, informações genéticas e fatores bióticos pode melhorar significativamente a precisão e transferibilidade dos modelos (Leitão & Santos, 2019; Regos *et al.*, 2022; Ikeda *et al.*, 2017; Bothwell *et al.*, 2020). Apesar dos avanços, desafios persistem, como a dificuldade de modelar espécies raras, a transferência de modelos para cenários futuros e a necessidade de validação empírica em campo (Chevalier *et al.*, 2024; Warren & Seifert, 2011; Diniz-Filho *et al.*, 2019). Assim, embora os modelos de nicho ecológico sejam ferramentas valiosas para espécies de áreas úmidas neotropicais, sua eficácia depende fortemente da qualidade dos dados, escolha das variáveis e abordagem metodológica (Gómez *et al.*, 2020; Sumbh *et al.*, 2025; Velazco *et al.*, 2017; Valencia-Rodríguez *et al.*, 2021; Ikeda *et al.*, 2017; Bothwell *et al.*, 2020; Mendes *et al.*, 2020; Chevalier *et al.*, 2024; Warren & Seifert, 2011; Leitão & Santos, 2019; Regos *et al.*, 2022; Kiran *et al.*, 2024).

Diante disso, torna-se urgente compreender o estado da arte sobre os avanços metodológicos na modelagem de nicho ecológico voltada a espécies de áreas úmidas nos Neotrópicos. Este trabalho busca preencher essa lacuna, apresentando uma síntese crítica das principais abordagens e desafios enfrentados na atualidade.

OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é sintetizar os avanços metodológicos recentes na modelagem de nicho ecológico para espécies de áreas úmidas nos Neotrópicos. Os objetivos específicos são: a) identificar as principais variáveis ambientais utilizadas nos modelos; b) discutir estratégias aplicadas para

espécies pouco amostradas; c) avaliar o impacto da inclusão de fatores bióticos e hidrológicos na acurácia dos modelos.

METODOLOGIA

Este estudo baseia-se em uma revisão narrativa da literatura especializada, com foco em artigos publicados entre 2017 e 2024. A busca e sistematização dos dados foram realizadas com apoio da ferramenta Consensus, um mecanismo de busca científica baseado em inteligência artificial. A análise priorizou trabalhos sobre ENMs aplicados a espécies aquáticas ou associadas a áreas úmidas nos Neotrópicos, com ênfase em abordagens inovadoras para modelagem e planejamento territorial.

Foram realizadas 21 buscas únicas, abrangendo desde fundamentos teóricos até aplicações práticas e limitações dos modelos para espécies de áreas úmidas neotropicais. Foram identificados 1.034 artigos, dos quais 645 foram triados, 533 considerados elegíveis e, finalmente, 50 artigos foram incluídos nesta revisão. O processo busca termos relacionados à eficácia, limitações, avanços metodológicos e aplicações de modelos de nicho ecológico para espécies de áreas úmidas neotropicais, abrangendo diferentes grupos taxonômicos, abordagens metodológicas e variáveis ambientais.

RESULTADOS

A síntese das evidências extraídas da literatura quanto à eficácia dos modelos de nicho ecológico (ENM) aplicados a espécies de áreas úmidas neotropicais mostram que os resultados ainda são contraditórios (Tabela 1). Os resultados mostram que 57% dos estudos analisados apoiam firmemente o uso de ENMs, destacando sua alta acurácia preditiva e aplicabilidade para diferentes grupos taxonômicos, especialmente quando utilizados grandes conjuntos de dados e variáveis ambientais relevantes. Por outro lado, 14% dos estudos indicam uma eficácia variável, ressaltando que a performance dos modelos depende da espécie modelada e da qualidade dos dados disponíveis, especialmente em áreas úmidas fragmentadas ou com baixa amostragem. Já 29% dos artigos manifestam críticas ou ressalvas, questionando principalmente a transferibilidade dos modelos entre

escalas e sua aplicabilidade para espécies altamente especializadas, típicas dos ecossistemas neotropicais. Esses dados reforçam a necessidade de abordagens metodológicas mais refinadas, especialmente para lidar com espécies raras ou com distribuição restrita, além de estimular o uso de validações empíricas para aumentar a confiança nos resultados modelados.

Tabela 1 - Avaliação da Eficácia dos Modelos de Nicho Ecológico (ENM) para Espécies de Áreas Úmidas Neotropicais.

Resposta	%	Resumo dos Estudos	Citações
Sim	57%	4 artigos — Estudos recentes com grandes conjuntos de dados e alta precisão preditiva em periódicos importantes apoiam a eficácia do ENM para espécies de áreas úmidas neotropicais.	113 no total
Misturado	14%	1 artigo — O desempenho do ENM varia conforme a espécie e fatores de habitat; destaca-se a necessidade de amostragens repetidas em espécies de áreas úmidas fragmentadas.	4 no total
Não	29%	2 artigos — Revisões conceituais questionam a transferibilidade e aplicabilidade do ENM, especialmente para táxons neotropicais especializados.	196 no total

Fonte: As autoras, 2025.

A análise da literatura identificou quatro eixos metodológicos centrais. O primeiro é a integração de dados edáficos e climáticos, que melhora significativamente a acurácia dos modelos (Velazco *et al.*, 2017). O segundo refere-se à modelagem de espécies com poucos registros, utilizando dados de espécies filogeneticamente próximas e filtros espaciais para aumentar a robustez dos modelos (Galante *et al.*, 2018; Cavalcante *et al.*, 2020). O terceiro eixo é a inclusão de fatores bióticos, como a presença de espécies simpátricas, o que aproxima os modelos do nicho realizado (Thuiller, 2024). Por fim, observou-se que espécies arbóreas de áreas úmidas amazônicas apresentam maior amplitude de nicho hidrológico e dispersão geográfica, em relação às de terra firme (Luize *et al.*, 2024), sugerindo que áreas úmidas atuam como corredores de dispersão.

Modelos como MaxEnt, Generalized Additive Models (GAMs) e Support Vector Machines (SVMs) têm sido amplamente utilizados para prever a distribuição de plantas, peixes, mamíferos e outros organismos de áreas úmidas neotropicais. Estudos demonstram alta capacidade preditiva quando variáveis ambientais relevantes, como clima, solo e hidrologia, são incorporadas, com valores de AUC superiores a 0,9 (Gómez *et al.*, 2020; Valencia-Rodríguez *et al.*,

2021; Sumbh *et al.*, 2025; Velazco *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2021; Drake *et al.*, 2006; Stephan & Korban, 2025).

Os principais aspectos metodológicos e operacionais que influenciam a efetividade dos modelos de nicho ecológico (ENMs) aplicados a espécies de áreas úmidas neotropicais estão destacados na Tabela 2. A análise revela que os modelos apresentam, de forma geral, alta precisão preditiva, com valores de AUC alcançando até 0,90 em diversos estudos, especialmente quando aplicados a espécies aquáticas com bom volume de dados de ocorrência (Valencia-Rodríguez *et al.*, 2021). Entre os preditores ambientais mais relevantes, destacam-se variáveis climáticas, edáficas e, principalmente, hidrológicas, estas últimas sendo particularmente determinantes em ecossistemas alagáveis (Velazco *et al.*, 2017; Valencia-Rodríguez *et al.*, 2021).

No entanto, os resultados também apontam limitações recorrentes (Tabela 2), como a escassez de dados ambientais locais e a baixa densidade de registros de ocorrência, fatores que reduzem a robustez e a transferibilidade dos modelos (Contreras-Díaz *et al.*, 2022). Além disso, foi observada uma melhor performance dos ENMs em escalas espaciais amplas, enquanto sua aplicação em escalas locais ainda enfrenta desafios relacionados à resolução e especificidade das variáveis ambientais disponíveis. Esses achados reforçam a importância de integrar dados de alta resolução e considerar o contexto ecológico local para maximizar a eficácia dos ENMs em áreas úmidas neotropicais.

Tabela 2 - Efetividade dos ENMs para Espécies de Áreas Úmidas Neotropicais.

Aspecto Avaliado	Resultado/Observação	Citações
Precisão geral dos modelos	Alta (AUC até 90%) para espécies aquáticas	Valencia-Rodríguez et al. (2021)
Preditores ambientais relevantes	Clima, solo, variáveis hidrológicas aumentam robustez	Velazco et al. (2017); Valencia-Rodríguez et al. (2021)
Limitações	Dados ambientais locais e registros de ocorrências escassos	Velazco et al. (2017); Valencia-Rodríguez et al. (2021); Contreras-Díaz et al. (2022)
Escala de aplicação	Mais eficaz em escalas amplas do que locais	Contreras-Díaz et al. (2022)

Fonte: As autoras, 2025.

A qualidade e o tipo de dados utilizados são determinantes para o desempenho dos ENMs, e que estratégias integradas devem ser priorizadas

para enfrentar os principais desafios metodológicos (Tabela 3). A Tabela 3 sintetiza as principais alegações recorrentes na literatura sobre a eficácia e os desafios dos modelos de nicho ecológico (ENMs) em áreas úmidas neotropicais, acompanhadas do grau de robustez das evidências (força da evidência), raciocínio lógico associado e artigos de referência. A alegação mais fortemente sustentada (8/10) é a de que os ENMs são eficazes para prever a distribuição de espécies quando variáveis ambientais relevantes, como clima, solo e hidrologia, são incluídas nos modelos.

Outras afirmações com força moderada de evidência (5 a 7/10) apontam que a inclusão de dados genéticos e fatores bióticos aumenta a precisão preditiva dos modelos, enquanto a ausência de variáveis hidrológicas detalhadas e o viés amostral representam fatores limitantes importantes (Tabela 3). Estudos também indicam que modelos aplicados a espécies raras ou com poucos registros são menos precisos, e que a ausência de restrições espaciais pode levar à superestimativa de áreas potencialmente adequadas. Em contrapartida, a integração de sensoriamento remoto e atributos funcionais emerge como estratégia eficaz para aumentar a robustez dos modelos.

Tabela3 - Principais alegações e evidências de apoio identificadas nestes documentos.

Alegações	Força da evidência	Raciocínio	Artigos
Modelos de nicho ecológico são eficazes para prever distribuição de espécies de áreas úmidas neotropicais quando variáveis ambientais relevantes são incluídas	Evidence strength: Strong (8/10)	Diversos estudos mostram alta acurácia com variáveis climáticas, hidrológicas e edáficas	(Gómez et al., 2020; Velazco et al., 2017; Valencia-Rodríguez et al., 2021; Sumbh et al., 2025; Zhong et al., 2021; Drake et al., 2006; Stephan & Korban, 2025)
Inclusão de dados genéticos e bióticos melhora a precisão dos modelos	Evidence strength: Moderate (7/10)	Modelos geneticamente informados e com fatores bióticos superam modelos tradicionais	(Ikeda et al., 2017; Bothwell et al., 2020; Cavalcante et al., 2020; Anderson, 2017)
Viés amostral e ausência de variáveis hidrológicas limitam a eficácia dos modelos	Evidence strength: Moderate (6/10)	Estudos apontam redução de precisão e transferibilidade sem essas variáveis	(Chevalier et al., 2024; Mendes et al., 2020; Warren & Seifert, 2011; Diniz-Filho et al., 2019; Anderson, 2017)
Modelos são menos precisos para espécies raras ou com poucos registros	Evidence strength: Moderate (5/10)	Baixa amostragem reduz capacidade preditiva, especialmente em ambientes heterogêneos	(Chevalier et al., 2024; Warren & Seifert, 2011; Diniz-Filho et al., 2019)

Alegações	Força da evidência	Raciocínio	Artigos
Sensoriamento remoto e atributos funcionais aumentam a robustez dos modelos	Evidence strength: Moderate (5/10)	Integração de dados de alta resolução espacial/temporal melhora previsões	(Leitão & Santos, 2019; Regos et al., 2022; Moor et al., 2017; Kissel et al., 2020)
Modelos podem superestimar áreas adequadas sem restrições espaciais	Evidence strength: Moderate (4/10)	Restrições espaciais reduzem superprevisão, mas nem sempre são aplicadas	(Mendes et al., 2020; Chevalier et al., 2024)

Fonte: As autoras, 2025.

A análise quantitativa revela que variáveis climáticas têm sido amplamente incorporadas na modelagem de plantas de áreas úmidas (12 estudos), seguidas de variáveis hidrológicas (7) e dados genéticos (2). No entanto, há grandes lacunas (“GAPs”) quanto ao uso sistemático de informações genéticas e validação em campo, especialmente em abordagens como modelos geneticamente informados e modelos baseados em sensoriamento remoto (Tabela 4).

Espécies aquáticas e mamíferos/aves têm recebido menor atenção quanto à inclusão de variáveis hidrológicas e validação empírica, o que compromete a representatividade e a aplicabilidade dos modelos nesses grupos (Tabela 4). A escassez de estudos que combinam diferentes tipos de variáveis, genéticas, bióticas e ambientais, evidencia a necessidade de abordagens multivariadas e integrativas, além de validação de campo para garantir a confiabilidade dos modelos gerados.

Tabela 4 - Matriz de lacunas de pesquisa em modelagem de nicho ecológico para espécies de áreas úmidas neotropicais.

Tema/Abordagem	Variáveis Climáticas	Variáveis Hidrológicas	Dados Genéticos	Fatores Bióticos	Validação em Campo
Plantas de áreas úmidas	12	7	2	3	4
Peixes e organismos aquáticos	8	6	1	2	2
Mamíferos e aves	6	2	1	2	1
Modelos geneticamente informados	1	GAP	3	1	GAP
Modelos com sensoriamento remoto	3	4	GAP	1	1

Fonte: As autoras, 2025.

DISCUSSÃO

Apesar dos avanços metodológicos, os modelos ainda enfrentam limitações importantes: viés amostral, ausência de dados bióticos e dificuldade de modelar espécies raras ou com poucos registros. A baixa transferibilidade para cenários futuros ou regiões distintas também compromete a aplicação dos modelos em contextos de conservação (Chevalier *et al.*, 2024; Mendes *et al.*, 2020; Warren & Seifert, 2011; Diniz-Filho *et al.*, 2019; Anderson, 2017).

A inclusão de dados de sensoriamento remoto, atributos funcionais e informações genéticas tem se mostrado uma estratégia eficaz para aumentar a robustez dos modelos (Leitão & Santos, 2019; Regos *et al.*, 2022; Ikeda *et al.*, 2017; Bothwell *et al.*, 2020). Os chamados modelos geneticamente informados (gENMs), aliados a dados de alta resolução espacial e temporal, permitem capturar com maior precisão a heterogeneidade ambiental e as adaptações locais (Ikeda *et al.*, 2017; Bothwell *et al.*, 2020; Regos *et al.*, 2022; Kissel *et al.*, 2020).

Modelos de nicho ecológico têm sido fundamentais para identificar áreas prioritárias para conservação, prever impactos das mudanças climáticas e orientar esforços de restauração ecológica em áreas úmidas neotropicais (Gómez *et al.*, 2020; Manrique-Ascencio *et al.*, 2024; Chavy *et al.*, 2019; Adhikari *et al.*, 2019). No entanto, a eficácia dessas aplicações depende da qualidade dos dados e da validação empírica das previsões (Contreras-Díaz *et al.*, 2022).

Em resumo, a literatura é consistente ao apontar que os ENMs são ferramentas promissoras para espécies de áreas úmidas, mas sua aplicabilidade plena depende de avanços como a integração de variáveis hidrológicas de alta resolução; a inclusão de dados genéticos e ecológicos; estratégias específicas para espécies com baixa amostragem; validação empírica contínua em campo. Esses elementos devem ser priorizados em pesquisas futuras para aumentar a precisão, utilidade e transferibilidade dos modelos em contextos ecológicos sensíveis como os Neotrópicos.

Além disso, o fortalecimento das aplicações práticas dos ENMs no planejamento territorial e em políticas públicas ambientais é essencial para alinhar a produção científica com metas de conservação e sustentabilidade. A capacidade de prever áreas prioritárias para proteção ou uso racional reforça o papel estratégico da modelagem na gestão adaptativa de áreas úmidas.

CONCLUSÃO

A modelagem de nicho ecológico em áreas úmidas nos Neotrópicos evolui com o uso de dados ambientais mais complexos e estratégias inovadoras para superar a escassez de registros. Esses avanços aumentam a aplicabilidade dos modelos para conservação e gestão de ecossistemas úmidos. Ao integrar informações ecológicas com variáveis espaciais, genéticas e funcionais, os ENMs se consolidam como instrumentos essenciais para a gestão ambiental sustentável, especialmente em ecossistemas vulneráveis como as áreas úmidas tropicais. No entanto, ainda são necessários esforços para aprimorar variáveis locais e fortalecer a integração entre conhecimento científico e planejamento territorial em regiões vulneráveis.

REFERÊNCIAS

- ADHIKARI, D. *et al.* Ecological niche modeling as a cumulative environmental impact assessment tool for biodiversity assessment and conservation planning: A case study of critically endangered plant *Lagerstroemia minuticarpa* in the Indian Eastern Himalaya. *Journal of Environmental Management*, v. 243, p. 299-307, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.036>.
- ANDERSON, R. When and how should biotic interactions be considered in models of species niches and distributions? *Journal of Biogeography*, v. 44, p. 8-17, 2017. <https://doi.org/10.1111/jbi.12825>.
- BOTHWELL, H. *et al.* Genetic data improves niche model discrimination and alters the direction and magnitude of climate change forecasts. *Ecological Applications*, e02254, 2020. <https://doi.org/10.1002/eap.2254>.
- CAVALCANTE, T. *et al.* Niche overlap between two sympatric frugivorous Neotropical primates: improving ecological niche models using closely-related taxa. *Biodiversity and Conservation*, v. 29, p. 2749-2763, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-01997-5>.
- CHAVY, A. *et al.* Ecological niche modelling for predicting the risk of cutaneous leishmaniasis in the Neotropical moist forest biome. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, v. 13, e0007629, 2019. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0007629>.
- CHEVALIER, M.; BROENNIMANN, O.; GUIBAN, A. Climate change may reveal currently unavailable parts of species' ecological niches. *Nature Ecology & Evolution*, v. 8, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41559-024-02426-4>.
- CONTRERAS-DÍAZ, R. *et al.* On the relationship between environmental suitability and habitat use for three neotropical mammals. *Journal of Mammalogy*, v. 103, p. 425-439, 2022. <https://doi.org/10.1093/jmammal/gyab152>.

DINIZ-FILHO, J. A. F. *et al.* A macroecological approach to evolutionary rescue and adaptation to climate change. *Ecography*, v. 42, p. 1–15, 2019. <https://doi.org/10.1111/ecog.04264>.

DRAKE, J.; RANDIN, C.; GUISAN, A. *Modelling ecological niches with support vector machines*. *Journal of Applied Ecology*, v. 43, p. 424–432, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01141.x>.

ELITH, J.; LEATHWICK, J. R. *Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time*. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 40, p. 677–697, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>.

GALANTE, P. *et al.* *The challenge of modeling niches and distributions for data-poor species*. *Ecography*, v. 41, p. 726–736, 2018.

GÓMEZ, J. *et al.* *Climatic affinities of Neotropical species of Capparaceae: an approach from ecological niche modelling and numerical ecology*. *Botanical Journal of the Linnean Society*, v. 193, p. 263–275, 2020. <https://doi.org/10.1093/botlinnean/boz092>.

GUISAN, A.; THUILLER, W.; ZIMMERMANN, N. E. *Habitat suitability and distribution models: with applications in R*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

IKEDA, D. H. *et al.* *Genetically informed ecological niche models improve climate change predictions*. *Global Change Biology*, v. 23, p. 1641–1653, 2017. <https://doi.org/10.1111/gcb.13470>.

JUNK, W. J. *et al.* *A classification of major naturally-occurring Amazonian lowland wetlands*. *Wetlands*, v. 31, p. 623–640, 2011. <https://doi.org/10.1007/s13157-011-0190-7>.

KIRAN, S.; PRAJAPATI, P.; MOHANTA, A. *A systematic appraisal of ecological niche modelling in the context of phytodiversity conservation*. *Environment, Development and Sustainability*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04994-8>.

KISSEL, A. M. *et al.* *Expanding wetland hydroperiod data via satellite imagery for ecological applications*. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 18, p. 432–438, 2020. <https://doi.org/10.1002/fee.2233>.

LEITÃO, P. J.; SANTOS, M. J. *Improving models of species ecological niches: a remote sensing overview*. *Frontiers in Ecology and Evolution*, v. 7, 2019. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00009>.

LUIZE, B. *et al.* *Tree species occurring in Amazonian wetland forests consistently show broader range sizes*. *Ecology and Evolution*, v. 14, 2024.

MANRIQUE-ASCENCIO, A. *et al.* *Climate-driven shifts in the diversity of plants in the Neotropical seasonally dry forest: Evaluating the effectiveness of protected areas*. *Global Change Biology*, v. 30, 2024. <https://doi.org/10.1111/gcb.17282>.

MENDES, P. *et al.* *Dealing with overprediction in species distribution models: How adding distance constraints can improve model accuracy*. *Ecological Modelling*, v. 431, 109180, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2020.109180>.

MOOR, H. *et al.* *Towards a trait-based ecology of wetland vegetation*. *Journal of Ecology*, v. 105, p. 1623–1635, 2017. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12734>.

REGOS, A. *et al.* *Mainstreaming remotely sensed ecosystem functioning in ecological niche models*. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, v. 8, p. 241–253, 2022. <https://doi.org/10.1002/rse2.255>.

STEPHAN, J.; KORBAN, M. *Ecological niche modelling using MaxEnt for riparian species in a Mediterranean context*. *Ecological Indicators*, v. 157, 113167, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113167>.

SUMBH, O. *et al.* *Developing and validating species distribution models for wetland plants across Europe*. *Ecology and Evolution*, v. 15, 2025. <https://doi.org/10.1002/ece3.71157>.

THUILLER, W. *Ecological niche modelling*. *Current Biology*, v. 34, p. R225–R229, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2024.02.018>.

VALENCIA-RODRÍGUEZ, D. *et al.* *Ecological niche modeling as an effective tool to predict the distribution of freshwater organisms: The case of the Sabaleta *Brycon henni**. *PLoS ONE*, v. 16, e0247876, 2021. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247876>.

VELAZCO, S. J. E. *et al.* *Using worldwide edaphic data to model plant species niches: An assessment at a continental extent*. *PLoS ONE*, v. 12, e0186025, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0186025>.

WARREN, D. L.; SEIFERT, S. N. *Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria*. *Ecological Applications*, v. 21, n. 2, p. 335–342, 2011. <https://doi.org/10.1890/10-1171.1>.

ZHONG, Y. *et al.* *The application of species distribution modeling in wetland restoration: A case study in the Songnen Plain, Northeast China*. *Ecological Indicators*, v. 121, 107137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107137>.

DIREITO À CIDADE, EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA E OS ODS: UMA ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA

Yeda Ruiz Maria

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Maíra Rodrigues Uliana

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

Lucas Prado Osco

Universidade do Oeste Paulista (UNOESTE)

RESUMO

Objetivo: Este estudo tem como objetivo realizar uma análise crítica da literatura para compreender de que forma a extensão universitária pode promover o direito à cidade e contribuir para o cumprimento das metas da Agenda 2030, com ênfase no ODS 11. **Métodos:** A pesquisa foi conduzida com base no protocolo PRISMA, envolvendo buscas em bases acadêmicas internacionais e repositórios institucionais, com foco em publicações a partir de 2014, ano de publicação do Marco da Extensão no Brasil. **Resultados:** Os achados revelam que a extensão universitária, compreendida como prática social e política, favorece a participação cidadã, a inclusão social e a construção de cidades mais democráticas e sustentáveis. As interseções entre extensão, ODS e direito à cidade são analisadas em diferentes dimensões — espacial, cultural, política e ambiental — evidenciando o papel da universidade como agente ativo na transformação do espaço urbano. **Conclusão:** Conclui-se que, quando orientada pelos princípios do direito à cidade e articulada às metas dos ODS, a extensão universitária se configura como um instrumento estratégico para a promoção de um desenvolvimento urbano sustentável, justo e inclusivo.

Palavras-chave: Extensão universitária; direito à cidade; ODS 11; sustentabilidade urbana; inclusão social.

INTRODUÇÃO

A intensificação do processo de urbanização nas últimas décadas tem gerado transformações profundas nas dinâmicas territoriais, resultando em desigualdades socioespaciais, degradação ambiental e exclusão de amplas parcelas da população do acesso pleno à cidade. Esses processos impõem novos desafios ao planejamento urbano e à gestão pública, demandando ações integradas que articulem direitos sociais, sustentabilidade e justiça territorial.

O conceito de “direito à cidade”, formulado por Henri Lefebvre (1968) em sua obra seminal “O Direito à Cidade”, propõe a reconceituação do urbano como espaço de uso coletivo, inclusão e participação. Ele transcende a noção de mera ocupação física do espaço urbano, configurando-se como o direito à participação ativa e consciente nos processos de planejamento, produção e transformação desse espaço, assegurando que os cidadãos tenham o poder de moldar a cidade de acordo com suas necessidades, desejos e projetos coletivos. Essa perspectiva desafia as concepções dominantes que reduzem a cidade a um mero local de acumulação de capital, resgatando sua dimensão de espaço de vida, encontro e realização humana (Lefebvre, 1991). Autores contemporâneos, como David Harvey (2008, 2012) e Saskia Sassen (2014), aprofundam e complexificam a análise das dimensões políticas do Direito à Cidade, conectando-o com as transformações do capitalismo global e as novas formas de exclusão, segregação e violência no espaço urbano.

Paralelamente, a extensão universitária desponta como uma prática pedagógica e social capaz de fomentar a articulação entre saberes acadêmicos e experiências comunitárias, contribuindo para o enfrentamento das desigualdades e para a promoção da cidadania. A Resolução CNE/CES nº 7/2018 (Brasil, 2018), ao tornar obrigatória a inserção da extensão nos currículos dos cursos de graduação, consolidou seu papel como componente essencial da formação universitária, indo além da tradicional disseminação de conhecimento e buscando uma interação transformadora.

Com a adoção da Agenda 2030 pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2015), a extensão universitária ganhou nova centralidade ao alinhar-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em especial ao ODS 11, que visa tornar as cidades e comunidades inclusivas, seguras, resilientes e

sustentáveis. A intersecção entre extensão, ODS e direito à cidade abre caminhos para repensar o papel da universidade como agente ativo na construção de uma sociedade mais justa.

Apesar dos avanços conceituais e institucionais, ainda são escassos os estudos que sistematizam como a extensão universitária tem contribuído, na prática, para a efetivação do direito à cidade e para a implementação dos ODS no território. Identificar essas interfaces é fundamental para qualificar as ações extensionistas e ampliar sua incidência na agenda urbana contemporânea. Diante disso, este artigo tem por objetivo analisar, a partir de uma revisão sistemática da literatura, a maneira ao qual a extensão universitária tem se articulado com o direito à cidade e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11, enquanto instrumento de promoção da sustentabilidade urbana e da inclusão social. Como contribuição, a revisão realizada buscou contribuir para o avanço teórico e prático sobre o tema, ao mapear como a extensão universitária tem dialogado com o direito à cidade e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, em especial o ODS 11. Ao sistematizar experiências, identificar lacunas e destacar boas práticas, o estudo pretende oferecer subsídios para qualificar as ações extensionistas e reforçar o papel da universidade como agente ativo na promoção de cidades mais inclusivas, justas e sustentáveis.

MÉTODO

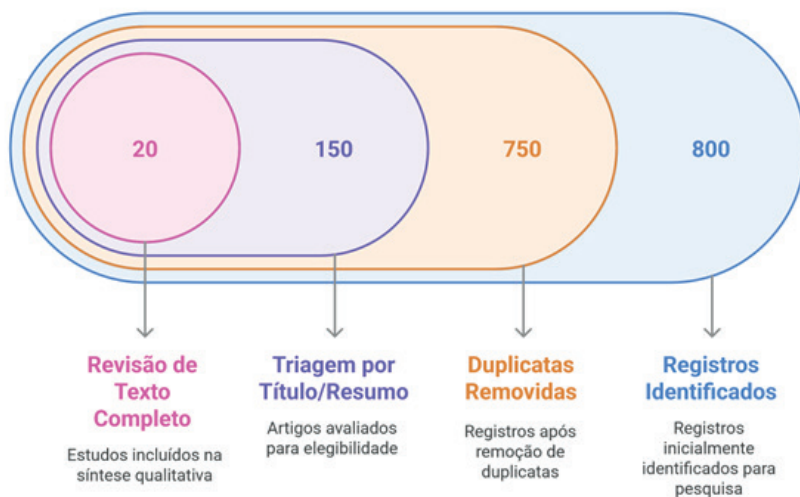
Este estudo baseia-se em uma análise da literatura, conduzida conforme o protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), reconhecido por sua robustez metodológica e transparência nos processos de seleção e análise de fontes (Page *et al*, 2021). As buscas foram realizadas em três bases de dados acadêmicas internacionais — Scopus, Web of Science e ScienceDirect — além de repositórios institucionais e literatura cinzenta. A seleção concentrou-se em publicações entre 2014 e 2024, considerando o marco da promulgação da Política Nacional de Extensão e a adoção da Agenda 2030 pela ONU.

Foram utilizados os seguintes descritores e combinações de palavras-chave: “extensão universitária” AND “direito à cidade”; “university extension”

AND “sustainable development goals”; “direito à cidade” AND “ODS 11”; “higher education” AND “urban inclusion”. Os critérios de inclusão abrangeram estudos empíricos e teóricos em português; inglês e espanhol; que abordassem explicitamente as interfaces entre extensão universitária; direito à cidade e ODS.

A análise seguiu quatro etapas: (1) identificação de estudos por meio das palavras-chave; (2) triagem dos títulos e resumos; (3) leitura integral para verificar a elegibilidade; e (4) análise qualitativa do conteúdo das obras selecionadas. Os dados foram organizados por categorias temáticas emergentes e apresentados conforme os eixos de análise identificados na literatura. Conforme o fluxograma de seleção dos estudos (Figura 1), observa-se que, após a remoção de duplicatas e a triagem por critérios de elegibilidade, 20 artigos foram incluídos na síntese qualitativa.

Figura 1 - Fluxograma do processo de seleção dos estudos conforme o protocolo PRISMA.



Fonte: Elaborado pelo autor, com base em Page et al. (2021).

ANÁLISE CRÍTICA DA LITERATURA

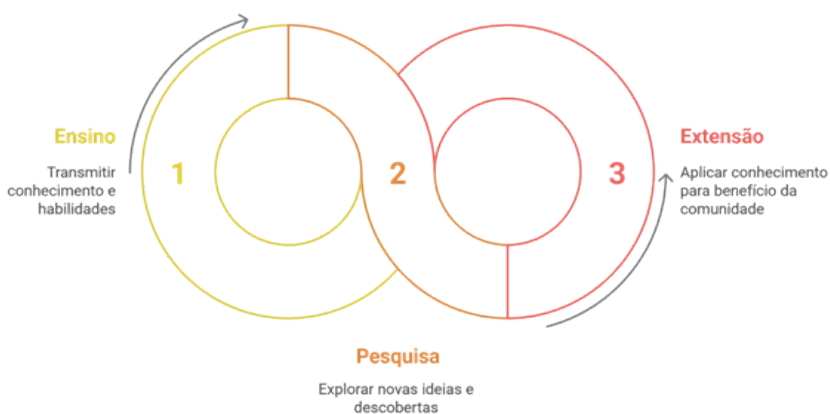
A análise qualitativa da literatura resultou na sistematização de quatro categorias centrais com os principais achados relacionados às interfaces entre extensão universitária, direito à cidade e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

A Extensão Como Prática Social e Política

A extensão universitária é compreendida como uma prática social e política, marcada pela bidirecionalidade do conhecimento e pela transformação dos territórios em que atua. Estudos como os de Gohn (2010, 2004) e Freire (1987) enfatizam o papel da escuta ativa e da coautoria entre universidade e sociedade civil. A extensão é, assim, um campo de experiências emancipatórias que amplia a presença universitária em territórios populares, funcionando como mediação entre diferentes racionalidades: a acadêmica e a popular.

A Resolução nº 7/2018 do Conselho Nacional de Educação (CNE) define a extensão universitária como a atividade que se integra à matriz curricular e à organização da pesquisa, constituindo-se em processo interdisciplinar, político educacional, cultural, científico, tecnológico, que promove a interação transformadora entre as instituições de ensino superior e os outros setores da sociedade, por meio da produção e da aplicação do conhecimento, em articulação permanente com o ensino e a pesquisa (Brasil, 2018). Essa definição explícita, na figura 2, alguns pontos-chave, como a integração da extensão com o ensino e a pesquisa, a interdisciplinaridade, a interação transformadora e a diversidade de dimensões (educação, cultura, ciência e tecnologia, política e economia).

Figura 2 - Ciclo de interação entre Ensino, Pesquisa e Extensão.



Fonte: Autores, 2025.

Compreender a extensão universitária como prática social e política implica reconhecer que a universidade é parte da sociedade, não sendo uma entidade neutra ou apartada, mas inserida em um contexto social, econômico e político específico; que o conhecimento produzido e socializado na universidade não é isento de valores, interesses e relações de poder; e que a extensão, ao intervir na realidade social, tem um papel político, seja no sentido de reproduzir as estruturas existentes, seja no sentido de transformá-las. A indissociabilidade entre ensino, pesquisa e extensão, prevista na Constituição Federal de 1988, é um princípio fundamental para a universidade brasileira, manifestando-se no enriquecimento do ensino com temas da realidade social, na geração de demandas de pesquisa e na retroalimentação do ensino e da pesquisa com os saberes da sociedade (Santos, 2006).

Autores como Oliveira (2015) e Bonduki (2018) destacam que a extensão, ao promover a aproximação com comunidades em situação de vulnerabilidade, contribui diretamente para a construção do direito à cidade, sobretudo ao articular práticas educativas com demandas por infraestrutura, moradia, transporte, lazer e saúde urbana. A extensão universitária, aplicada de diversas formas – incluindo projetos sociais, ações culturais, desenvolvimento tecnológico, formação continuada e participação em políticas públicas – fortalece o vínculo entre a universidade e a sociedade, promovendo a transformação social e a construção de cidadania, fundamental para a construção de cidades mais justas, inclusivas e sustentáveis.

ODS e Direito à Cidade: Contribuições Conceituais

As intrincadas relações e pontos de convergência entre a extensão universitária, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o direito à cidade, é análise crucial para compreender como a extensão universitária pode ser utilizada como uma ferramenta estratégica para promover o desenvolvimento urbano sustentável e garantir o direito à cidade para todos (Lefebvre, 1991).

A Agenda 2030 da ONU e os ODS são frequentemente associados na literatura à busca por cidades sustentáveis e inclusivas. O ODS 11 é identificado como diretamente relacionado ao direito à cidade, por contemplar metas como acesso universal à moradia segura, transporte público acessível, planejamento

participativo e redução de impactos ambientais (ONU-Habitat, 2020). Rolnik (2015) e Maricato (2011) apontam que os ODS representam uma linguagem comum entre os diversos atores sociais, funcionando como mecanismo de pressão para políticas públicas mais integradoras.

A Figura 3 apresenta as interconexões entre a extensão universitária, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e o direito à cidade, destacando a importância da educação superior na promoção de práticas sociais que visem a justiça social e a sustentabilidade urbana.

Figura 3 - Interconexões entre Extensão Universitária, ODS e Direito à Cidade.



Fonte: Autores, 2025.

As interfaces entre extensão universitária e direito à cidade são múltiplas e podem ser exploradas em diferentes dimensões. A extensão universitária pode desenvolver projetos e ações que visam garantir o acesso equitativo a serviços e recursos essenciais, como habitação (Rolnik, 2015), saneamento, transporte, saúde, educação, cultura e lazer, contribuindo para reduzir as desigualdades sociais e promover a inclusão urbana (UN-Habitat, 2016). Ela também pode fortalecer a participação da sociedade nos processos de planejamento e gestão urbana (Fung, 2015), criando espaços de diálogo e colaboração entre a universidade, o poder público e a comunidade, contribuindo para a construção

de cidades mais democráticas e para a garantia do direito à cidade como um direito coletivo (Purcell, 2002). Adicionalmente, a extensão universitária pode influenciar a produção do espaço urbano, desenvolvendo projetos e pesquisas que buscam soluções inovadoras e sustentáveis para os desafios urbanos (Girardet, 2015; Beatley, 2016), contribuindo para a construção de cidades mais justas, inclusivas e ambientalmente equilibradas (Newman & Jennings, 2008).

Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), estabelecidos pela ONU em 2015 (ONU, 2015), representam uma agenda global para o desenvolvimento sustentável. A extensão universitária pode desempenhar um papel fundamental na implementação dos ODS no contexto urbano, contribuindo para o alcance de diversas metas e objetivos., conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Contribuições Urbanas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

ODS	Descrição / Impacto	Referência
ODS 1 – Erradicação da Pobreza	Garante acesso a serviços básicos, oportunidades de emprego e renda à população urbana em situação de pobreza.	Satterthwaite (2016)
ODS 3 – Saúde e Bem-Estar	Promove ações de saúde preventiva, bem-estar e assistência, melhorando a qualidade de vida urbana.	Girardet (2015)
ODS 4 – Educação de Qualidade	Amplia o acesso à educação por meio de cursos, oficinas e projetos formativos ao longo da vida.	-
ODS 5 – Igualdade de Gênero	Incentiva a participação das mulheres nas decisões urbanas e no planejamento de espaços seguros.	UN-Habitat (2020)
ODS 8 – Trabalho Decente e Crescimento Econômico	Estimula crescimento econômico inclusivo e sustentável, com trabalho decente e formalização.	Harvey (2012)
ODS 10 – Redução das Desigualdades	Reduz desigualdades urbanas por meio da inclusão social, justiça espacial e redistribuição de renda.	Soja (2000)
ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis	Torna as cidades mais inclusivas, resilientes e sustentáveis, com foco em habitação, mobilidade e patrimônio.	Rolnik (2015); UN-Habitat (2016)
ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis	Promove consumo sustentável, energias limpas e gestão eficiente de resíduos urbanos.	Newman & Jennings (2008)
ODS 13 – Ação Climática	Contribui para mitigar emissões e adaptar a infraestrutura urbana às mudanças climáticas.	IPCC (2022)
ODS 16 – Paz, Justiça e Instituições Eficazes	Fortalece a governança, a cidadania e o combate à violência e corrupção nos territórios urbanos.	Fung (2015)
ODS 17 – Parcerias para os Objetivos	Estimula a cooperação entre setores público, privado, sociedade civil e academia para os ODS.	UN-Habitat (2020)

Fonte: Autores, 2025.

A análise integrada das interfaces entre extensão universitária (Gohn, 2004; Santos, 2006), ODS (ONU, 2015) e direito à cidade (Lefebvre, 1991; Harvey, 2008) revela o potencial transformador da extensão universitária no contexto urbano. Ao alinhar suas ações com os ODS e com os princípios do direito à cidade, a extensão universitária pode contribuir para a construção de cidades mais justas, inclusivas, sustentáveis e democráticas. Essa abordagem integrada requer planejamento estratégico, participação e colaboração, interdisciplinaridade e transversalidade, e avaliação e monitoramento sistemáticos.

Extensão Universitária Como Ferramenta de Sustentabilidade Urbana

A sustentabilidade urbana, entendida como prática multidimensional, está presente em diversos projetos extensionistas analisados. Iniciativas de mapeamento socioambiental participativo, hortas urbanas, gestão de resíduos, saneamento ecológico e ações de educação ambiental destacam-se na literatura. Esses projetos não apenas abordam questões ambientais diretas, mas também promovem a conscientização, a participação comunitária e a autonomia das populações urbanas.

Autoras como Gohn (2014) e Ferrara (2008) reforçam que a sustentabilidade urbana não se limita à dimensão ambiental, mas abrange aspectos culturais, econômicos e sociais da vida urbana. Nesse sentido, a extensão contribui ao favorecer processos educativos voltados à transformação coletiva dos espaços urbanos, ao engajar moradores em práticas de autogestão e ao criar alternativas inclusivas de apropriação do território. A universidade, por meio da extensão, age como um catalisador, conectando o conhecimento técnico e científico com as necessidades e saberes locais, gerando soluções adaptadas e sustentáveis que promovem a resiliência urbana e a qualidade de vida.

Universidade e Justiça Territorial

A noção de justiça territorial emerge como eixo transversal nos estudos analisados. O conceito, conforme formulado por Santos (2020) e ampliado por Ferreira (2007), implica o reconhecimento das desigualdades no acesso ao território e a necessidade de políticas compensatórias. A extensão universitária

é vista como vetor de reconhecimento e redistribuição, ao viabilizar o acesso ao conhecimento, ao fortalecimento de identidades locais e à visibilidade de grupos historicamente marginalizados ou excluídos do processo de produção e apropriação do espaço urbano.

Projetos como oficinas comunitárias, formação de lideranças locais, mutirões de melhorias urbanas e ações de incidência política territorial são apresentados como exemplos concretos de práticas extensionistas que fortalecem a cidadania e o enraizamento comunitário. Essas ações, ao empoderar as comunidades e promover sua capacidade de reivindicação e transformação, contribuem diretamente para a construção de territórios mais justos e equitativos, onde o direito à cidade é efetivado em suas múltiplas dimensões. (Figura 3).

Figura 3 - Mapa conceitual com os eixos temáticos e suas inter-relações.



Fonte: Autores, 2025.

DISCUSSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A extensão universitária, quando orientada por princípios participativos e territorializados, constitui uma importante ferramenta de efetivação do direito à cidade. Ao mediar relações entre universidade e sociedade, ela permite o compartilhamento de saberes, o reconhecimento de identidades locais e a construção de soluções urbanas ancoradas nas realidades concretas. A integração com os conceitos de Direito à Cidade, com suas dimensões participativa, redistributiva, cultural e ambiental, e a sua interconexão com os diversos ODS, demonstra como a extensão vai além da simples transferência de conhecimento, tornando-se um processo de cocriação e transformação mútua.

A articulação entre extensão e ODS, especialmente o ODS 11, aponta para o potencial de institucionalização de práticas extensionistas como políticas de desenvolvimento urbano sustentável. Contudo, os dados também sugerem que tal articulação ainda se apresenta de forma incipiente, sendo muitas vezes fragmentada, descontinuada e dependente da iniciativa de grupos isolados dentro das universidades. Isso evidencia a necessidade de maior investimento institucional e reconhecimento da extensão como uma função indissociável das demais missões universitárias, com apoio estrutural e financeiro contínuo para garantir sua sustentabilidade e impacto em longo prazo.

Essa constatação reforça a crítica de autores como Rolnik (2015) e Maricato (2011), que denunciam a persistência de modelos urbanos excludentes e a ausência de uma política estrutural de inclusão urbana. Nesse sentido, a extensão precisa ser compreendida como uma via de superação das lógicas segregadoras que marcam as cidades brasileiras, promovendo estratégias integradas de justiça territorial e a construção de cidades mais equitativas.

Além disso, ao adotar práticas como oficinas comunitárias, intervenções urbanas colaborativas, mapeamentos afetivos e projetos pedagógicos em parceria com movimentos sociais, a universidade afirma seu compromisso ético e político com a construção de cidades mais justas, plurais e democráticas. Essas ações reforçam a potência transformadora da extensão, na medida em que contribuem para ressignificar o espaço urbano como território de direitos e para fortalecer a participação cidadã na construção de políticas públicas que atendam às necessidades das populações mais vulneráveis.

Por fim, a análise revela a necessidade de fortalecer institucionalmente a extensão, com maior reconhecimento nos planos de desenvolvimento institucional, financiamento contínuo, avaliação por impacto social e formação docente sensível às realidades territoriais. Apenas com tais medidas será possível consolidar sua função como eixo estruturante da função social da universidade, garantindo que o conhecimento produzido e as práticas desenvolvidas na academia sejam efetivamente direcionados para a transformação social e para o alcance dos objetivos de desenvolvimento sustentável em nossos centros urbanos.

No entanto, a análise da literatura também evidencia importantes lacunas que demandam maior aprofundamento teórico e empírico. Observa-se a necessidade de desenvolvimento de metodologias mais robustas para avaliação do impacto das práticas extensionistas na efetivação do direito à cidade, incluindo indicadores qualitativos e quantitativos que permitam mensurar transformações territoriais de médio e longo prazo. Além disso, identificou-se uma carência de estudos comparativos entre diferentes contextos urbanos e regionais, bem como de pesquisas que analisem criticamente os limites e contradições inerentes às práticas extensionistas quando inseridas em contextos de austeridade fiscal e políticas urbanas neoliberais. Essa agenda de pesquisa futura é fundamental para qualificar o debate e orientar políticas públicas mais efetivas.

Uma perspectiva promissora para o fortalecimento da extensão universitária reside na incorporação de tecnologias digitais e metodologias inovadoras que possam amplificar seu alcance e impacto territorial. O uso de plataformas colaborativas, mapeamentos participativos digitais, aplicativos móveis para monitoramento de indicadores urbanos e redes sociais para mobilização comunitária representa um campo emergente de experimentação que pode potencializar a articulação entre universidade e sociedade. Contudo, é fundamental que tais inovações não reproduzam exclusões digitais ou substituam a dimensão presencial e relacional que caracteriza a extensão como prática social transformadora. O desafio consiste em desenvolver modelos híbridos que combinem presencialidade e virtualidade, ampliando o acesso sem perder a qualidade do vínculo territorial estabelecido entre universidade e comunidade.

CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática permitiu afirmar que a extensão universitária constitui um vetor estratégico para a efetivação do direito à cidade e para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, especialmente o ODS 11. Os estudos analisados evidenciam que a extensão, ao promover a escuta ativa, a coautoria de projetos com a comunidade e a valorização de saberes plurais, contribui de forma concreta para o enfrentamento das desigualdades urbanas e territoriais. Aprofundamos como essa atuação se alinha com as dimensões do Direito à Cidade e com os diversos ODS, mostrando a complexidade e a riqueza dessa intersecção.

Contudo, a potencialidade transformadora da extensão ainda encontra limitações estruturais, institucionais e políticas. Muitas das práticas analisadas revelam fragilidade na continuidade, dependência de atores individuais e ausência de diretrizes institucionais consolidadas. A integração efetiva entre extensão, planejamento urbano e políticas públicas requer o fortalecimento da institucionalidade extensionista, com financiamento permanente, avaliação por impacto social e formação de docentes e discentes comprometidos com a transformação territorial.

Conclui-se que a universidade, ao assumir a extensão como dimensão indissociável de sua missão formativa e social, pode e deve atuar como agente catalisador de processos de urbanização mais justos, sustentáveis e democráticos. Nesse sentido, a consolidação de uma agenda extensionista orientada pelo direito à cidade e pelos ODS constitui não apenas uma oportunidade, mas uma responsabilidade histórica das instituições de ensino superior para a construção de um futuro urbano mais equitativo e resiliente.

REFERÊNCIAS

BEATLEY, T. (2016). Handbook of sustainable urban development: Planning, design, and policy. Routledge. Disponível em: <https://www.routledge.com/Handbook-of-Sustainable-Urban-Development-Planning-Design-and-Policy/Beatley/p/book/9781138927976>. Acesso em: 7 jun. 2025.

BONDUKI, N. Construir o direito à cidade: habitação e urbanismo em um mundo em transformação. Editora Paz e Terra. 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Educação. Resolução CNE/CES nº 7, de 18 de dezembro de 2018. Estabelece as Diretrizes para a Extensão na Educação Superior Brasileira e dispõe sobre o processo de curricularização da extensão. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 dez. 2018. Disponível em: <http://portal.mec.gov.br/docman/dezembro-2018-pdf/104111-resolucao-cne-ces-7-2018/file>. Acesso em: 7 jun. 2025.

CASTELLS, M. The rise of the network society. 2. ed. Malden, MA: Blackwell Publishing. 2010.

DAVIS, M. Planet of slums. London: Verso. 2006.

FERRARA, L. Viver a cidade: urbanismo e cotidianidade. São Paulo: Studio Nobel. 2008.

FERREIRA, J. S. O mito da cidade global. Rio de Janeiro: Editora da UFRJ. 2007.

FREIRE, P. Pedagogia do oprimido. 17. ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra. 1987.

FUNG, A. Putting the public back into governance: The challenge of citizen participation and inclusion. London: Verso Books. 2015.

GIRARDET, H. Creating regenerative cities. London: Routledge. 2015.

GOHN, M. G. O protagonismo da sociedade civil: Movimentos sociais, ONGs e redes solidárias. São Paulo: Cortez. 2004.

GOHN, M. G. Teorias dos movimentos sociais: Paradigmas clássicos e contemporâneos. São Paulo: Loyola. 2010.

GOHN, M. G. Educação não formal, movimentos sociais e o lugar do aprendizado. São Paulo: Cortez. 2014.

HARVEY, D. Justice, nature and the geography of difference. Malden, MA: Blackwell Publishing. 1996.

HARVEY, D. The right to the city. *New Left Review*, n. 53, p. 23-40, set./out. 2008.

HARVEY, D. Rebel cities: From the right to the city to the urban revolution. London: Verso Books. 2012.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>. Acesso em: 7 jun. 2025.

LEFEBVRE, H. Le droit à la ville. Paris: Éditions Anthropos. 1968.

LEFEBVRE, H. The production of space. Translated by Donald Nicholson-Smith. Oxford: Blackwell Publishing. 1991.

MARICATO, E. O impasse da política urbana no Brasil. Petrópolis, RJ: Vozes. 2011.

MARCUSE, P.; CONNOLLY, J. (Eds.). Urban policy and the cyborg city: The soft city is back. London: Sage. 2006.

MAYER, M. (2009). The 'right to the city' in urban social movements. In: GHOSH, A.; RATH, A. (Eds.). Contradictions of the creative city. London: Routledge, p. 63-84.

- NEWMAN, P.; JENNINGS, G. Cities as sustainable ecosystems: Principles and practices. Washington, DC: Island Press. 2008.
- OLIVEIRA, D. A. A dimensão social da extensão universitária e o direito à cidade. *Revista Brasileira de Extensão Universitária*, João Pessoa, v. 6, n. 1, p. 11-20, jan./jun. 2015.
- ONU (Organização das Nações Unidas). (2015). Transformar nosso mundo: uma agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. New York: United Nations. Disponível em: <https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, v. 372, n. 71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.
- PURCELL, M. (2002). Excavating Lefebvre: The right to the city and its urban politics. *GeoJournal*, Dordrecht, v. 58, n. 2-3, p. 99-108, nov. 2002. DOI: 10.1023/B:GEJO.0000010072.78453.f8.
- ROLNIK, R. Urban warfare: Housing under the empire of finance. London: Verso Books. 2015.
- SANDERCOCK, L. *Cosmopolis II: Mongrel cities of the 21st century*. New York: Continuum. 2003.
- SANTOS, B. de S. A Universidade no século XXI: Para uma reforma democrática e emancipatória da Universidade. São Paulo: Cortez. 2006.
- SANTOS, M. A natureza do espaço: Técnica e tempo, razão e emoção. 5. ed. São Paulo: Edusp. 2020.
- SASSEN, S. *Expulsions: Brutality and complexity in the global economy*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 2014.
- SATTERTHWAITE, D. *Pursuing sustainable development: Achievements and lessons from development studies*. London: Routledge. 2016.
- SMITH, N. *The new urban frontier: Gentrification and the revanchist city*. London: Routledge. 1996.
- SOJA, E. W. *Postmetropolis: Critical studies of cities and regions*. Malden, MA: Blackwell. 2000.
- UN-HABITAT. (2016). *Urbanization and development: Emerging futures*. World Cities Report. Nairobi: UN-Habitat. Disponível em: <https://unhabitat.org/urbanization-and-development-emerging-futures>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- UN-HABITAT. (2020). *World cities report 2020: The value of sustainable urbanization*. Nairobi: United Nations Human Settlements Programme. Disponível em: <https://unhabitat.org/wcr/2020>. Acesso em: 7 jun. 2025.
- YOUNG, I. M. *Justice and the politics of difference*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1990.

ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL INTEGRADO ÀS FLORESTAS URBANAS: PROPOSIÇÕES BASEADAS NA NATUREZA RESPONSIVAS ÀS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Ciro Férrer Herbster Albuquerque
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Ana Luiza Bezerra Guerreiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Zilsa Maria Pinto Santiago
Universidade Federal do Ceará (UFC)

RESUMO

A queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a agricultura intensiva e a industrialização são causas centrais das mudanças climáticas, com impactos diretos na saúde planetária e no envelhecimento. Em áreas urbanas, marcadas por predominância de superfícies impermeáveis e baixa proporção de vegetação, as florestas urbanas destacam-se como soluções baseadas na natureza (SbN) para mitigar poluição atmosférica e ilhas de calor. Este estudo investigou o papel dessas florestas na mitigação climática, articulando benefícios à saúde da população idosa, à eficiência do desenho urbano e à preservação ambiental. Foi realizada revisão integrativa da literatura, abrangendo estudos urbanos, gerontológicos e de saúde ambiental, publicados em inglês entre 2020 e 2025. Dos 1.092 artigos inicialmente identificados, 14 atenderam aos critérios de inclusão. Seis fatores-chave emergiram: preservação da biodiversidade, melhoria da qualidade do ar, regulação térmica, promoção do bem-estar, fortalecimento da coesão social e estímulo ao engajamento comunitário. Aplicados ao caso do Parque Raquel de Queiroz, em Fortaleza (CE), evidenciaram benefícios diretos e indiretos à população idosa, especialmente no incentivo à mobilidade ativa, socialização e contato com a natureza. Conclui-se que as florestas urbanas são elementos estratégicos para cidades resilientes, capazes de enfrentar demandas climáticas e demográficas.

Palavras-chave: Envelhecimento; mudanças climáticas; soluções baseadas na natureza; sustentabilidade; planejamento urbano.

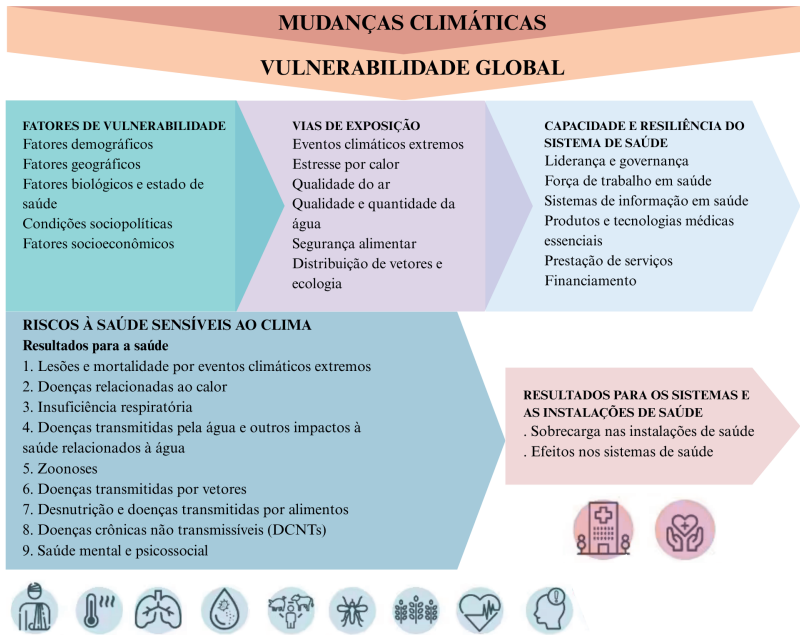
INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas constituem um fenômeno global decorrente do aumento das emissões de gases de efeito estufa, impulsionado principalmente por atividades humanas. Entre as causas mais relevantes estão a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento, a agricultura intensiva e a crescente industrialização. Esses processos intensificam desequilíbrios ambientais e estão diretamente associados à ocorrência de eventos climáticos extremos, como inundações, secas, furacões, tempestades costeiras e ondas de calor. Tais eventos podem afetar intensamente as comunidades, provocando impactos sociais, econômicos e espaciais, com consequências de longo prazo para a resiliência dos territórios (MACPHERSON *et al.*, 2016). As consequências das alterações ambientais ameaçam a biodiversidade, elevam o risco de mortalidade e aumentam a vulnerabilidade populacional a doenças respiratórias (IPCC, 2023).

Entre os efeitos na saúde, destacam-se o aumento de doenças infecciosas, lesões, enfermidades cardiorrespiratórias e neurológicas, transtornos mentais, complicações na gestação e no parto, desnutrição e insegurança alimentar (NEVILLE *et al.*, 2023; ROCQUE *et al.*, 2021). Embora as mudanças climáticas constituam uma ameaça global, suas consequências afetam de forma desproporcional populações vulneráveis, como pessoas em situação de pobreza, mulheres, crianças, pessoas idosas, pessoas negras, quilombolas, povos indígenas, ribeirinhos, imigrantes, pessoas com deficiência, população LGBT-QIAPN+ e outros grupos minoritários, especialmente aqueles situados no Sul Global (HAGEN *et al.*, 2022; VIANNA, 2022). Em razão da escassez de recursos, esses grupos enfrentam maiores dificuldades para se adaptar ou se recuperar de eventos climáticos extremos, conforme ilustrado na Figura 1 (IPCC, 2023).

De acordo com Prina *et al.* (2025), entre os segmentos populacionais mais suscetíveis aos eventos climáticos extremos, destacam-se as pessoas idosas. Devido a limitações fisiológicas, este grupo apresenta menor capacidade de enfrentamento diante de desastres relacionados às mudanças climáticas, frequentemente perdendo acesso a serviços e apoios essenciais após tais ocorrências. Pessoas idosas com comorbidades, como asma, diabetes ou hipertensão, e com limitações funcionais, apresentam menor probabilidade de sobreviver a eventos meteorológicos extremos (PRINA *et al.*, 2025).

Figura 1 - Diagrama de vulnerabilidades oriundas das mudanças climáticas.



Fonte: Elaborada pelos autores (2025), com base em Neville *et al.* (2023).

Durante o furacão Katrina, por exemplo, 71% das mortes registradas corresponderam a pessoas idosas, embora elas representassem apenas 15% da população local (KRIEBEL-GASPARRO, 2022). Um estudo envolvendo 761 comunidades em diferentes países identificou associações mais fortes entre inundações e risco de mortalidade em localidades com maior proporção de pessoas idosas, quando comparadas às que possuíam uma quantidade reduzida desse grupo etário (YANG *et al.*, 2023). Padrões semelhantes também se verificam em relação ao calor extremo. O estudo longitudinal de 45 anos na Escócia apontou que o grupo etário de 85 anos ou mais apresentou maior sensibilidade tanto ao frio extremo quanto ao calor excessivo, sobretudo no que se refere à mortalidade cardiovascular (WAN *et al.*, 2019).

Neste sentido, o aumento da expectativa de vida constitui um processo em expansão contínua, observável tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento, configurando uma transformação demográfica de alcance global. Tal fenômeno é caracterizado pelo crescimento da longevidade, resultante da redução das taxas de fecundidade e da elevação da expectativa de

vida. Em 2021, a Organização Mundial da Saúde (OMS) estimou que a população idosa mundial ultrapassa 1 bilhão de pessoas, correspondendo a aproximadamente 13,5% da população global. Projeções indicam que, até 2030, uma em cada seis pessoas terá 60 anos ou mais, e que, em 2050, esse grupo representará cerca de 22% da população mundial (OMS, 2022).

No Brasil, o processo de envelhecimento populacional tem acelerado de forma expressiva. Dados do último Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) revelaram um aumento de 56% no número de pessoas idosas em apenas 12 anos, entre 2010 e 2022 (IBGE, 2023). De fato, nas últimas cinco décadas, a população brasileira com 60 anos ou mais deixou de representar a menor parcela etária para, em 2023, superar a proporção de jovens e, nas próximas duas décadas, projetar-se como o maior segmento populacional. O contingente passou de 5,1% em 1970 para 15,8% em 2022, o que impõe a necessidade de reorientar políticas públicas, estratégias econômicas e iniciativas sociais, de modo a responder adequadamente a essa profunda transição demográfica (IBGE, 2023). Dessa forma, tanto o envelhecimento populacional quanto às mudanças climáticas configuram fenômenos de natureza global, cujos efeitos podem impactar diversas jurisdições, demandando respostas coordenadas e integradas.

Nos últimos 20 anos, observou-se um aumento de 54% na mortalidade relacionada à exposição ao calor entre pessoas com 65 anos ou mais. Entre julho de 2023 e junho de 2024, as temperaturas globais registraram um aumento de 1,64 °C em relação ao período pré-industrial, acompanhado por maior frequência e intensidade de ondas de calor em diversas regiões (IPCC, 2023).

Os efeitos adversos do calor extremo sobre a saúde física são amplamente reconhecidos. No entanto, pesquisas como a de Nori-Sarma *et al.* (2022) indicam que temperaturas elevadas também podem exercer impactos significativos sobre a saúde mental. O estudo baseado em registros médicos de 2,2 milhões de cidadãos nos Estados Unidos identificou aumento de 8% nas visitas de emergência relacionadas a questões de saúde mental quando as temperaturas se encontravam no percentil mais alto (5%) (NORI-SARMA *et al.*, 2022). De forma semelhante, outra investigação reportou crescimento de 9,7% nas ocorrências de atendimento ou internação por transtornos mentais durante ondas de calor na Austrália e no Vietnã, caracterizadas por temperaturas máximas diárias

iguais ou superiores a 35 °C por, no mínimo, três dias consecutivos (THOMPSON *et al.*, 2023). Tais evidências são corroboradas por revisões e meta-análises que associam temperaturas elevadas a maiores níveis de sofrimento psicológico, ansiedade, depressão e suicídio (HWONG *et al.*, 2022). Evidências emergentes sugerem que tais impactos podem ser letais, como demonstrado por uma meta-análise recente que apontou aumento de 2,2% na mortalidade relacionada à saúde mental para cada elevação de 1 °C na temperatura ambiente (BAECKER *et al.*, 2025).

Envelhecimento Sustentável e Saúde Planetária

O envelhecimento sustentável é um processo geográfico complexo, influenciado por instituições, políticas públicas e dinâmicas sociais. Está intrinsecamente relacionado à ideia de *aging in place*, ou seja, envelhecer no próprio ambiente familiar com dignidade, autonomia e vínculo comunitário (WU; KAUSHIK, 2015). Esse conceito dialoga com abordagens como envelhecimento saudável, ativo, bem-sucedido, produtivo e positivo, colocando em destaque a importância da manutenção da independência funcional, da inclusão social e do bem-estar geral ao longo do curso da vida (GRAZULEVICIUTE-VILENISKE *et al.*, 2020). O termo é frequentemente utilizado para descrever contextos em que o ambiente físico — aliado a um estilo de vida saudável e a estruturas institucionais de apoio — favorece a permanência da pessoa idosa em sua comunidade.

Pesquisas sobre envelhecimento sustentável têm se concentrado, sobretudo, na promoção da qualidade de vida, da integração social e na adaptação contínua dos espaços às necessidades do envelhecimento (YOON; HUBER; KIM, 2021). No entanto, na literatura científica ainda não há uma definição clara e consensual sobre o que caracteriza o envelhecimento sustentável. Essa lacuna dificulta o estabelecimento de objetivos concretos e a formulação de estratégias de intervenção, tanto em nível individual quanto coletivo.

Já o conceito de Saúde Planetária está associado com a condição de saúde da civilização humana e ao estado dos sistemas naturais dos quais ela depende (WHITMEE *et al.*, 2015). Esse campo de conhecimento parte do entendimento de que a saúde humana é indissociável da integridade ecológica, reconhecendo a interdependência entre processos ambientais, sociais, econômicos e culturais

que sustentam a vida (BROUSSELLE *et al.*, 2024). Fundamenta-se na premissa de que a degradação dos ecossistemas, como mudanças climáticas, perda de biodiversidade, poluição e esgotamento de recursos, compromete diretamente o bem-estar, a segurança alimentar, a qualidade da água, a estabilidade social e a equidade intergeracional.

No contexto do envelhecimento, a Saúde Planetária estabelece uma conexão estratégica ao demonstrar que a manutenção de ecossistemas equilibrados é crucial para a promoção de um envelhecimento saudável e digno. Populações idosas são particularmente vulneráveis a impactos ambientais, como ondas de calor, insegurança alimentar e degradação da qualidade do ar, que podem agravar condições crônicas, reduzir a mobilidade e aumentar a mortalidade. Ademais, ambientes urbanos planejados segundo princípios da Saúde Planetária, com infraestrutura verde, mobilidade ativa, acesso a alimentos frescos e preservação de recursos, favorecem a autonomia, a coesão social e a qualidade de vida na velhice (YOON; HUBER; KIM, 2021).

A articulação entre os conceitos de envelhecimento e sustentabilidade, especialmente quando interligados sob a perspectiva da saúde planetária, constitui um campo emergente de reflexão e ação. Ao se abordar o envelhecimento sustentável, é comum que o primeiro elemento evocado seja a própria noção de sustentabilidade — um termo amplamente difundido, não apenas em meios acadêmicos e instituições de pesquisa, mas também na esfera pública de maneira geral. Na contemporaneidade, a sustentabilidade é reconhecida como um paradigma central ao desenvolvimento das sociedades modernas. À priori, essa concepção é reduzida à preservação ambiental e, embora a associação com o meio ambiente não seja incorreta, ela é incompleta (YOON; HUBER; KIM, 2021). A sustentabilidade compreende também dimensões socioeconômicas e, recentemente, tem incorporado aspectos socioculturais e de bem-estar individual, centrados no indivíduo, como prioridades fundamentais de um desenvolvimento verdadeiramente sustentável (YOON; HUBER; KIM, 2021).

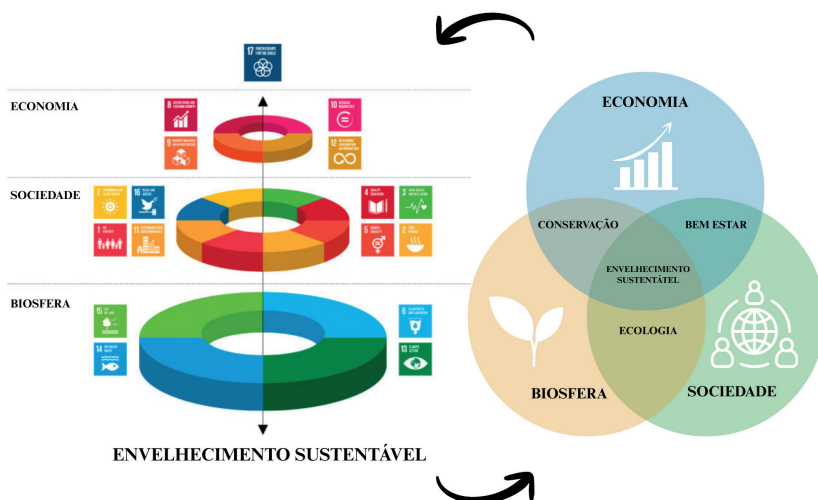
Assim, torna-se imprescindível considerar o envelhecimento populacional e os múltiplos desafios a ele associados. Esta é uma realidade de alcance global, que deve ser examinada sob a perspectiva da sustentabilidade social, econômica e ambiental — os três pilares interdependentes desse conceito. A intersecção

dessas dimensões proporciona um contexto oportuno para ação, prática, ensino e investigação (BROUSSELLE *et al.*, 2024).

Nas regiões de países de baixa e média renda, em especial, o Sul Global, as dificuldades para lidar com as implicações individuais e coletivas do envelhecimento são amplificadas por limitações estruturais em saúde pública, infraestrutura urbana e políticas sociais (BENTON *et al.*, 2025; KOMP-LEUKKUNEN; SARASMA, 2023). Refletir sobre tais desafios exige revisitar os próprios marcos conceituais que embasam os estudos sobre o envelhecimento. Não se trata apenas do envelhecimento biológico ou da sensibilidade individual ao tempo, mas da interação entre o indivíduo e seu contexto ambiental e social (KOMP-LEUKKUNEN; SARASMA, 2023).

A integração do envelhecimento aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no marco da Década do Envelhecimento Saudável (2021–2030), evidencia o potencial dessa articulação transversal, conforme a Figura 2 (OMS, 2020). Embora se reconheça, à primeira vista, a associação direta entre o envelhecimento e o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), uma análise aprofundada revela que o envelhecimento sustentável atravessa os 17 ODS.

Figura 2 - Diagrama de representação integrada dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: Adaptada pelos autores (2025), com base em Moallemi *et al.* (2019).

O ODS 1 (Erradicação da Pobreza) está intrinsecamente relacionado à capacidade de envelhecer com qualidade. Indivíduos que envelhecem com múltiplas comorbidades e sem apoio social adequado tendem a comprometer essa meta global. O mesmo se aplica ao ODS 2 (Fome Zero), ao ODS 4 (Educação de Qualidade) e ao ODS 5 (Igualdade de Gênero), entre outros. O ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) objetiva garantir o acesso de todos à moradia digna, adequada e a preço acessível; aos serviços básicos e urbanizar os assentamentos precários de acordo com as metas assumidas no Plano Nacional de Habitação, com especial atenção para grupos em situação de vulnerabilidade, o que vincula-se à promoção da saúde populacional e ambiental.

O ODS 13 (Ação Contra a Mudança Global do Clima) possui implicações diretas sobre a saúde das populações idosas, mais vulneráveis a eventos climáticos extremos. Já o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível) pode ser examinado a partir das demandas de idosos dependentes de tecnologias assistivas em domicílio, cujo uso intenso de energia levanta questões sobre sustentabilidade e justiça ambiental. Por fim, o ODS 16 (Paz, Justiça e Instituições Eficazes) suscita reflexões sobre o idadismo e os estereótipos de idade, que comprometem não apenas a dignidade das pessoas idosas, mas o próprio alcance de sociedades justas e inclusivas.

Portanto, pensar o envelhecimento sustentável requer uma abordagem integrada, que reconheça a interdependência entre os indivíduos e o ambiente social, político e ecológico em que vivem. Ao deslocar o foco de uma perspectiva puramente biomédica para uma visão sistêmica e relacional, é possível vislumbrar caminhos mais equitativos e resilientes para o futuro das sociedades longevas.

Gestão e Planejamento de Cidades Responsivas às Mudanças Climáticas Globais

Aliado ao aumento da expectativa de vida, projeta-se um crescimento mais acelerado da população urbana, conforme as perspectivas demográficas das Nações Unidas (ONU). Segundo o Programa das Nações Unidas para os Assentamentos Humanos, 55% da população mundial residia em áreas urbanas em 2021, percentual que deverá alcançar 68% até 2050 (UN-HABITAT, 2022). Nesse cenário, estima-se que a maioria das pessoas idosas residirá em centros

urbanos, especialmente em países de baixa e média renda, como Brasil, nações africanas e diversos países asiáticos. Em 2022, o IBGE (2023) identificou que 87,4% dos brasileiros residiam em áreas urbanas.

As cidades, entendidas como sistemas organizacionais complexos, encontram-se em constante transformação, impulsionadas tanto por ações governamentais quanto por iniciativas coletivas e individuais. Muitas dessas mudanças não decorrem de um planejamento abrangente e criterioso, mas influenciam diretamente a relação dos habitantes com o ambiente construído (UN-HABITAT, 2022). De modo geral, quanto maior a escala da intervenção urbana, mais profundos são os impactos sobre o modo de vida da população, um aspecto que adquire relevância particular diante do do crescente envelhecimento populacional nos contextos urbanos.

A pouca eficiência da gestão e do planejamento urbano configuram-se como um desafio crescente em diversas metrópoles ao redor do mundo. A ausência de diretrizes consistentes e integradas contribui para impactos ambientais negativos, comprometendo simultaneamente a qualidade de vida da população e a saúde dos ecossistemas urbanos (LIU; JAY; CHEN, 2021). Entre os efeitos mais recorrentes, destaca-se o uso inadequado do solo, consequência do crescimento desordenado e da ocupação não planejada. Essa dinâmica resulta na distribuição desigual da densidade urbana, com áreas subutilizadas coexistindo com zonas superlotadas, situação que acentua problemas sociais e ambientais e fragiliza a resiliência urbana.

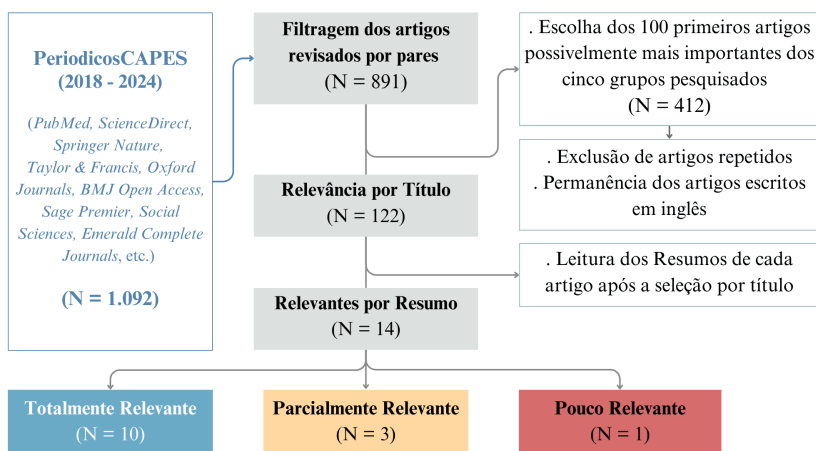
O Manual de Arborização Urbana, por exemplo, é um instrumento técnico e de gestão que orienta o planejamento, implantação, manejo e conservação da arborização em áreas urbanas, considerando aspectos ambientais, paisagísticos, sociais e de segurança. No contexto brasileiro, embora não exista uma lei federal que obrigue todos os municípios a possuírem formalmente um manual, sua elaboração é amplamente recomendada por órgãos ambientais, conselhos profissionais e associações técnicas, como forma de atender aos princípios e normas já previstas na legislação. No entanto, poucos municípios brasileiros possuem esse manual e, mesmo quando possuem, sua aplicabilidade não se torna garantida. Dessa forma, sua inexistência ou não aplicação pode comprometer o licenciamento ambiental de obras e a captação de recursos junto a programas estaduais e federais voltados à infraestrutura verde.

Para mitigar esses impactos, defende-se a adoção de Soluções Baseadas na Natureza (SbN), que integram serviços ecossistêmicos, infraestrutura verde e azul e engenharia ecológica, entre outros recursos. Essas estratégias exploram os benefícios intrínsecos dos ecossistemas naturais para fortalecer a resiliência urbana, reduzir riscos ambientais e promover a regeneração ou re-naturalização das cidades, adaptando-as aos efeitos das mudanças climáticas (MELL, 2023). Nesse sentido, o presente estudo tem como objetivo investigar o papel das florestas urbanas, entendidas como uma tipologia de SbN, na mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, enfatizando a promoção sinérgica entre saúde da população idosa, eficiência do desenho urbano e preservação do meio ambiente.

METODOLOGIA

O processo de pesquisa foi dividido em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada uma Revisão Integrativa de Literatura (RIL) nas áreas de planejamento urbano, saúde ambiental e gerontologia (BOTELHO; CUNHA; MACEDO, 2011). Foram definidas palavras-chave utilizando o operador booleano "AND", gerando cinco grupos de pesquisa: *Urban Forest AND Climate Change*; *Nature-Based Solutions AND Urban Planning*; *Aging AND Health AND Environment*; *Planetary Health AND Urban Forests*; *Green Infrastructure AND Aging*. A busca nos periódicos CAPES foi realizada em julho de 2025, abrangendo bases de dados como *PubMed*, *ScienceDirect*, *Springer Nature*, entre outras. Os critérios de inclusão foram artigos publicados entre 2020 e 2025, revisados por pares e em inglês. Artigos repetidos ou que não atendiam aos critérios foram excluídos. Após o método de análise determinada pela RIL, dos 1.092 artigos inicialmente selecionados, 14 foram analisados por atenderem aos critérios de inclusão. Após isso, foram classificados em três grupos: totalmente relevante (azul), parcialmente relevante (amarelo) e pouco relevante (vermelho). A Figura 3 ilustra o percurso e os resultados da filtragem dos artigos.

Figura 3 - Diagrama de síntese das etapas de filtragem dos artigos encontrados no estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Após a triangulação dos temas "planejamento urbano", "envelhecimento sustentável" e "mudanças climáticas" no contexto das florestas urbanas, identificaram-se seis fatores-chave que contribuem para a manutenção sistêmica da saúde da população idosa, da saúde planetária e para o desenvolvimento urbano: (i) preservação da biodiversidade; (ii) melhoria da qualidade do ar; (iii) regulação da temperatura e mitigação das ilhas de calor urbanas; (iv) promoção do bem-estar físico e mental; (v) fortalecimento da coesão social; e (vi) estímulo ao engajamento comunitário.

Na segunda etapa, realizou-se um estudo de caso no Parque Linear Raquel de Queiroz, localizado em Fortaleza, Ceará, Brasil. Nesse espaço, foram analisados os seis fatores-chave definidos no presente estudo, com o objetivo de verificar em que medida esses princípios são contemplados por essa floresta urbana, configurando, ou não, um ecossistema funcional fundamentado em soluções baseadas na natureza e com capacidade de promover o envelhecimento sustentável. O parque foi escolhido por ser o projeto de área de lazer urbana com implantação de SbN em espaços públicos mais premiados no país, servindo como parâmetro para a aplicação dessa tecnologia em demais espaços urbanos.

FLORESTAS URBANAS - BENEFÍCIOS ECOSSISTÊMICOS INTEGRADOS AO ENVELHECIMENTO SUSTENTÁVEL NAS CIDADES

A Infraestrutura Verde (IV ou IEV) constitui uma rede estrategicamente planejada de áreas verdes de diferentes categorias, destinada a oferecer ampla gama de serviços ecossistêmicos e a promover a proteção da biodiversidade em contextos urbanos e periurbanos (MILLER *et al.*, 2015). As florestas urbanas passam a ser consideradas como elementos essenciais do ambiente citadino, abrangendo árvores, arbustos, solos associados e vegetação de cinturões verdes em múltiplos contextos. Representam o “eixo estrutural” que sustenta a IV, conectando áreas rurais e urbanas e ampliando o desempenho ecológico das cidades. Elas contribuem para a diversidade ecológica e constituem os principais componentes estruturais e funcionais que tornam os centros urbanos e suas regiões adjacentes mais agradáveis para habitação.

Florestas urbanas e mudanças climáticas

Conforme Brašanac-Bosanac *et al.* (2022), as funções das florestas urbanas são comumente classificadas como ambientais, sanitárias, higiênicas, recreativas e estético-decorativas. Nas últimas décadas, sua relevância e benefícios multifuncionais cresceram, sobretudo no contexto das mudanças climáticas, uma vez que contribuem para a melhoria do microclima urbano, favorecem o lazer ao ar livre e protegem solos, edificações e pavimentos contra o superaquecimento. Além de ampliar a cobertura vegetal, promovem a qualidade e quantidade das águas pluviais, regulam o regime dos ventos, mitigam o efeito de ilhas de calor, reduzem o consumo energético para climatização de edificações e exercem outras funções ambientais (CZAJA; KOŁTON; MURAS, 2020). A elevada concentração de concreto, asfalto e metais na malha urbana, associada à intensa presença de sistemas de transporte e atividades industriais, eleva as temperaturas médias das cidades (efeito de ilha de calor), reduz a umidade relativa do ar, compromete a absorção de precipitações e intensifica a poluição atmosférica e sonora em comparação às áreas naturais.

As mudanças climáticas e seus efeitos podem afetar negativamente tanto árvores isoladas quanto extensas áreas de florestas urbanas (EDEIGBA *et al.*, 2024). O declínio arbóreo em áreas urbanas resulta, com frequência, na acumulação contínua de múltiplos fatores de estresse e de suas interações, como extremos climáticos, pragas, doenças, herbivoria, construções não planejadas e usurpação de áreas verdes (CZAJA; KOŁTON; MURAS, 2020).

As práticas inadequadas de manejo florestal, seleção de espécies inapropriadas, mudas de baixa qualidade, plantio em locais ou condições desfavoráveis, preparo deficiente do solo e ausência de manutenção agravam a vulnerabilidade (ELLIOTT; EON; BREADSELL, 2020). Quando perturbados — seja por atividades antrópicas, como desmatamentos, seja por processos naturais, como morte de árvores senescentes, surtos de pragas ou doenças —, esses ecossistemas podem liberar o CO₂ previamente armazenado, invertendo sua função de sequestro de carbono e emitindo substâncias prejudiciais ao ambiente (ELLIOTT; EON; BREADSELL, 2020).

No contexto do envelhecimento sustentável, a preservação e adaptação das florestas urbanas assumem papel estratégico (Quadro 1).

Quadro 1 - Contributos das florestas urbanas para a mitigação das mudanças climáticas.

VARIÁVEIS HUMANO-AMBIENTAIS	BENEFÍCIOS DAS FLORESTAS URBANAS
Emissão de gases de efeito estufa	Sequestram carbono e contribuem para mitigar as mudanças climáticas.
Eventos climáticos extremos	Atenuam extremos e favorecem o microclima urbano.
Efeito de ilha de calor	Podem fornecer sombra e reduzir temperaturas.
Enchentes	Amortecem o escoamento superficial e reduzem inundações.
Exposição à radiação solar nociva	A depender do tamanho da copa, proporcionam sombra.
Economia energética	Reduzem o consumo por sombreamento e resfriamento.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com base em Edeigba *et al.* (2024).

Esses ecossistemas contribuem para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas que afetam desproporcionalmente a população idosa, reduzindo a exposição a extremos térmicos, melhorando a qualidade do ar e promovendo espaços de socialização e atividade física ao ar livre por meio de ambientes arborizados ao ar livre. A implementação de estratégias adaptativas, como a seleção de espécies resilientes ao clima, o manejo preventivo contra

pragas e a manutenção adequada, fortalece a resiliência urbana, amplia o conforto ambiental e favorece a saúde física e mental de pessoas idosas, contribuindo com o direito à cidade e a qualidade de vida da população.

Estudo de Caso – Parque Linear Rachel de Queiroz, Fortaleza, Ceará, Brasil

A área de estudo desta pesquisa corresponde a uma subdivisão do Parque Linear Rachel de Queiroz (PLRQ), o Trecho 6. O parque, localizado na zona oeste de Fortaleza, Ceará, foi criado pelo Decreto Municipal nº 13.292, de 14 de janeiro de 2014 e é composto por dezenove trechos previstos em projeto (BEZERRA GUERREIRO *et al.*, 2024). Em 2022, foi concluída a primeira etapa de implantação, com a inauguração de quatro trechos: Trechos 1, 2, 5 e 6. Este último, o trecho analisado, recebeu prêmios como o Obra do Ano em 2023 pelo *Archdaily Brasil*, o prêmio *LOOP Design Awards* e o *Iconic Award* na categoria Arquitetura Inovadora, além de menção honrosa do Programa das Nações Unidas para Assentamentos Urbanos (ONU-Habitat) na *Convocatoria Pública de Prácticas Innovadoras de la Nueva Agenda Urbana*, consolidando-se como referência de qualidade no espaço público de cidades (CANAL URBANISMO E MEIO AMBIENTE, s.d.; ARCHITECTUS, s.d.).

O recorte analisado possui uma área total aproximada de 90.970 m², ou 9,1 hectares. Ele está inserido no bairro Presidente Kennedy, que possui aproximadamente 25 mil habitantes, com um percentual populacional de 12% de idosos, enquanto o do município é de 9% (FORTALEZA, 2025). Conforme pode ser observado na Figura 4, o trecho é ladeado pelo Riacho Cachoeirinha e contém um conjunto de nove *wetlands*, dispositivo de SbN que utiliza movimentos de decantação e fitorremediação para melhorar a qualidade da água e aumentar a capacidade de absorção do recurso hídrico em períodos de chuvas intensas (EUROPEAN COMMISSION, 2015). A área alvo do projeto outrora fora uma zona de brejo conhecida pela falta de infraestrutura urbana, com despejo irregular de lixo e esgoto (BEZERRA GUERREIRO, 2024). Atualmente, o Trecho 06, possui uma vegetação com espécies arbóreas de grande porte em crescimento, ainda assim, considera-se esse espaço uma Floresta Urbana.

Preservação da biodiversidade

Os espaços verdes urbanos prestam uma ampla gama de serviços ecossistêmicos que contribuem para o equilíbrio ecológico geral dos ambientes urbanos. Conforme Edeigba *et al.* (2024), espécies vegetais raras e ameaçadas podem encontrar refúgio nos espaços verdes urbanos, onde ações de conservação podem ser direcionadas para garantir sua sobrevivência. Esses ambientes também oferecem habitats essenciais para fauna em risco, como anfíbios, répteis e pequenos mamíferos, cuja preservação configura-se como iniciativa estratégica de conservação (EDEIGBA *et al.*, 2024).

Figura 4 - Diagrama do Masterplan do Trecho 6 do PLRQ com fotos do parque que ilustram os seis itens analisados no estudo: 4A – Preservação da biodiversidade; 4B – Melhoria da qualidade do ar; 4C – Regulação da temperatura e melhoria das ilhas de calor urbanas; 4D – Fortalecimento da coesão social; 4E – Estímulo ao engajamento comunitário; 4F – Promoção do bem-estar físico e mental.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025), com utilização de Masterplan de Architectus (s.d.) e fotos do acervo pessoal dos autores dos anos de 2022 e 2024.

No caso do PLRQ, as *wetlands* do Trecho 06 foram concebidas para requalificação ambiental e melhoria da qualidade da água, com incorporação de flora nativa e presença espontânea de fauna silvestre. Desde a inauguração, aves como garças, patos, galinhas-d'água e socozinhos passaram a ocupar o espaço. A Figura 4A ilustra um bando com dezenas de espécimes de “marreca-viuvinha” agrupado em uma das *wetlands* do parque. Contudo, observou-se a presença de árvores exóticas invasoras em áreas próximas ao Riacho Cachoeirinha, o que pode comprometer a diversidade ecológica a médio e longo prazo. A ausência de um sistema de monitoramento ambiental contínuo limita a avaliação de evolução da biodiversidade. No entanto, as espécies nativas existentes, a ampliação do espelho d'água do riacho com as *wetlands* e a qualidade da água em algumas das *wetlands* permite concluir uma melhoria significativa da preservação da biodiversidade na Floresta Urbana.

Melhoria da qualidade do ar

A fitorremediação constitui um mecanismo essencial por meio do qual a vegetação em espaços verdes urbanos absorve e neutraliza poluentes. Esse processo natural envolve a captura, transformação e estabilização dessas substâncias pelas plantas, tornando-as menos nocivas ao ambiente. Diversos grupos vegetais — incluindo gramíneas, arbustos e árvores — apresentam capacidade de fitorremediação. Poluentes gasosos, como dióxido de nitrogênio (NO₂), dióxido de enxofre (SO₂) e ozônio (O₃), são absorvidos pelas plantas através de minúsculas aberturas foliares denominadas estômatos. Paralelamente, as plantas funcionam como filtros físicos para o material particulado (MP), retraindo poeira, pólen e outras partículas suspensas em suas superfícies, o que contribui para a redução da concentração de poluentes no ar (VIGEVANI *et al.*, 2024).

Quanto ao PLRQ, embora não existam medições específicas de poluentes atmosféricos de antes e depois da implantação do parque, a incorporação de áreas verdes no meio urbano adensado e a recuperação da vegetação de brejo contribuem para processos de filtragem natural do ar e redução da poeira urbana. As árvores presentes nos passeios de perímetro têm potencial de contribuir para a absorção de poluentes e gases de efeito estufa, embora o porte arbóreo ainda esteja em crescimento e seja insuficiente em algumas áreas de

permanência, como o parquinho e o cachorródromo. A falta de irrigação adequada compromete o desenvolvimento da cobertura vegetal da Floresta Urbana, o que pode reduzir a eficácia dos serviços ecossistêmicos voltados à qualidade do ar.

Na Figura 4B é possível observar duas mulheres caminhando na estação de estiagem no ano de inauguração do parque — em setembro de 2022 — em que o gramado está ressecado e as árvores de grande porte ainda estão em desenvolvimento. Tais fatores apontam para deficiências na implementação das recomendações do projeto e na gestão continuada do espaço, refletindo fragilidades institucionais e a insuficiência de políticas públicas que garantam a manutenção de planos de arborização.

Regulação da temperatura e mitigação das ilhas de calor urbanas

A arborização perimetral do trecho, aliada à presença das *wetlands*, favorece a modulação microclimática, especialmente nas áreas mais próximas aos corpos d'água. Todavia, a insuficiência de sombreamento em espaços de uso intenso, como equipamentos infantis e esportivos, restringe o conforto térmico durante períodos de maior insolação — de 11h às 15h. Essa limitação impacta principalmente idosos e crianças, grupos mais vulneráveis a estresse térmico, podendo reduzir a frequência e a duração das visitas nessas faixas horárias. A ampliação do porte arbóreo e o planejamento de sombreamento ativo durante o período de crescimento da espécimes vegetais seriam essenciais para potencializar a função climática do espaço em períodos mais diversificados do dia. Uma solução adotada temporariamente foi a implantação de um projeto piloto de totem de nebulização no espaço da ciclofaixa de lazer e pista de *cooper* em 2023, no entanto, o projeto foi descontinuado no ano seguinte (DIÁRIO DO NORDESTE, 2024).

Contudo, a presença de *wetlands*, ainda que sem a cobertura vegetal adulta planejada permite um uso agradável da Floresta Urbana por idosos, que são uma presença massiva na área, no período de final de tarde e início da noite, principalmente em atividades físicas, de contemplação e de socialização. A Figura 4C ilustra um desses momentos, em um final de tarde em fevereiro de 2024 — durante a estação chuvosa — um grupo de idosos se reuniu à beira de uma das *wetlands* para contemplar a natureza e conversar.

Fortalecimento da coesão social

O histórico de reivindicação comunitária pelo parque é ativo desde os anos 1980, e as formas de apropriação coletiva atuais — como encontros em torno de atividades esportivas, aulas de dança em grupo, evento artísticos, transmissões de grandes eventos esportivos, eventos itinerantes (parque de diversões e circos) e, principalmente, o consumo nos mais de 50 *food trucks* e barraquinhas de comida — evidenciam o papel do Trecho 06 como ponto de encontro, sociabilidade e suporte a economia local.

A utilização noturna intensificada por atividades gastronômicas e esportivas, aumenta a sensação de segurança e o uso intergeracional do espaço. No entanto, é importante pontuar que a ocupação dos espaços do parque pelas atividades gastronômicas é um processo orgânico e não previsto no projeto original do espaço, assim há uma obstrução de rotas acessíveis por mesas e equipamentos comerciais, que gera conflitos de uso, demandando gestão integrada para equilibrar convivência e funcionalidade (Figura 4D).

Estímulo ao engajamento comunitário

A história do Trecho 06 está intrinsecamente ligada à mobilização social, desde a pressão popular pela criação do parque até a apropriação afetiva de elementos ambientais, a exemplo do cuidado espontâneo com as aves. Usos informais, como a pesca e a instalação de mobiliário não oficial para abrigar e proteger pássaros, revelam o engajamento ativo dos frequentadores, como é destacado na Figura 4E, em que um casal de idosos observa patos e outras aves no espaço denominado pela população como “Recanto dos Pássaros”. No âmbito formal, instalações artísticas e esculturas nas aduelas entre as *wetlands*, bem como murais urbanos em “fachadas cegas” de edifícios do entorno, reforçam a identidade cultural do espaço, transformando-o em motivo de orgulho e autoestima para a comunidade.

Devido às múltiplas premiações e à transformação drástica em relação à situação anterior à implantação do projeto, o trecho atrai visibilidade da mídia e do poder público. Essa notoriedade também se expressa na presença de dois perfis em rede social, gerenciados por frequentadores, que juntos somam 100

mil seguidores. As páginas divulgam atividades artísticas, informam sobre segurança pública no parque, promovem os *food trucks* e outros empreendimentos da economia local e mobilizam pedidos de melhorias — como a instalação de banheiros públicos voltados aos usuários das áreas de alimentação —, configurando-se como um pilar de engajamento comunitário.

Promoção do bem-estar físico e mental

As observações comportamentais realizadas por Bezerra Guerreiro (2024) indicam diversidade de práticas, como caminhada, corrida, ciclismo, contemplação, pesca e lazer infantil, em diferentes turnos e dias da semana. A Figura 4F registra um casal caminhando entre os espelhos d'água, exemplificando a integração entre atividade física e apreciação da paisagem. A presença de fauna e a valorização visual das *wetlands* promovem experiências restaurativas, associadas à saúde mental e à redução do estresse.

A integração do parque como rota segura para escolares amplia o sentido funcional do espaço, reforçando a função de promoção da mobilidade ativa. Entretanto, questões de acessibilidade física relacionadas à execução e manutenção do projeto — como irregularidades nos pisos, ausência de mapa tátil e rampas com inclinação acima dos parâmetros normativos — podem excluir ou limitar a participação plena de pessoas com mobilidade reduzida ou deficiência, comprometendo o alcance universal desses benefícios. Ainda assim, o parque representa uma referência positiva de espaço público e floresta urbana que concilia lazer, contato com a natureza e inclusão social na região.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O envelhecimento, para além da perspectiva individual, deve ser articulado à noção de saúde planetária. Não basta que as pessoas alcancem maior longevidade se o ambiente em que vivem não oferecer condições adequadas para uma vida saudável e digna. Na floresta urbana analisada, o Trecho 06 do Parque Linear Rachel de Queiroz, revela-se um exemplo expressivo de como infraestruturas com Soluções baseadas na Natureza podem integrar funções ecológicas, sociais e culturais em prol do envelhecimento sustentável. Ao conciliar

preservação da biodiversidade, melhoria da qualidade do ar, mitigação de ilhas de calor e oferta de espaços de convivência intergeracional, o parque contribui para a saúde física e mental, a coesão social e o engajamento comunitário. Sua implantação reverteu um passivo ambiental e social histórico, transformando uma área degradada em floresta urbana reconhecida nacional e internacionalmente.

Ainda que persistam desafios — como o controle de espécies invasoras, a ampliação do sombreamento, a garantia de acessibilidade universal e a manutenção adequada da vegetação —, os benefícios diretos e indiretos para a população idosa, especialmente no incentivo à mobilidade ativa, à socialização e ao contato com a natureza, reforçam o papel estratégico de espaços como este na construção de cidades resilientes, inclusivas e preparadas para responder às demandas climáticas e demográficas contemporâneas.

REFERÊNCIAS

ARCHITECTUS. **Projetos**. Architectus S/S, s.d. Disponível em: < <https://www.architectus.com.br/projetos/> >. Acesso em: 25 set. 2024.

BAECKER, L. *et al.* Impacts of extreme heat on mental health: Systematic review and qualitative investigation of the underpinning mechanisms. **The Journal of Climate Change and Health**, v. 22, p. 100446, 11 abr. 2025.

BENTON, L. *et al.* Need for planetary health perspective in guidance for complex interventions for climate and health. **BMJ**, v. 389, p. e083337, 3 jun. 2025.

BEZERRA GUERREIRO, A. L. *et al.* Método de Análise da Qualidade do Espaço Urbano: Parque Linear Rachel De Queiroz. **Blucher Design Proceedings**, p. 500–511, 1 ago. 2024.

BEZERRA GUERREIRO, A. L. **Intervenções urbanas com Soluções Baseadas na Natureza e o Direito ao Lazer** : Parque Linear Rachel de Queiroz em Fortaleza. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo e Design) – Centro de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo e Design, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2024.

BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. DE A.; MACEDO, M. O Método da Revisão Integrativa nos Estudos Organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121, 2011.

BRAŠANAC-BOSANAC, L. *et al.* Urban forests and climate change. **Sustainable Forestry**, n. 85-86, p. 1–12, 1 jan. 2022.

CANAL URBANISMO E MEIO AMBIENTE. Prefeitura Municipal de Fortaleza, Secretaria do Urbanismo e Meio Ambiente (SEUMA). **Parque Rachel de Queiroz vence o 4º prêmio internacional**. Fortaleza, s.d.

CZAJA, M.; KOŁTON, A.; MURAS, P. The Complex Issue of Urban Trees—Stress Factor Accumulation and Ecological Service Possibilities. **Forests**, v. 11, n. 9, p. 932, 26 ago. 2020.

DIÁRIO DO NORDESTE. **'Xiringadores' são removidos das ruas de Fortaleza e Prefeitura abre edital para instalar 150 novos**. Diário do Nordeste, Fortaleza, 19 nov. 2024. Atualizada em 21 nov. 2024.

EDEIGBA, B. A. *et al.* Urban green spaces and their impact on environmental health: A Global Review. **World Journal of Advanced Research and Reviews**, v. 21, n. 2, p. 917–927, 2024.

ELLIOTT, H.; EON, C.; BREADSELL, J. K. Improving City Vitality through Urban Heat Reduction with Green Infrastructure and Design Solutions: A Systematic Literature Review. **Buildings**, v. 10, n. 12, p. 219, 27 nov. 2020.

EUROPEAN COMMISSION, Directorate-General for Research and Innovation. **Towards an EU research and innovation policy agenda for nature-based solutions & re-naturing cities**: final report of the Horizon 2020 expert group on 'Nature-based solutions and re-naturing cities': (full version), Publications Office, 2015.

GRAZULEVICIUTE-VILENISKE, I. *et al.* Aging, Living Environment, and Sustainability: What Should be Taken into Account? **Sustainability**, v. 12, n. 5, 2020.

HAGEN, I. *et al.* Climate change-related risks and adaptation potential in Central and South America during the 21st century. **Environmental Research Letters**, v. 17, 2022.

HWONG, A. R. *et al.* Climate change and mental health research methods, gaps, and priorities: a scoping review. **The Lancet Planetary Health**, v. 6, n. 3, 2022.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers. Climate change 2023: synthesis report. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.

KOMP-LEUKKUNEN, K.; SARASMA, J. Social Sustainability in Aging Populations: A Systematic Literature Review. **The Gerontologist**, v. 64, n. 5, 1 ago. 2023.

KRIEBEL-GASPARRO, A. Climate Change: Effects on the Older Adult. **The Journal for Nurse Practitioners**, v. 18, n. 4, 18 fev. 2022.

MCPHEARSON, T. *et al.* Advancing Urban Ecology toward a Science of Cities. **BioScience**, v. 66, n. 3, p. 198–212, 24 fev. 2016.

MOALLEMI, E. A. *et al.* Local Agenda 2030 for sustainable development. **The Lancet Planetary Health**, v. 3, n. 6, p. e240–e241, 1 jun. 2019.

NEVILLE, T. *et al.* Climate Change and Human Health. **Sustainable Development Goals Series**, p. 479–484, 2023.

NORI-SARMA, A. *et al.* Association Between Ambient Heat and Risk of Emergency Department Visits for Mental Health Among US Adults, 2010 to 2019. **JAMA Psychiatry**, v. 79, n. 4, 23 fev. 2022.

FORTALEZA. Prefeitura Municipal de Fortaleza. **Secretaria Municipal de Saúde – SIMDA (Sistema de Monitoramento Diário de Agravos)**. População consolidada por bairro segundo faixa etária. Fortaleza, atualizado em 11 ago. 2025.

PRINA, M. *et al.* Climate change and healthy ageing: An assessment of the impact of climate hazards on older people. **Journal of global health**, v. 14, 24 maio 2024.

ROCQUE, R. J. *et al.* Health effects of climate change: an overview of systematic reviews. **BMJ Open**, v. 11, n. 6, 1 jun. 2021.

THOMPSON, R. *et al.* Ambient temperature and mental health: a systematic review and meta-analysis. **The Lancet Planetary Health**, v. 7, n. 7, p. e580–e589, 1 jul. 2023.

VIANNA, M. D. DE A. Mulheres, crise climática e COP27: o protagonismo feminino sob a lente da justiça climática. **Organicom**, v. 19, n. 40, p. 90–110, 4 dez. 2022.

VIGEVANI, I. *et al.* Methods to quantify particle air pollution removal by urban vegetation: A review. **Atmospheric Environment: X**, v. 21, p. 100233, 1 jan. 2024.

WAN, K. *et al.* Temperature-related mortality and associated vulnerabilities: evidence from Scotland using extended time-series datasets. **Environmental Health**, v. 21, 2022.

WHITMEE, S. *et al.* Safeguarding human health in the Anthropocene epoch: report of The Rockefeller Foundation–Lancet Commission on planetary health. **The Lancet**, v. 386, 2015.

WU, W.; KAUSHIK, I. Design for Sustainable Aging: Improving Design Communication Through Building Information Modeling and Game Engine Integration. **Procedia Engineering**, v. 118, p. 926–933, 2015.

YANG, Z. *et al.* Mortality risks associated with floods in 761 communities worldwide: time series study. **BMJ**, p. e075081–e075081, 4 out. 2023.

YOON, H.; HUBER, L.; KIM, C. Sustainable Aging and Leisure Behaviors: Do Leisure Activities Matter in Aging Well? **Sustainability**, v. 13, n. 4, p. 2348, 22 fev. 2021.

ZHANG, C.; LIU, S.; CHEN, G. Environmental and Climate Impacts on Physiological Aging: Comprehensive Pathways to Enhanced Age-related Resilience. **Aging and Disease**, v. 16, n. 3, p. 1218–1224, 2024.

NEUROURBANISM, ACTIVE AGING AND MENTAL HEALTH: CONTEMPORARY POSSIBILITIES FOR BUILDING SALUTOGENIC CITIES

Ciro Férrer Herbster Albuquerque
Federal University of Ceará (UFC)

Zilsa Maria Pinto Santiago
Federal University of Ceará (UFC)



ABSTRACT

The growth of urban areas has led to the construction of more cost-effective, environmentally impactful buildings. The concept of neurourbanism has emerged as a potential solution to the challenges posed by rapid urbanization, given the rise in life expectancy, decline in fertility rates, and emergence of chronic diseases. This concept incorporates neuroscience into urban studies, acknowledging the interdisciplinary nature of scientific knowledge. Neurourbanism studies how urban design affects human behavior and mental health. It assesses the effects of urban environments on human physiology across temporal scales. This study presents a discussion of the design criteria for a healthy city. (i) Urban-rural differences, (ii) social connections, (iii) sensory overload, (iv) spatial navigation, (v) presence of nature, (vi) salutogenic design. This literature review synthesizes knowledge from neuroscience, urban planning, and environmental gerontology to ascertain how urban projects can positively influence the active aging of contemporary cities. It examines the role of the designer in promoting dignified and healthy aging and the creation of urban design propositions responsive to mental health and active aging in large cities. Of 1,670 articles, 52 were analyzed. Neurourbanism is an interdisciplinary field that bridges neuroscience, geography, public health, urban sociology, and city design. This study proposes an evidence-based plan for creating a healthier city. It aims to facilitate the implementation of neurourbanism and introduce new approaches to urban design that can improve the well-being of the current and future elderly population.

Keywords: Neurourbanism; urban design; healthy aging; mental health; salutogenic design.

INTRODUCTION

The increase in life expectancy is a phenomenon that is becoming increasingly evident on a global scale, affecting both developed and developing countries. In 2021, the World Health Organization (WHO) reported that over one billion individuals were considered elderly, representing approximately 13.5% of the global population. It is estimated that by 2030, one in every six people will be 60 years old or over, and by 2050, the elderly population could represent 22% of the global population (WHO, 2021). In Brazil, the population over the age of 65 has increased eightfold over the past fifty years, underscoring the necessity for political, economic, and social preparation for this significant demographic transition. The latest census by the "Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística" (IBGE) revealed that in 2022, individuals aged 65 and above constituted 15.6% of the population, representing a 4.8% increase over the previous twelve years (IBGE, 2023).

It is estimated that 79% of the population of Latin America resides in large urban centers, where approximately 30% of the population lives in conditions of extreme poverty or poverty. Additionally, approximately 1 in 4 people in the region live in informal settlements. Brazil exhibits pronounced socioeconomic inequality, ranking as the 14th most unequal country in the world and displaying a high concentration of income between different population groups (UN, 2022). The Urban Development Index for Longevity (IDL), for instance, indicates that merely 7% of Brazilian municipalities provide an adequate environment for aging with a satisfactory quality of life (IDL, 2023). Despite the rapid aging of the global population, it is quite diverse, which has implications for the relationships between mental health, aging, and urban infrastructure. The term "healthy life expectancy", particularly in individuals aged 60 and above, denotes the projected number of years an individual can expect to live in a state of optimal health. From 2000 to 2019, global life expectancy increased at a faster rate than healthy life expectancy at both birth and age 60. In 2000, the average healthy life expectancy for a 60-year-old male was 4.1 years, while the average for a female of the same age was 5.3 years. By 2019, these figures had increased to 4.7 years for males and 6 years for females. This indicates that an increase in

life expectancy does not necessarily correspond with an improvement in health outcomes (WHO, 2020).

The advantages of urban living, including economic and practical benefits, can be offset by certain health challenges, which can affect individuals of any age. These include anxiety, obesity, depression, and dementia. The multifaceted nature of urban environmental variables, particularly in developing countries such as Brazil, can precipitate sensory overload, dearth of green spaces, a sedentary lifestyle, and feelings of isolation, collectively exerting a deleterious influence on mental health. These issues have been discussed in literature since the Industrial Revolution, with notable works *"The Image of the City"* (LYNCH; CAMARGO, 2010), *"City for People"* (GEHL, 2010), and *"Death and Life of Great Cities"* (JACOBS, 2001).

The growth of urban populations is associated with a decline in well-being and mental health. A 2020 study by the Institute of Health Metrics and Evaluation (IHME) revealed that in 2019, one in eight individuals experienced a mental disorder, with anxiety and depression being the most prevalent (BONADIMAN *et al.*, 2020). The advent of the SARS-CoV-2 pandemic further exacerbated this situation, resulting in a notable surge in mental health disorders during the year 2020 (WHO, 2022). In 2019, Brazil was identified as the country with the highest prevalence of anxiety disorders by the World Health Organization (WHO, 2021). In 2022, it was ranked fifth in depression rates by the United Nations (UN, 2022). Furthermore, a sedentary lifestyle is prevalent in Brazil, with 47% of the population considered physically inactive (BRASIL, 2022). With regard to dementia, studies indicate a worrying increase, with approximately 1.76 million Brazilians over the age of 60 living with some form of dementia (BERTOLA *et al.*, 2023). It is estimated that these numbers will continue to grow.

In order to promote healthy aging, the WHO initiated several movements in urban and rural settings. The concept of "active aging", which was first articulated in 2002, entails the optimization of opportunities for enhanced health, participation, and security, with the objective of enhancing the quality of life of individuals as they age. The principal elements of this initiative are as follows: The four key areas identified by the WHO (2002) as fundamental to healthy aging are health, social participation, safety, and lifelong learning. In December 2020, the *"Decade of Healthy Aging 2021-2030"* campaign was initiated with the

objective of coordinating global initiatives to enhance the well-being of older individuals, their families, and communities. This initiative constitutes a call to action for governments, civil society, the private sector, and other stakeholders to collaborate in addressing four key areas: The four key areas of focus are: changing perceptions about aging and older people; physical and social environments that are friendly to the elderly; integrated and person-centered health and care services; and interventions that strengthen the intrinsic and functional capabilities of older people (PAHO, 2020). These two efforts are complementary and seek to promote a global and integrated approach to aging, with the objective of ensuring that older people can live healthy, active, and dignified lives. These and other initiatives underscore the necessity of fostering societies that esteem and bolster human aging. This underscores the significance of integrating knowledge from environmental gerontology with neuroscience in the conceptualization of urban initiatives.

In this context, neurourbanism emerges as a promising interdisciplinary approach, investigating the relationship between urban environments, the human brain, and mental health. This field integrates principles from several disciplines to understand how urban space affects the mental health and well-being of inhabitants (ADLI *et al.*, 2017; BONIFÁCIO *et al.*, 2023). The objective of this literature review is to examine the integration of neurourbanism with the mental health of the elderly population. This integration aims to identify the environmental variables present in urban settings that influence the quality of life, autonomy, and independence of this population. The value of this review lies in its ability to propose strategies based on robust evidence for the urban design of a salutogenic city for countries classified as developing, such as Brazil. These strategies have the potential to qualitatively influence the mental health of the population, thereby providing them with the opportunity to promote active, healthy, and worthy aging in the medium and long term.

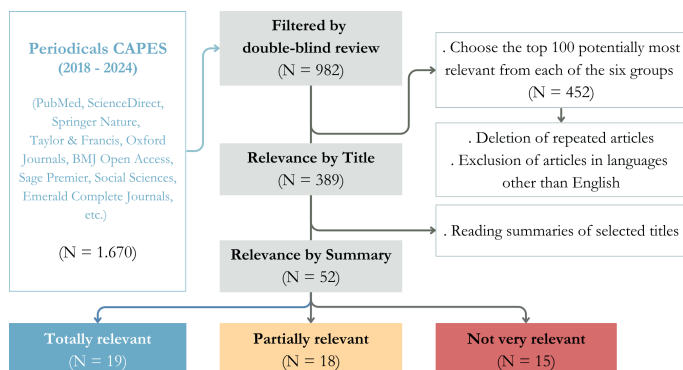
METHODOLOGY

The research project is centered on the theme of "*Neurourbanism and Aging Health*", with the overarching question of how the design of urban projects can positively influence the active aging of the city's population. What is the

role of the designer in promoting dignified and healthy aging? The objective of the review was to analyze recent studies that address this topic, with a particular emphasis on identifying the specific changes to the urban fabric that can facilitate improvements in the healthy aging process in developing countries, which have often been overlooked amidst the rapid growth of infrastructure in urban areas in recent years. The keywords were defined and the Boolean operator "AND" was selected. This allowed for the identification of six groups: City AND Aging; City AND Mental Health; City AND Aging AND Mental Health; Urbanism AND Mental Health AND Aging; Neurourbanism AND Mental Health; and Neurourbanism AND Aging.

The searches were conducted between October 2023 and February 2024 in the general CAPES Periodicals database. The study included articles from the following databases: PubMed, ScienceDirect, Springer, Nature, Taylor & Francis, Oxford Journals, BMJ Open Access, Sage Premier, Social Sciences, and Emerald Complete Journals. The articles included in this study addressed the influence of urban planning on the mental health of the population. As an exclusion criterion, articles that did not meet the requirements were eliminated: a) languages: English and Portuguese; b) search for articles; c) period: last five years (2018-2024); d) peer-filtered; e) exclusion of repeated publications. The 100 articles were filtered in the following reading order: 1) title; 2) summary; 3) content. This resulted in 52 selected articles. The Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and MetaAnalysis (PRISMA) method used by Page *et al.* (2021) was used to systematize each article. For this purpose, a table was structured in Excel Online with the following categories: number, title, aim, methods, results, contributions, relevance to the present research. The selected articles were subsequently classified into three categories based on their relevance: fully relevant (blue), partially relevant (yellow), and not very relevant (red). Figure 1 depicts the methodology employed for article filtering and the resulting categorization.

Figure 1 - “Inclusion” and “exclusion” criteria for searching for articles within the CAPES Portal.



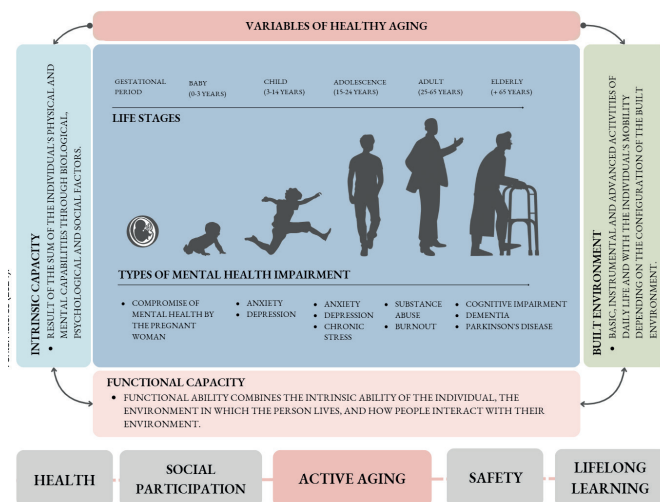
Source: Elaborated by authors (2025) based on the steps of RIL methodology developed by Botelho, Cunha, and Macedo (2011).

RESULTS AND DISCUSSIONS

This literature review covers a range of disciplines, including psychiatry, urban planning, psychology, neuroscience, architecture, sociology, philosophy, and ethnography. It highlights the interdisciplinary nature of urban variables affecting the mental health of the elderly, a topic under-researched in developing countries. As research progresses on mental health, urban life, and population aging, there is optimism that findings will inform public policies and urban interventions that promote active and healthy aging. Monitoring the biopsychosocial functioning of citizens is crucial, especially in understanding the links between the city, the individual, and the brain, and how the environment affects mental health (PEARCE *et al.*, 2018).

The urban environment consists of a multitude of extrinsic factors that shape the context of people’s lives, including the built environment, social relationships, values, social and health policies, support systems, and implemented services (SEIFERT; KÖNIG, 2019). These factors, in conjunction with socioeconomic, psychosocial, behavioral and biological elements, contribute to the multifaceted nature of the determinants of mental health throughout the lifespan, particularly in the advanced phase, when the elderly spend a greater proportion of their time in their residential areas (PAHO, 2020). This implies both intrinsic and functional capabilities (Figure 2).

Figure 2 - Variables considered in the "Decade of Healthy Aging (2021-2030)".



Source: Elaborated by the authors (2025), based on the main health indicators established in the PAHO document (2020).

Of the 52 studies analyzed, only 14 addressed the topic of neurourbanism. The majority of the studies address the current state of knowledge in this field. The dearth of studies focusing on the urban trajectories of the elderly from the perspective of neurourbanism, coupled with the absence of direct engagement with the aging policies put forth by the WHO, including "Active Aging" (2002), "Age-Friendly City" (2007), and the "Decade of Healthy Ageing" (2020), necessitated the integration of 38 supplementary studies. As a result, six categories were identified and synthesized to develop pertinent recommendations for future research. These categories encompass a range of topics, from aspects of the built environment to socio-cultural and public health issues, suggesting avenues for future research to promote healthy aging in urban settings.

Divergences between Urban and Rural Environments

A review of the literature on the impact of the environment on the mental health of elderly people in rural and urban areas reveals contrasting findings in different contexts. In developed countries such as Spain, the adequacy of social support is associated with better mental well-being in adulthood. Older people in rural areas tend to exhibit less deterioration in well-being compared to those

in urban areas (ALCAÑIZ;RIERA-PRUNERA;SOLÉ-AURO, 2020). Conversely, in developing countries like India, the prevalence of depression among elderly people with multiple medical conditions is higher in rural areas, due to factors such as lower education and lack of access to public services. While residing in a rural environment may contribute to greater well-being in certain circumstances, the quality of infrastructure and opportunities available in the place of residence plays a pivotal role in healthy aging, both in rural and urban areas (SUNDARAKUMAR *et al.*, 2022).

Social Connections

Social connection is a significant determinant of mental and physical health, with evidence suggesting its influence at the neurobiological level. Mirror neurons, which are found in numerous regions of the human brain, are implicated in both motor control and emotional processing. This makes us as susceptible to social pain, loneliness, and abandonment as we are to physical pain. A growing body of evidence suggests that prolonged loneliness can have significant negative effects on individuals of all age groups, from childhood to old age. These effects include the development of symptoms of depression, a reduction in brain volume in areas responsible for executive functions and memory, and an increase in cortisol levels, which are associated with physiological stress (BONINI *et al.*, 2022). However, the configuration of the housing environment can influence levels of loneliness among the elderly. The presence of services and leisure spaces in the neighborhood has been demonstrated to mitigate these negative effects (BONINI *et al.*, 2022). Longitudinal studies, such as the one conducted in the Netherlands, indicate that neighborhood characteristics, including population density, the presence of immigrants, housing quality, and the availability of green spaces, are directly associated with levels of anxiety and chronic stress among the elderly (MOTOC *et al.*, 2023). However, it is essential to recognize that no single aspect of the environment is sufficient to entirely eliminate loneliness. This underscores the necessity for a comprehensive understanding of human aging, taking into account the interconnectivity of biological, physiological, and social factors.

Sensory Overload

As elucidated by neuroscience, sensory overload occurs when the brain receives an influx of external stimuli that exceeds its capacity for processing and integrating these inputs. This phenomenon is prevalent in densely populated urban environments, where a multitude of sensory stimuli can precipitate stress, anxiety, and other detrimental effects on mental health. The phenomenon of rapid urbanization stands in stark contrast to the evolutionary history of humanity, which has spent the majority of its existence in natural environments. The physiological adaptation to this change can be challenging due to the diversity of stimuli present in contemporary cities (KIM; KIM, 2023). The phenomenon of sensory overload may go unnoticed by urban residents due to the process of sensory accommodation, whereby the nervous system gradually adjusts to persistent environmental stimuli (KIM; KIM, 2023). However, continued exposure can result in chronic stress, defined as a prolonged response by the body to stressful situations. This can lead to a range of adverse physical and mental health effects, including increased heart rate, accelerated breathing, and prolonged release of stress hormones such as cortisol (STANSFELD *et al.*, 2021).

I. **Noise Pollution**

Noise pollution is defined as the propagation of excessive sound levels that have the potential to cause damage to hearing, well-being, and mental health. It represents a significant environmental hazard to the health, physical and mental well-being, and quality of life of individuals residing in urban environments. The second most significant global concern in relation to environmental risk factors, after air pollution, is urban noise generated by transport, which is considered one of the primary propagators (FU *et al.*, 2023; WHO, 2018). This includes traffic, trains, and aviation. Construction, leisure activities such as shows and events, shops, and other sources contribute to this pollution (LI *et al.*, 2022). Recent studies indicate that prolonged exposure to road traffic noise is associated with an elevated risk of hypertension, myocardial infarction, cardiovascular mortality, and stroke (COLE-HUNTER *et al.*, 2021).

II. **Light Pollution**

Light pollution, also known as artificial light at night (ALAN), represents an interference with natural patterns of light and darkness resulting from the excessive or inadequate use of artificial lighting (BURT *et al.*, 2023). The adverse effects of light pollution are multifaceted, impacting the health, safety, and well-being of the population, as well as social and economic activities, in addition to the balance of environmental fauna and flora. Burt and colleagues (2023) identify four distinct manifestations of this phenomenon: artificial glows in the night sky (sky glow), night vision glare (glare), intrusion of light in environments where its presence is unwanted (light trespass), and the excessive concentration of night lights, capable of causing visual disturbances (clutter). The disturbance of circadian rhythms appears to be associated with a number of adverse outcomes, including an increased risk of traffic accidents and comorbidities such as suicidal tendencies and neurodegenerative diseases.

III. **Air Pollution**

It is of the utmost importance to assess the impact of air pollution on health in the context of population aging in order to achieve "*Sustainable Development Goal 3.9*". By 2030, the number of deaths and illnesses resulting from dangerous chemicals, contamination, and pollution of air and water is to be substantially reduced. This objective is to be achieved by reducing deaths and illnesses resulting from air pollution (WHO, 2021). The precise determination of exposure to air pollution represents a significant challenge in epidemiological studies, particularly in urban settings. This is due to the inherent complexity of the variables involved, including occupational activity, mobility patterns, and the housing conditions of residents. Despite the use of personal monitoring devices, it remains challenging to assess long-term exposure due to limitations in the number of participants and the timing of measurements (SINGER *et al.*, 2023). In Brazil, the pioneering study employed data from 603 autopsies to investigate the influence of socioeconomic vulnerability on chronic exposure to air pollution in urban areas, underscoring that less privileged individuals tend to have higher exposure. Exposure bias has been associated with longer commutes

due to socioeconomic segregation, indicating that erroneous exposure is not random but influenced by social determinants (SINGER *et al.*, 2023).

Spatial Navigation

Spatial navigation, which is fundamental for efficient locomotion in the urban environment, is influenced by a number of factors, including the architectural features of the surrounding environment, signage, and familiarity with the area. These two forms of navigation can be defined as egocentric and allocentric, respectively (VAN DER HAM; CLAESSEN, 2020). These two forms of spatial navigation are employed in a complementary manner at different times of the day. The capacity to transition between these two spatial representations enables humans and other animals to effectively navigate diverse environmental and contextual scenarios (COUGHLAN *et al.*, 2018; VAN DER HAM; CLAESSEN, 2020). Egocentric navigation is employed on a small scale and in tasks that entail direct interactions with the surrounding environment, such as a visit to the supermarket. Additionally, it is influenced by bodily and proprioceptive sensors. In contrast, allocentric navigation is more advantageous for large-scale navigation and the comprehensive understanding of spatial relationships, such as a medical appointment in a distant neighborhood (COUGHLAN *et al.*, 2018; VAN DER HAM; CLAESSEN, 2020).

The process of aging affects human navigation in a number of ways, including changes in proprioception, vestibular perception, and visual abilities. The deterioration of hippocampal regions associated with dementia, such as Alzheimer's disease, may be linked to declines in allocentric navigation. This suggests the need for urban infrastructure that is more responsive to these needs, as identified in a study published in the journal *Nature* (COUGHLAN *et al.*, 2018). Furthermore, the combination of sensory changes, including visual deterioration, decreased tactile and proprioceptive sensitivity, and cognitive decline, can collectively contribute to the difficulty of navigation experienced by older individuals.

As illustrated in Figure 3, for an active lifestyle, particularly for the elderly, it is essential that urban development initiatives facilitate convenient and secure mobility for the population through the provision of safe sidewalks, the availability

of high-quality shared transportation options such as buses and bicycles, dedicated pedestrian pathways within green spaces, and other conducive conditions for physical activity, as outlined in the principles of “Active Design”. The “Sidewalk Experience” (NYC, 2013). Walking has been demonstrated to promote active aging and to confer benefits with respect to cognitive function, as evidenced by a study conducted in the United States. The presence of parks, recreational facilities, and commercial density in neighborhoods has been associated with higher levels of cognitive function in older adults (FINLAY *et al.*, 2021). However, no evidence was found to suggest an association between these features and the rate of cognitive decline over time. In densely populated Asian cities, walkable neighborhoods have been demonstrated to be crucial for the mental health of older individuals. Cognitive stimuli, including social contacts, interactions in dense areas, and activities in educational settings, were identified as pivotal for the mental health of these elderly individuals (ZHANG *et al.*, 2021). These findings underscore the significance of developing urban environments that are conducive to healthy aging, irrespective of geographical context. This entails reducing development density, designing neighborhoods with the specific needs of older adults in mind, and ensuring the accessibility of facilities for cognitive activities.

Figure 3 - Schematic representation of a walkable city.

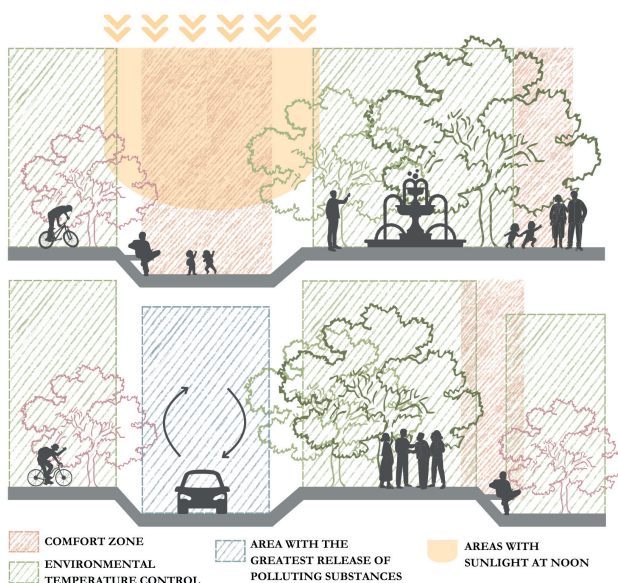


Source: Elaborated by the authors (2025), based on the Integrative Literature Review.

Presence of Nature

Urbanized environments offer a range of benefits, including enhanced productivity and access to services. However, they also present unique health challenges, such as elevated pollution levels and higher temperatures, in comparison to rural environments. A growing body of research indicates a positive association between contact with nature in urban environments and health outcomes. A research on mental health in urban older adults identifies four essential dimensions for the creation of healthy and sustainable environments. These include individual characteristics, the physical aspects of the environment, social and cultural processes, and health-related resilience (OLSZEWSKA-GUIZZO; SIA; ESCOFFIER, 2023). A study conducted in Singapore examined the therapeutic effects of horticulture on older adults, revealing notable improvements in physical and psychological well-being (SIA *et al.*, 2020). These studies lend support to the concept of a “Biophilic city” (Figure 4), which integrates natural elements into urban environments with the objective of promoting mental health and active aging (MILLIKEN *et al.*, 2023). This approach is consistent with the WHO’s “age-friendly cities” concept, which underscores the significance of creating welcoming and accessible urban environments (WHO, 2023).

Figure 4 - Compositional possibilities of the urban design of the “Biophilic City”.



Source: Elaborated by the authors (2025), based on the Integrative Literature Review.

Salutogenic design integrated with Neurourbanism

Considering the aforementioned evidence, the burgeoning corpus of scientific studies pertaining to Neurourbanism examines the impact of environmental factors inherent to the urban built environment, with the aim of fostering urban initiatives that are responsive to mental health and active aging. Although the term “neurourbanism” was recently coined in 2015 by Mazda Adli through the *“Berlin Interdisciplinary Forum for Neurorbanistic Studies”*, the concept was initially proposed by sociologist Aaron Antonovsky in the 1970s with the development of the *“Theory of Salutogenesis”*. Salutogenesis was first proposed by Antonovsky in the 1970s and has subsequently informed the expansion of studies focused on the pursuit of human and environmental health in the present era (ANTONOVSKY, 1979; ADLI *et al.*, 2017).

In essence, the *“Theory of Salutogenesis”* offers a transformative perspective on health promotion, diverging from the conventional pathogenic paradigm that prioritizes the etiology and treatment of disease. Salutogenesis is a theory that focuses on the origins of health and the factors that promote it. It proposes the

central concept of the "*Sense of Coherence*" (SOC). Sense of Coherence (SOC) is defined as an individual's capacity to perceive their life as comprehensible, manageable, and meaningful. The results of studies indicate that a high SOC is associated with an enhanced capacity to cope with stress and to maintain physical and mental health. This demonstrates a robust correlation between a positive perception of life and general well-being. The sense of coherence is a developmental phenomenon that increases with age (ANTONOVSKY, 1979). A longitudinal study of over 18,000 Finns revealed that SOC stabilizes in individuals over 30 years of age, in contrast to the younger population, where SOC is more fluctuating (FELDT *et al.*, 2007). This stability of SOC in older adults underscores the significance of urban environments that foster active aging, thereby enhancing resilience and adaptability to the inherent changes associated with aging.

As conceptualized by Antonovsky, SOC comprises three fundamental components: comprehensibility, or the capacity to understand an event; manageability, or the perception of the potential to resolve it; and significance, or the meaning attributed to that event. Those with a robust SOC are capable of exerting control over their lives and environments through the undertaking of meaningful actions (BAUER *et al.*, 2020). This concept can be applied to urban planning by creating environments that are easily understandable, manageable, and meaningful for their inhabitants. Individuals with a robust SOC exhibit enhanced well-being and health outcomes, along with heightened resilience to psychological distress and emotional overload (DEL-PINO-CASADO *et al.*, 2019). In accordance with the theory put forth by Antonovsky, the concept of salutogenic design was introduced for the purpose of enhancing the health-promoting aspects of built environments. Initially, this approach was primarily applied to hospital settings, and subsequently, it was adapted for incorporation into a broader range of architectural projects. In urban planning, this approach is being applied in projects designed to promote mental health and well-being through the creation of public spaces that encourage social interaction, physical activity, and connection with nature. In the medium and long term, these spaces aim to provide positive stimuli to the cognitive reserve (CR) (STERN, 2009).

The findings of studies such as that conducted by Masanotti *et al.* (2020) indicate that a low Sense of Coherence (SOC) is a significant predictor

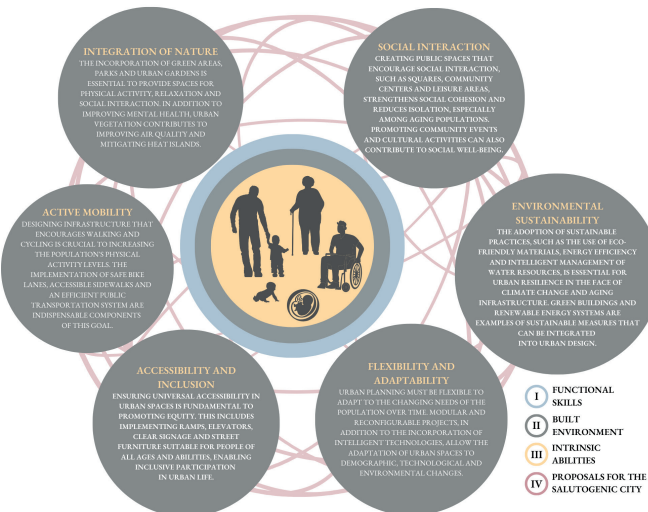
of depression, burnout, and job dissatisfaction among nurses. These professionals frequently encounter elevated levels of chronic stress, extended work hours that necessitate sophisticated abilities, and, in the majority of instances, limited opportunities for restorative recuperation. While the SOC can monitor the perception of human well-being through users' self-reported experiences, neuroscience employs technologies such as electroencephalograms (EEGs), eye-tracking, and other wearables to perform analogous analyses, albeit at the level of brain pathways. For example, one intervention study investigated the impact of a one-hour walk in two different environments — a busy street and a forest — on stress-related brain regions. The researchers measured brain activation in 63 healthy participants before and after walking, using tasks that required identification of fearful faces and social stress. The results demonstrated that activation of the amygdala, a region of the brain associated with stress, decreased after walking in a natural environment, while it remained stable after walking in an urban environment (SUDIMAC; SALE; KUHN, 2022).

Therefore, depending on the population's lifestyle, the directions presented in Figure 5 are associated with an increase in cognitive reserve (CR), which is highly relevant to the capacity for neuroplasticity, resilience to the consequences of the climate crisis (increased temperature and pollution of air), and a protective mechanism against neurodegenerative conditions, such as Parkinson's disease or dementia. The implementation of sensory gardens in hospital areas, initially introduced in clinical environments, is now being expanded to the urban context. This expansion highlights the continuity of studies and the relevance of this topic in human daily life. From this perspective, it is evident that integrating natural spaces into urban planning is crucial for promoting the mental health and well-being of citizens. Consequently, it can be suggested that improving social capital (SOC) can be an important resource for promoting health both indoors and in urban areas.

By integrating the tenets of salutogenic design and neurourbanism into urban planning, it becomes feasible to develop project proposals that are grounded in scientific evidence and designed to foster an active, sustainable, and resilient lifestyle in response to the inherent changes associated with both human aging and the climate crisis. The incorporation of these concepts into urban projects can facilitate the creation of environments that not only prevent

disease but also enhance the health and general well-being of inhabitants and the harmonious coexistence of humans and nature. This contributes to the development of healthier, more sustainable, and sustainable cities. In the long term, the concept may be described as “intelligent” in a way that is both literal and figurative.

Figure 5 - Salutogenic design integrated with Neurourbanism concept.



Source: Elaborated by the authors (2025), based on the Integrative Literature Review.

In this research, a literature review was conducted on the subject of neurourbanism, examining 52 peer-reviewed articles on the topic. Following the removal of duplicates, 19 articles were selected for analysis. These articles discussed the development of the concept in various academic fields, particularly geography, philosophy, and psychiatry. Three articles concentrated on the practical implementation of neurourbanism in diverse contexts. Neurourbanism is an interdisciplinary field that employs neuroscientific methods and collaborations between urban planning and public health to investigate the impacts of urban environments on mental and cognitive health. The objective is to comprehend the influence of the built environment on emotional, mental, and physiological states, particularly in the context of aging. While gathering biological, psychological, and social data represents a significant challenge, it is imperative to gain

insight into the intricate interplay that shapes healthy aging (BONIFÁCIL *et al.*, 2023; PYKETT; OSBORNE; RESCH, 2020).

In practice, a combination of methodologies is employed, including the use of psychological self-report measures and wearable sensors, to collect both qualitative and quantitative data about people's responses to the urban environment. A study conducted in the Himalayas investigated the impact of specific aspects of the built environment on the mental reset of university students, emphasizing the significance of elements such as vegetation and novelty/uncertainty (D'ACCI, 2020; 2021; PYKETT; OSBORNE, RESCH, 2020). Another study conducted in Berlin examined the relationship between socioeconomic status and perceived stigma among patients with epilepsy. The findings indicated that stigma reduction strategies must consider the socio-structural living environment. A third study conducted in Beijing employed functional MRI to examine patterns of brain activity during public transportation trips, thereby providing novel evidence that can inform interdisciplinary approaches to enhancing passenger well-being (ASIM *et al.*, 2023; QIN; DONG; HUANG, 2023). While these studies have not focused on the elderly population *per se*, it is vital to assess and monitor the sociodemographic, epidemiological, and psychosocial circumstances of each individual in order to facilitate healthy and dignified aging, both in urban and rural settings.

Neurourbanism applied to Active Aging: a proposal for a Salutogenic City

The proposal to consider neurourbanism as a complex and interdisciplinary field of knowledge, capable of measuring environmental, biological, psychological, and socioeconomic variables, with the objective of intervening in urban design through strategic and inclusive planning, is fundamental to the mitigation of possible damage to public health caused by external factors, such as chronic stress in large cities (PYKETT, 2020). This approach underscores the significance of contemplating the intricate interrelationship between diverse urban actors and the comprehensive involvement of all members of society in their daily pursuits.

Strategic planning based on data and evidence is essential for understanding and addressing urban challenges. Inclusive planning, meanwhile,

seeks to create environments that allow for the participation of all members of society, with due consideration of their individual characteristics and specific needs. It is imperative to incorporate subjective perspectives, acknowledging that emotions associated with feelings of exclusion can have a detrimental impact on mental health and well-being (QIN; DONG; HUANG, 2023). It is imperative that urban design be adapted to meet the needs of individuals with a range of physical and mental health conditions, including the effects of human aging and disabling conditions such as dementia. A holistic and inclusive approach is essential to the promotion of a more just and equal society. To ensure the sustainable functioning of citizens' mental and physical health, it is necessary to articulate the pillars of public health, neurourbanism, and planning, providing favorable environmental conditions for all stages of life, from birth to healthy and independent aging (HEYLIGHEN *et al.*, 2017; MARSH *et al.*, 2020). This integrated approach is of paramount importance in the creation of salutogenic urban environments, whose design composition provides incentives for healthy habits, physical and mental well-being, and, as a consequence, the active aging of inhabitants in a "*Salutogenic City*".

FINAL CONSIDERATIONS

A review of 52 articles underscores the dynamic and interdisciplinary character of neurourbanism, a field that remains loosely defined but is undergoing continuous evolution. A cursory review of the extant literature reveals that only 19 articles address the topic directly; moreover, none of these articles are Brazilian or focus on aging and mental health. This paucity of research suggests opportunities for further study, particularly within the scope of the "*Salutogenic City*" project. The majority of studies adopt multi-method approaches, emphasizing data science for urban planning. However, neurourbanism underscores the necessity to integrate this with insights into how environmental factors affect brain function. The key themes that emerged included urban-rural disparities, mobility, accessibility, active design, and environmental variables relevant to aging. Neurourbanism does not repudiate contemporary planning paradigms; rather, it advocates for an interdisciplinary model that integrates qualitative and quantitative data to address the biopsychosocial needs of urban populations. In order

to promote healthy aging and equitable urban growth, it is essential to align it with inclusive planning and public health strategies. To advance this field, further evidence-based research is necessary to make it more accessible and impactful for global cities.

REFERENCES

- ADLI, M. *et al.* Neurourbanism: towards a new discipline. **The Lancet Psychiatry**, v. 4, n. 3, p. 183–185, 2017.
- ALCAÑIZ, M.; RIERA-PRUNERA, M.-C.; SOLÉ-AURÓ, A. "When I Retire, I'll Move Out of the City": Mental Well-being of the Elderly in Rural vs. Urban Settings. Intern. **Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 7, p. 2442, 32020.
- ANTONOVSKY, A. **Health, stress, and coping**. San Francisco: Jossey-Bass Publisher, 1979.
- ASIM, F. *et al.* Restoring the mind: A neuropsychological investigation of university campus built environment aspects for student well-being. **Building and Environment**, v. 244, p. 110810–110810, 2023.
- BAUER, G. F. *et al.* Future directions for the concept of salutogenesis: a position article. **Health Promotion International**, v. 35, n. 2, p. 187–195, 2020.
- BERTOLA, L. *et al.* Prevalence of Dementia and Cognitive Impairment No Dementia in a Large and Diverse Nationally Representative Sample: The ELSI-Brazil Study. The Journals of Gerontology. **Series A, Biological Sciences and Medical Sciences**, v. 78, n. 6, 2023.
- BONADIMAN, C. S. C. *et al.* Depressive disorders in Brazil: results from the Global Burden of Disease Study 2017. **Population Health Metrics**, v. 18, n. S1, set. 2020.
- BONIFÁCIO, A. *et al.* Musings on Neurourbanism, Public Space and Urban Health. Zenodo (**CERN European Organization for Nuclear Research**), 2023.
- BONINI, L. *et al.* Mirror neurons 30 years later: implications and applications. **Trends in Cognitive Sciences**, v. 26, n. 9, p. 767–781, 2022.
- BOTELHO, L. L. R.; CUNHA, C. C. DE A.; MACEDO, M. O Método Da Revisão Integrativa Nos Estudos Organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121, 2011.
- BURT, C. S. *et al.* The effects of light pollution on migratory animal behavior. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 38, n. 4, 2023.
- COLE-HUNTER, T. *et al.* Long-term exposure to road traffic noise and stroke incidence: a Danish Nurse Cohort study. **Environment Health**, v. 20, n. 1, 2021.
- COUGHLAN, G. *et al.* Spatial navigation deficits — overlooked cognitive marker for preclinical Alzheimer disease? **Nature Reviews Neurology**, v. 14, n. 8, p. 496–506, 2018.
- DEL-PINO-CASADO, R. *et al.* Sense of coherence, burden and mental health in caregiving: A systematic review and meta-analysis. **Journal of Affective Disorders**, v. 242, p. 14–21, 2019.

FELDT, T. *et al.* Structural validity and temporal stability of the 13-item sense of coherence scale: Prospective evidence from the population-based HeSSup study. **Quality of Life Research**, v. 16, n. 3, p. 483–493, 2007.

FINLAY, J. *et al.* Neighborhood active aging infrastructure and cognitive function: A mixed-methods study of older Americans. **Preventive Medicine**, v. 150, p. 106669, 2021.

FU, X. *et al.* Long-Term Exposure to Traffic Noise and Risk of Incident Cardiovascular Diseases: a Systematic Review and Dose-Response Meta-Analysis. **Journal of urban health**, v. 100, n. 4, p. 788–801, 2023.

HEYLIGHEN, A.; VAN DER LINDEN, V.; VAN STEENWINKEL, I. Ten questions concerning inclusive design of the built environment. **Building and Environment**, 2017.

IBGE — INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo: O número de idosos no Brasil cresceu 57,4% em 12 anos**. Governo Federal, Brasil, 2023.

IDL — INSTITUTO DE LONGEVIDADE. **Índice de Desenvolvimento Urbano para Longevidade 2023**, 2023.

KIM, E. J.; KIM, J. J. Neurocognitive effects of stress: a metaparadigm perspective. **Molecular Psychiatry**, p. 1–14, 2023.

LI, A. *et al.* Environmental Noise Exposure and Mental Health: Evidence From a Population-Based Longitudinal Study. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 63, 2022.

MARSH, H. W. *et al.* The well-being profile (WB-Pro): Creating a theoretically based multidimensional measure of well-being to advance theory, research, policy, and practice. **Psychological Assessment**, v. 32, n. 3, p. 294–313, 2020.

MASANOTTI, G. M. *et al.* Sense of Coherence in Nurses: A Systematic Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 6, 2020.

MILLIKEN, S. *et al.* Biophilic cities and health. **Cities & Health**, v. 7, n. 2, p. 175–188, 2023.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Vigitel Brasil 2021: vigilância de fatores de risco e proteção para doenças crônicas por inquérito telefônico**. Brasília: Ministério da Saúde (BR), 2022.

MOTOC, I. *et al.* Social and physical neighbourhood characteristics and 10-year incidence of depression and anxiety in older adults: Results from the Longitudinal Aging Study Amsterdam. **Social Science & Medicine**, v. 327, p. 115963, 1 jun. 2023.

NYC — THE NEW YORK CITY. **Active Design: The Sidewalk Experience**. Department of City Planning, NYC, 2013.

OLSZEWSKA-GUIZZO, AGNIESZKA ; SIA, A.; ESCOFFIER, N. Revised Contemplative Landscape Model (CLM): A reliable and valid evaluation tool for mental health-promoting urban green spaces. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 86, p. 128016–128016, 2023.

PAGE, M. J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. **British Medical Journal**, v. 372, n. 71, 2021.

PAHO — PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION. **Decade of Healthy Aging in the Americas (2021-2030)**. WHO, 2020.

PEARCE, J. *et al.* Life course of place: A longitudinal study of mental health and place. *Transactions of the Institute of British Geographers*, v. 43, n. 4, p. 555–572, 2018.

PYKETT, J.; OSBORNE, T.; RESCH, B. From Urban Stress to Neurourbanism: How Should We Research City WellBeing? *Annals of the American Association of Geographers*, v. 110, n. 6, p. 1936–1951, 2020.

QIN, T.; DONG, W.; HUANG, H. Perceptions of space and time of public transport travel associated with human brain activities: A case study of bus travel in Beijing. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 99, p. 101919, 2023.

SEIFERT, A.; KÖNIG, R. Help From and Help to Neighbors Among Older Adults in Europe. **Frontiers in Sociology**, v. 4, 2019.

SIA, A. *et al.* Nature-based activities improve the well-being of older adults. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020.

SINGER, J. DA M. *et al.* Assessing socioeconomic bias of exposure to urban air pollution: an autopsy-based study in São Paulo, Brazil. **Lancet Regional Health - Americas**, v. 22, 2023.

STANSFELD, S. *et al.* Road traffic noise, noise sensitivity, noise annoyance, psychological and physical health and mortality. **Environmental Health**, v. 20, n. 1, 2021.

STERN, Y. Cognitive reserve. **Neuropsychologia**, v. 47, n. 10, p. 2015–2028, 2009.

SUDIMAC, S.; SALE, V.; KÜHN, S. How nature nurtures: Amygdala activity decreases as the result of a one-hour walk in nature. **Molecular Psychiatry**, v. 27, n. 11, 2022.

SUNDARAKUMAR, J. *et al.* Prevalence of neuropsychiatric conditions and cognitive impairment in two parallel, aging study cohorts from rural and urban India. **Alzheimers & Dementia**, 26 dez. 2022.

UN — UNITED NATIONS. **SDG - Progress Report 2024**: Progress towards the Sustainable Development Goals Report of the Secretary-General The 17 Goals, Department of Economic and Social Affairs Sustainable Development, UN, 2024.

_____. **World Cities Report 2022**. UN Human Set. Programme (UN-Habitat), 2022.

WHO — WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Active aging**: a policy framework. Geneva: World Health Organization, 2002, 59p.

_____. **Global age-friendly cities**: a guide. WHO, 2007, 76p.

_____. **Summary World Report on Aging and Health**. Geneva, 2015, 267p.

_____. **Comprehensive Mental Health Action Plan 2013-2030**. WHO, 2021, 40p.

_____. **World mental health report**: Transforming mental health for all. WHO, 2022.

_____. **Global Network for Age-friendly Cities and Communities**. WHO, 2023.

VAN DER HAM, I. J. M.; CLAESSEN, M. H. G. How age relates to spatial navigation performance: Functional and methodological considerations. **Ageing Research Reviews**, v. 58, p. 101020, 1 mar. 2020.

XU, F. *et al.* The challenge of population aging for mitigating deaths from PM2.5 air pollution in China. **Nature Communications**, v. 14, n. 1, 2023.

ZHANG, S. *et al.* Creating livable cities for healthy aging: Cognitive health in older adults and their 15-minute walkable neighborhoods. **Cities**, v. 137, p. 104312, 2023.

SOBRE AS ORGANIZADORAS

Alba Regina Azevedo Arana

Professor titular da Unoeste Licenciado e Bacharel em Geografia pela FCT UNESPMestre e Doutorado em Geografia Humana pela USP Membro do Comitê de Bacias do Paranapanema Coordenadora do Programa de Pós Graduação em em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional PPGMADRE UNOESTE.

Lattes: <https://lattes.cnpq.br/1931029698985787>

Maria Eulaidia de Araújo

Pos-doutoranda no programa de pós-doutorado stricto sensu em Psicologia da Universidade de Fortaleza UNIFOR. LEHA- Laboratório de Estudo das Relações Humano-Ambientais-LERHA. Doutora em Geografia, Planejamento e Urbanismo, na Universidade de Lyon, no Institut National des Sciences Appliquées - INSA de Lyon. França. Como participante no projeto de pesquisa na área de conhecimento de planejamento ambiental e comportamento humano, no Programa de Doutorado Pleno no Exterior como apoio da instituição de fomento CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Mestre em Psicologia - Universidade de Fortaleza - Unifor. Pedagoga. Especialista em Gestão de Recursos Humanos. Consultora em comportamento sócio-ambiental e organizacional. Facilitadora CEFE e professora Didata em Biodança, com ênfase em Educação Ambiental e de adultos - Andragogia, atuando principalmente nos seguintes temas: Ambiente, Sustentabilidade, Planejamento Urbano e Ambiental, Coleta Seletiva com inclusão dos catadores, Processos Grupais, Formação de Formadores. Vice Presidenta da ABRAÇA - Associação Brasileira de Facilitadores de Biodança. Membro de la FFP de Biodanza -Fédération Française des Professionnels de Biodanza. Gestora do IFEE - Instituto de Formação Empreendedora e Educação Permanente. Presidente da RIAS - Rede Internacional de Ações Sustentáveis. Idealizadora do SISUNI - Sistema Unificado de Gestão dos Resíduos Sólidos. Diretora do LAVIA - Laboratório Vivencial de Aprendizagem. Membro e Colaboradora no Laboratório de Estudo das Relações Humano-Ambientais - LERHA- Programa de Pós-Graduação em Psicologia da Universidade de Fortaleza-UNIFOR .

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/1205575358781371>

ÍNDICE REMISSIVO

A

Aprendizado de Máquina: 25, 26, 28, 31, 36, 131, 132, 142, 143, 227

Aprendizagem de Máquina: 18, 19, 20, 22, 24, 26, 30, 129, 130, 132, 183, 194, 196, 197, 200, 201, 202

Arborização Urbana: 131, 221, 263

Áreas Verdes: 19, 24, 26, 145, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 190, 193, 194, 200, 202, 203, 223, 266, 267, 270

Áreas Verdes Urbanas: 24, 26, 182, 183, 184, 185, 186, 188, 190, 193, 194, 200, 202, 203, 223

C

Carbon Monitoring: 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 124, 125, 126

Cerrado: 208, 209, 213, 219, 223, 224

Climate Change: 53, 54, 55, 58, 59, 60, 62, 64, 66, 67, 68, 69, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 113, 117, 126, 127, 204, 205, 206, 235, 236, 252, 264, 274, 275, 276

Climate Cycles: 54, 56, 71

Conservação: 104, 105, 107, 113, 184, 186, 190, 191, 207, 208, 209, 210, 211, 221, 223, 226, 227, 228, 234, 235, 263, 269

Custos de Transação: 99, 100, 101, 106, 107, 110, 111, 112

D

Dados Abertos: 183, 190, 191, 194, 200, 203

Deep Learning: 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 126, 128, 153, 183, 197, 203, 204, 205

Deep Learning: 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 28, 32, 33, 34, 36, 37, 38, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 126, 128, 153, 183, 197, 203, 204, 205

Demência: 160, 161, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 177, 178, 179

Direito à Cidade: 238, 239, 240, 241, 242, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 268

Diversidade Florística: 208, 213

E

Energia Eólica: 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104,

106, 107, 108, 110, 111, 112, 113

Energia Solar: 39, 40, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50

Envelhecimento: 160, 161, 162, 163, 164, 178, 179, 180, 181, 254, 255, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 265, 266, 267, 273

Erosão Urbana: 183, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 202, 203

Espaço Urbano: 96, 132, 161, 163, 164, 166, 239, 240, 246, 248, 249, 274

Espécies Exóticas: 208, 216, 219, 221, 222

Extensão Universitária: 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 249, 250, 251, 253

Externalidades: 98, 99, 100, 101, 102, 104, 106, 107, 108, 110, 111, 112

F

Floresta Ripária: 208

G

Geoprocessamento: 82, 89, 95

Geotecnologias: 19, 82, 97, 132

Global Warming: 54, 55, 59, 60, 61, 62, 64, 66, 67, 68, 69, 71, 72, 77, 78, 79

H

Healthy Aging: 278, 280, 282, 283, 284, 285, 289, 295, 297, 298, 299

I

Imagem Multiespectral: 82

Impactos Ambientais: 39, 40, 41, 42, 44, 49, 50, 100, 102, 107, 245, 260, 263

Inclusão Social: 97, 103, 239, 241, 246, 259, 273

Inteligência Artificial: 19, 25, 37, 41, 44, 132, 185, 194, 229

J

Jardins Terapêuticos: 160, 161, 166, 167, 169, 170, 171, 172, 173, 177, 178

L

Literature Review: 54, 58, 74, 116, 118, 121, 275, 278, 281, 283, 289, 291, 294

M

Machine Learning: 19, 20, 23, 24, 27, 28, 30, 38, 97, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 126, 127, 132, 152

Mapeamento: 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 84, 95, 96, 129, 130, 134,

135, 137, 139, 151, 172, 186, 247

Mata Ciliar: 208

MaxEnt: 226, 227, 230, 236, 237

Mental Health: 180, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 286, 289, 290, 291, 292, 293, 296, 297, 298, 299

Misinformation: 54, 58, 66, 75

Modelagem Preditiva: 226

Mudanças Climáticas: 20, 48, 82, 95, 132, 188, 227, 234, 246, 254, 255, 256, 257, 258, 260, 262, 264, 265, 266, 267

N

Neurourbanism: 277, 278, 281, 282, 284, 291, 293, 294, 295, 296, 297, 299

O

ODS 11: 239, 240, 241, 242, 244, 246, 249, 251, 262

P

Planejamento Ambiental Urbano: 82, 131, 132

Planejamento Urbano: 19, 82, 84, 93, 95, 96, 240, 251, 255, 263, 264, 265

Planejamento Urbano: 19, 82, 84, 93, 95, 96, 240, 251, 255, 263, 264, 265

Plantas Aquáticas: 226

Políticas Públicas: 20, 45, 82, 83, 95, 99, 100, 102, 165, 179, 180, 227, 234, 244, 245, 249, 250, 251, 258, 259, 271

S

Salutogenic Design: 278, 291, 292, 293, 294

Scientific Consensus: 54, 61, 65, 66

Sensoriamento Remoto: 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27, 29, 32, 36, 37, 84, 95, 97, 129, 130, 132, 133, 182, 183, 184, 185, 189, 190, 192, 195, 196, 197, 198, 199, 202, 203, 226, 228, 232, 233, 234

Soluções Baseadas na Natureza: 189, 255, 264, 265, 273, 274

Sustentabilidade: 99, 100, 110, 161, 162, 163, 164, 172, 174, 183, 186, 190, 203, 225, 227, 234, 239, 240, 241, 245, 247, 249, 255, 260, 262

Sustentabilidade Urbana: 239, 241, 245, 247

T

Teorema de Coase: 98, 99, 100, 101, 106, 107, 110, 112

U

Urban Design: 278, 281, 291, 295, 296

Urbanização: 87, 90, 91, 94, 95, 208, 220, 240, 251

V

Variáveis Hidrológicas: 226, 227, 231, 232, 233, 234

Vegetação Arbórea Urbana: 81, 82, 83, 91, 130, 137



VENDA PROIBIDA - ACESSO LIVRE - OPEN ACCESS



científica digital

