

Crise Climática e Inteligência Artificial (IA): desafios e soluções para um futuro sustentável

Katherine Athié^a, Bruno Rocha^b e Daniella Bonatto^c

Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Vitória, ES, Brasil.

^a E-mail: katherine.athie@edu.ufes.br

^b E-mail: bruno.rocha@ufes.br

^c E-mail: daniella.bonatto@ufes.br

Submetido em 09 de maio de 2025. Aceito em 30 de setembro de 2025.
<https://doi.org/10.47235/rmu.v13i2.485>

Resumo. A crise climática global vem trazendo inúmeros desafios para o planejamento urbano contemporâneo, exigindo novas abordagens voltadas para o entendimento das suas causas e efeitos nas cidades. O uso de informações geoespaciais é uma estratégia importante para o mapeamento e interpretação do território que vem sendo impulsionado com o uso da Inteligência Artificial (IA). O objetivo deste trabalho é demonstrar como a IA vem sendo implementada para aperfeiçoar a geração e interpretação de imagens geradas por Sensoriamento Remoto (SR). O uso da IA tem grande potencial de contribuir para suprir uma lacuna nos métodos de análise do território urbano que é a gestão de métricas e indicadores de sustentabilidade, ampliando a capacidade de diagnóstico e intervenção. Foi realizada uma revisão de literatura sobre as interações entre IA e SR e elaborado um diagrama-síntese com as principais aplicações urbanas desta combinação, enfatizando aspectos de sustentabilidade. Como conclusão, destacamos contribuições no diagnóstico de grandes volumes de imagens e desafios na automatização de respostas acríicas sem a devida interpretação.

Palavras-chave. inteligência artificial, morfologia urbana, mudanças climáticas, tecnologias geoespaciais, planejamento urbano sustentável.

Introdução

O uso de imagens de satélite tem se consolidado como uma estratégia eficaz na análise urbana contemporânea. Segundo Wang et al. (2022), o Sensoriamento Remoto (SR) permite uma leitura sinótica das cidades, fornecendo vistas aéreas que possibilitam diversos tipos de análises de morfologia urbana e outros tipos de abordagens em diferentes escalas.

A Inteligência Artificial (IA) aplicada à análise de imagens captadas por satélites como *Landsat* (Nasa), tem ampliado significativamente o potencial das tecnologias geoespaciais no planejamento urbano (Chaturvedi e Vries, 2021). A partir do uso de

algoritmos de Aprendizado de Máquina/*Machine Learning* (ML) é possível extrair métricas relacionadas à textura, espectro e contexto de elementos urbanos, viabilizando classificações detalhadas do uso do solo (Chaturvedi e Vries, 2021). Essa tecnologia vem possibilitando o entendimento da cidade como sistema dinâmico, cujas partes se inter-relacionam de maneira complexa, oferecendo subsídios técnicos valiosos para estudos sobre morfologia urbana e planejamento territorial.

A morfologia urbana configura-se como um campo de estudo voltado à análise da forma física das cidades, entendida como expressão da ação humana sobre o território ao longo do tempo. Essa abordagem implica a articulação

entre elementos materiais do espaço urbano — como edificações, traçados viários, parcelamentos e espaços livres — e processos históricos, sociais e econômicos que os conformam (Costa e Netto, 2015). Segundo as autoras, mais do que o conceito em si de morfologia urbana, são os métodos de análise do tecido urbano, da paisagem e dos padrões construtivos que têm recebido maior destaque na literatura especializada.

Apesar da convergência entre os autores quanto à relevância da forma física das cidades como objeto analítico, Wang et al. (2022) alertam para uma lacuna recorrente nas abordagens morfológicas: a ausência de critérios que integrem de forma sistemática os princípios da sustentabilidade. Segundo os autores, tal omissão compromete a formulação de políticas urbanas mais eficazes e resilientes, ao priorizar atributos estéticos ou funcionais em detrimento de considerações ambientais e sociais. Nesse sentido, propõem uma reformulação conceitual do campo, defendendo a integração explícita da sustentabilidade nas análises morfológicas, em resposta aos desafios contemporâneos, como as mudanças climáticas e a justiça socioespacial.

A necessidade de integrar a sustentabilidade às abordagens morfológicas torna-se ainda mais evidente frente aos alertas globais sobre as mudanças climáticas. Neste cenário, o *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC (2023) alertou para o aumento contínuo das emissões de gases de efeito estufa, principal fator dos eventos climáticos extremos que ameaçam especialmente áreas urbanas — mais vulneráveis a enchentes, secas e ondas de calor (Sang et al., 2024). Esses riscos incluem desastres, perda de biodiversidade, insegurança alimentar e impactos socioeconômicos. A integração entre IA e SR desponta como estratégia promissora para enfrentar mudanças climáticas, contribuindo para o planejamento urbano sustentável e alinhando-se ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas 13 (ODS 13), que trata sobre adotar medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos.

A articulação entre as tecnologias de SR e IA têm potencializado a coleta e análise de dados ambientais em larga escala. Segundo Bibri et

al. (2024), essa combinação favorece o monitoramento contínuo de ecossistemas urbanos e o controle de parâmetros ambientais. A eficiência energética, a gestão de recursos e o planejamento urbano baseado em dados são destacados como benefícios dessas tecnologias, que também contribuem para o fortalecimento da governança em cidades inteligentes.

A integração dos mapas climáticos urbanos ao desenho das cidades, como proposto por Mauree et al. (2019), representa avanço relevante nesse campo. Os autores defendem que tal instrumento, aliado a políticas energéticas baseadas em *big data* e técnicas de aprendizagem automática, pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias adaptativas às mudanças climáticas, além de otimizar a distribuição e o uso de energia renovável em ambientes urbanos.

Este artigo explora o papel dessas tecnologias como alternativas para a ampliação do espectro analítico da morfologia urbana, integrando dimensões relativas ao campo da sustentabilidade como o monitoramento de ilhas de calor, superfícies vegetadas, poluição atmosférica e áreas de risco de desastres. Espera-se que estas dimensões possam ampliar o leque analítico da morfologia urbana e impactar estratégias de planejamento urbano, promovendo assim uma governança climática mais contextualizada (Milojevic-Dupont e Creutzig, 2021).

Fundamentação teórica

Morfologia urbana sustentável

Desde a descrição da forma urbana até sua articulação com processos ambientais e sociais, diversos autores compartilham uma compreensão de que a morfologia urbana constitui uma chave analítica fundamental para a interpretação da cidade como construção histórica, espacial e socialmente complexa. Nesse sentido, autores como Wang et al. (2022) definem a morfologia urbana como um campo de análise da configuração física das cidades, com ênfase nos processos dinâmicos que envolvem formação, deformação, evolução e transição dos componentes estruturais urbanos — tais como lotes, ruas e edificações. De maneira semelhante, Fan et al. (2023) definem morfologia urbana como o conjunto de

características físicas das formas urbanas e sua disposição espacial, abrangendo tanto edifícios quanto paisagem urbana.

Ambos os estudos destacam que a análise morfológica deve considerar não apenas aspectos físicos, mas também processos históricos e socioeconômicos subjacentes às transformações urbanas. Guo et al. (2023) ampliam essa perspectiva ao definir morfologia urbana como o estudo da forma e da estrutura dos espaços urbanos resultantes da interação contínua entre fatores naturais e antrópicos. Suas análises incorporam dimensões estruturais e funcionais da urbanização, desde assentamentos originais até padrões espaciais complexos produzidos por dinâmicas econômicas, sociais e políticas. Adicionalmente, destacam o caráter auto-organizado da expansão urbana, originado da interação entre escalas micro e macro, gerando dinâmicas previsíveis com implicações significativas para o planejamento territorial. Embora os autores não formulem critérios explícitos de sustentabilidade, reconhecem a relevância da forma urbana na funcionalidade das cidades e para a viabilidade de modelos sustentáveis, ao integrar variáveis como dispersão e fragmentação espacial.

Ao analisarem seis categorias de morfologia urbana, tais como configuração dos tecidos urbanos, redes viárias, características topográficas, uso da terra, elementos naturais e crescimento urbano, Fan et al. (2023), e Zhang, Ghosh e Park (2023) destacam que atributos das edificações, como altura, densidade e orientação, influenciam diretamente o comportamento energético da superfície e temperatura do solo. Esses fatores são particularmente relevantes na produção de fenômenos como ilha de calor urbana (UHI) além das variações sazonais da temperatura da superfície terrestre (LST).

Nesse contexto, Zhang, Ghosh e Park (2023) argumentam a favor de uma morfologia urbana sustentável, destacando a promoção da sustentabilidade ambiental, a minimização da degradação ambiental e o incentivo à biodiversidade, além dos benefícios sociais e econômicos. Fan et al. (2023) complementam essa visão ao ressaltar que essa abordagem não só contribui para enfrentar desafios ambientais, mas também melhora as

condições de vida nas cidades e favorece a sustentabilidade a longo prazo.

Inteligência Artificial e Urbanismo

A Inteligência Artificial (IA) vem assumindo papel estratégico no enfrentamento dos desafios urbanos contemporâneos, especialmente no contexto das cidades inteligentes e da crise climática. Sua aplicação em processos de análise, gestão e tomada de decisão permite maior precisão na alocação de recursos, no planejamento urbano e na formulação de políticas públicas. Segundo Yigitcanlar et al. (2020a), a IA aprimora a gestão urbana por meio da automação, do processamento de grandes volumes de dados e do suporte à governança, contribuindo para o fortalecimento da resiliência urbana — entendida como a capacidade das cidades de resistir a impactos e se recuperar rapidamente.

A literatura evidencia que a IA é aplicada em diversos domínios urbanos, como análise preditiva, avaliação de projetos e monitoramento ambiental. Gracias et al. (2023) destacam que essas tecnologias possibilitam o controle de tráfego, gestão energética e segurança pública, alinhando eficiência operacional a metas ambientais. Chen et al. (2022) complementam essa abordagem ao definir a IA como um conjunto de técnicas capazes de aprender com dados, identificar padrões e realizar previsões com mínima intervenção humana. Quando aplicada à gestão ambiental urbana, essa capacidade analítica favorece soluções mais adaptativas para questões complexas, como redução das emissões de carbono, uso racional de energia e monitoramento climático.

Nesse sentido, a IA é considerada uma tecnologia estruturante da transição ecológica urbana. Conforme argumentam Balogun et al. (2021), o uso de algoritmos de ML em modelos espaciais e ambientais viabiliza o monitoramento contínuo da qualidade do ar e permite análises preditivas que sustentam decisões técnicas e institucionais. A partir desses dados, políticas públicas orientadas pela ciência tornam-se mais eficazes e territorialmente sensíveis.

Ao discutir as potencialidades da IA no planejamento urbano, Fallmann e Emeis (2020) propõem uma abordagem holística, integrando variáveis climáticas e ambientais

no desenho da cidade. Os autores defendem que decisões de arquitetura e planejamento devem considerar as dinâmicas atmosféricas urbanas, superando modelos setoriais fragmentados. A integração entre ciência climática, arquitetura e formulação de políticas públicas é vista como essencial para enfrentar os efeitos das mudanças climáticas e construir cidades mais resilientes e sustentáveis.

A base teórica que sustenta o uso da IA no planejamento urbano sustentável está centrada em um modelo de transformação digital, no qual a IA permite a análise integrada de dados urbanos e ambientais. Yigitcanlar et al. (2020b) destacam que o uso combinado da IA com imagens de satélite e tecnologias de SR amplia a capacidade de diagnóstico e intervenção, viabilizando o alinhamento entre práticas urbanísticas e metas de redução dos impactos ambientais. Nesse cenário, a cidade torna-se um sistema inteligente, capaz de otimizar o funcionamento de suas infraestruturas — como energia, transporte e serviços públicos — de modo eficiente e sustentável.

Ademais, o uso de IA no processamento de imagens de satélite, como da série Landsat, tem ampliado o potencial das tecnologias geoespaciais na análise urbana. De acordo com Chaturvedi e Vries (2021), essa aplicação permite a identificação de alterações em zonas climáticas locais (LCZs) em tempo real, o monitoramento de ilhas de calor urbanas e a avaliação das transformações morfológicas do solo urbano. Xu et al. (2022) demonstram que a integração de métodos baseados em SR, melhora a modelagem térmica urbana e oferece subsídios para o planejamento climático das cidades.

Esses avanços são reforçados por Bibri et al. (2024), que destacam a capacidade das tecnologias baseadas em satélites, drones, integradas à IA, para coletar e processar dados ambientais em larga escala. Tais tecnologias constituem meios estratégicos para o monitoramento de ecossistemas urbanos e formulação de políticas públicas responsivas aos impactos das mudanças climáticas. Assim, a IA, em sua articulação com tecnologias geoespaciais e climáticas, consolida-se como elemento central no desenvolvimento de

estratégias de planejamento urbano orientadas à sustentabilidade.

As Informações Geoespaciais

A crescente complexidade dos ambientes urbanos exige estratégias de mapeamento digital cada vez mais precisas, abrangentes e adaptáveis a distintos contextos territoriais. Nesse cenário, o SR consolida-se como tecnologia geoespacial fundamental, ao viabilizar a observação sistemática e em larga escala das áreas urbanizadas por meio de imagens de satélite. A aplicação de tecnologia geoespacial, uma das fontes de dados mais relevantes nos estudos de morfologia urbana (Zhang, Ghosh e Park, 2023), favorece o desenvolvimento de estratégias integradas de mitigação, adaptação e resiliência — e, portanto, para o planejamento sustentável e a gestão das cidades. Sua integração com a IA pode ampliar ainda mais sua importância e aplicação.

Yigitcanlar e Cugurullo (2020) destacam o papel dos dados geoespaciais na geração de representações dinâmicas do território, possibilitando a visualização e análise de transformações socioambientais em diferentes escalas. Esse tipo de abordagem fortalece a capacidade de resposta de políticas urbanas, viabilizando a localização precisa de vulnerabilidades ambientais e a proposição de soluções integradas. A articulação entre mapas digitais e modelos preditivos baseados em IA constitui uma ferramenta estratégica para a sustentabilidade urbana, ao permitir a antecipação de impactos e priorização de intervenções.

Wang et al. (2022) afirmam que embora o SR seja eficaz para detectar e monitorar elementos urbanos em diferentes escalas, os autores apontam que as abordagens quantitativas frequentemente não contribuem para uma compreensão mais profunda da morfologia urbana. Isso ocorre devido ao foco excessivo nos aspectos físicos das imagens, sem considerar seu contexto interpretativo. Além disso, as metodologias atuais do SR apresentam limitações na quantificação precisa dos elementos urbanos básicos e enfrentam desafios como incertezas no mapeamento e falta de medições semanticamente explícitas. Em resumo, os autores defendem que, embora o SR tenha

potencial, sua aplicação no estudo da morfologia urbana necessita de aprimoramento metodológico para gerar insights mais significativos para o planejamento e o design urbanos.

A IA pode auxiliar no diagnóstico sobre mapeamentos digitais geoespaciais de diversas fontes, possibilitando a criação de representações mais detalhadas da cidade, facilitando a análise do crescimento urbano, identificação de áreas vulneráveis e proposição de soluções para mitigar impactos negativos. A capacidade de monitorar essas áreas em tempo real, em alta resolução e complexidade tem potencial de proporcionar uma gestão mais eficiente dos recursos, facilitando a tomada de decisões (Yigitcanlar et al., 2020b).

Hughes e Kennedy (2019) descrevem satélites da linha *Landsat* como uma fonte de dados geoespaciais utilizada para o monitoramento da superfície terrestre e detecção de alterações em padrões de cobertura da terra ao longo do tempo. O *Landsat* 8, em operação desde 2013, fornece imagens com resolução espacial de trinta metros e cobertura global regular, características que o tornam adequado para estudos sobre uso e ocupação do solo, dinâmica da vegetação e mudanças ambientais. No mesmo estudo, os autores mencionam o uso de redes neurais convolucionais profundas (CNNs) para a segmentação automática de imagens do satélite *Landsat* 8 em classes como céu, nuvens, sombras de nuvens, corpos d'água e neve/gelo. Essa segmentação tem como finalidade identificar regiões utilizáveis nas imagens e remover interferências atmosféricas.

Fundamentos Metodológicos

A pesquisa foi fundamentada por uma revisão de literatura, realizada nas bases de dados e repositórios científicos (*Scielo*, *Science Direct* e *Web of Science*) e plataformas de IA como *Consensus*, *Google Scholar*, *Semantic Scholar*. Posteriormente foram utilizadas fontes secundárias no Google, *Chat GPT*, *DeepSeek* para identificação de organizações comerciais e pesquisa que desenvolvem e oferecem serviços nas áreas de SR com o uso de IA. A análise dos resultados respondeu critérios de relevância, profundidade,

adequação e disponibilidade de informações. Nos títulos selecionados foram investigados cinco aspectos: a) especificidades das tecnologias de SR e IA mencionadas pelos autores; b) conceitos principais relativos ao processo de SR; c) tipos de procedimentos podem ser impulsionados com o uso da IA; d) áreas de aplicação urbana e ambiental mencionadas, e; e) potencialidades que o SR e IA podem dar numa perspectiva governamental e política. Após o levantamento das informações e a análise dos aspectos, foi produzido um diagrama-síntese (Figura 1) representativo dos resultados.

Análise dos resultados

Sensoriamento remoto e suas relações com a IA

Os trabalhos analisados evidenciam que o SR, integrado a técnicas de IA e ML, desempenha papel central na formulação de respostas territoriais precisas diante dos desafios urbanos e climáticos. Son et al. (2023) destacam que a análise em tempo real de grandes volumes de dados urbanos, viabilizada por tecnologias como o GeoAI (*Geospatial Artificial Intelligence*), amplia a capacidade de resposta a eventos críticos, desde o planejamento territorial até a gestão de emergências.

Nesse contexto, Milojevic-Dupont e Creutzig (2021) propõem um arcabouço estratégico que combina SR, ML e *big data* espacial para enfrentar a crise climática em áreas urbanas. Eles sugerem que imagens de satélite de alta resolução, processadas por algoritmos de ML, permitem identificar atributos geométricos e funcionais dos assentamentos urbanos, como contornos, alturas e usos das edificações. Destacam também abordagens como a reconstrução tridimensional semântica, que possibilita a modelagem urbana em 3D a partir de imagens aéreas, fornecendo subsídios técnicos para intervenções urbanísticas orientadas à sustentabilidade.

Além disso, o uso de redes bayesianas viabiliza a análise relacional entre dados espaciais e concentrações de CO₂, contribuindo para o mapeamento de padrões de emissão e para formulação de políticas de mitigação fundamentadas em evidências. Métodos de agrupamento auxiliam na tipificação das infraestruturas urbanas,

orientando a escolha de soluções tecnológicas adequadas, como sistemas de aquecimento ou refrigeração, conforme a morfologia urbana. As técnicas de ML profundo são aplicadas

para extrair padrões complexos de dados multiescalares, reforçando o potencial da IA no apoio ao planejamento climático urbano (Milojevic-Dupont e Creutzig, 2021).

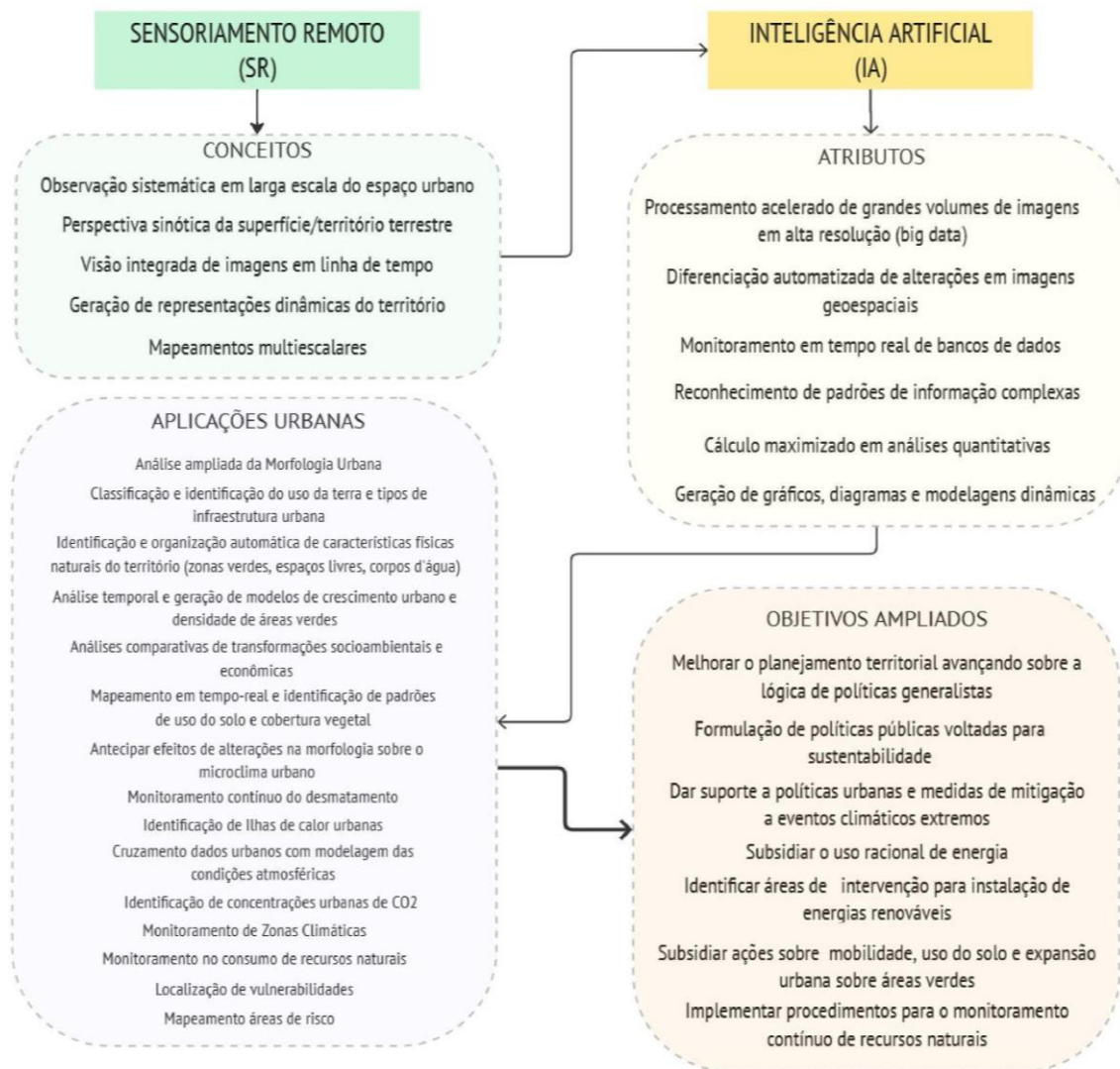


Figura 1. Diagrama-síntese (fonte: elaborada pelos autores)

A arquitetura *Machine Learning for Urban Planning for Low Carbon* (ML-UP), proposta por Milojevic-Dupont e Creutzig (2021), sintetiza esses elementos ao integrar inferência causal e cenarização, possibilitando decisões baseadas em evidências. Eles reforçam a importância de soluções espacialmente explícitas, que superam a lógica das políticas generalistas ao incorporar especificidades territoriais no planejamento urbano.

Outros estudos complementam essa abordagem. Yigitcanlar et al. (2020a) aplicam redes neurais convolucionais para leitura automática de imagens aéreas, permitindo o mapeamento de elementos urbanos e

subsidiando decisões sobre mobilidade, uso do solo e expansão. Balogun et al. (2021), por sua vez, utilizam ML para estimar níveis de poluição atmosférica a partir de dados ambientais e geoespaciais, mesmo em áreas com baixa densidade de sensores, ampliando a capacidade de monitoramento contínuo. A combinação de dados heterogêneos potencializa a observação em escala urbana e regional, fornecendo bases para ações de monitoramento que considerem desigualdades no acesso à informação ambiental e infraestrutura urbana.

Hughes e Kennedy (2019) demonstram que o pré-processamento automatizado de imagens por meio de redes neurais convolucionais

profundas (CNNs) é essencial para lidar com o volume de dados visuais gerados, garantindo continuidade das análises ao classificar e mascarar interferências como nuvens e sombras.

As estratégias de modelagem de Fallmann e Emeis (2020) incluem simulações 3D do microclima urbano, baseadas em *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e no modelo WRF-TEB — uma extensão do *Weather Research and Forecasting* que incorpora parametrizações detalhadas do dossel urbano, permitindo simular com precisão o balanço energético e os efeitos das ilhas de calor. Essas simulações em escala de rua detalham o fluxo de ar e a dispersão de poluentes, possibilitando testar configurações urbanas e materiais antes da implementação, o que contribui para intervenções mais eficientes e alinhadas à mitigação dos impactos climáticos locais. Os modelos ajudam a prever os efeitos da morfologia urbana no microclima e podem ser aprimorados com dados geoespaciais e imagens de satélite, ampliando o diagnóstico e a previsão dos impactos ambientais.

Esses recursos digitais podem integrar sistemas de apoio à decisão baseados em IA, que cruzam dados urbanos com variáveis atmosféricas simuladas para mapear riscos e planejar soluções adaptativas em tempo real. Embora os autores ressaltam a importância da modelagem climática para o planejamento urbano, o uso de modelos numéricos acoplados, como os de mesoescala e os baseados em CFD, possibilita prever e avaliar intervenções urbanas por meio de simulações microclimáticas.

Identificação de padrões de uso do solo e desmatamento com IA

Yigitcanlar et al. (2020a) explicam que redes neurais e técnicas de ML profundo permitem diferenciar estruturas espaciais em imagens visuais captadas de cima, como as obtidas por satélites. Esse processamento automatizado viabiliza o reconhecimento de padrões urbanos complexos e apoia o monitoramento de transformações territoriais. Com isso, a IA fornece subsídios para o entendimento ampliado da morfologia urbana, monitorando a cobertura vegetal e direcionando o planejamento de sistemas de preservação mais

eficientes. Chen et al. (2022) destacam que a IA pode ser empregada em diversas frentes, como previsão climática, planejamento urbano, eficiência energética e gestão de recursos naturais, aproveitando seu potencial de análise de grandes volumes de dados urbanos. Além disso, apontam que algoritmos de IA aplicados a dados de SR possibilitam o monitoramento de desmatamento e detecção de mudanças no uso da terra.

Segundo Chaturvedi e Vries (2021), esses sistemas viabilizam a coleta, processamento e integração de dados espaciais e socioeconômicos, o que favorece a classificação do uso da terra e da água, o mapeamento de mudanças espaciais e a elaboração de modelos de crescimento urbano. Ainda conforme os autores, a aplicação de IA, como, algoritmos de ML, incluindo florestas aleatórias, máquinas de vetor de suporte e redes neurais convolucionais, permite a extração de métricas espaciais relacionadas a textura, espectro e contexto dos elementos analisados, como coberturas vegetais. A análise espacial, ao integrar essas variáveis, possibilita associar padrões de ocupação urbana a fatores demográficos e econômicos, oferecendo subsídios técnicos para decisões no campo do planejamento territorial, por exemplo.

A utilização de IA em conjunto com imagens de satélite amplia a capacidade analítica sobre a morfologia urbana e as dinâmicas ambientais. De acordo com Yigitcanlar e Cugurullo (2020), os sistemas de IA processam grandes volumes de dados geoespaciais, como imagens multitemporais, para identificar padrões de uso e cobertura da terra. O cruzamento entre dados geoespaciais e algoritmos de ML potencializa a construção de diagnósticos territoriais mais precisos e escaláveis, e possibilitam uma leitura mais ampla e sistemática das tipologias construídas e naturais (Wang et al., 2022).

Poluição atmosférica e monitoramento ambiental

A poluição atmosférica, em especial a emissão de partículas inaláveis, constitui fator de risco relevante à saúde pública no contexto urbano. Balogun et al. (2021) destacam o uso da IA como recurso aplicado à detecção e previsão da concentração desses poluentes. O

processamento automatizado de grandes volumes de dados permite a identificação de padrões espaciais e temporais relacionados à poluição do ar. Segundo Sang et al. (2024), as tecnologias de SR têm sido utilizadas para estimar emissões urbanas de CO₂. A combinação entre IA e imagens de satélite, conforme apresentado por Balogun et al. (2021), constitui estratégia voltada ao monitoramento da qualidade do ar. Dados obtidos por sensores atmosféricos orbitais são processados por algoritmos capazes de estimar a concentração de material particulado em diferentes localidades. A aplicação dessa tecnologia permite a análise da distribuição espacial da poluição e a antecipação de variações associadas a fatores meteorológicos ou sazonais. Esse procedimento fornece subsídios técnicos à gestão territorial, contribuindo para a definição de prioridades e intervenções em áreas com maior exposição. Para Milojevic-Dupont e Creutzig (2021) a capacidade de mapear emissões de CO₂ com alta resolução e identificar áreas ideais para energias renováveis posiciona essas tecnologias como instrumentos centrais para a construção de cidades de baixo carbono.

Monitoramento de zonas climáticas e ilhas de calor

O SR tem sido utilizado para analisar fenômenos como a ilha de calor urbana (UHI), como demonstrado por Xu et al. (2022). Ao compararem métodos baseados em RS e GIS na cidade de Guangzhou, China, os autores verificaram que ambos possuem alta capacidade de caracterização do ambiente urbano, com variações de desempenho conforme o contexto espacial analisado. A integração dessas abordagens, segundo os autores, pode aperfeiçoar a modelagem térmica urbana e embasar políticas públicas mais eficazes.

A integração do mapa climático urbano ao desenho das cidades, como proposto por Mauree et al. (2019), representa um avanço relevante nesse campo. Os autores defendem que tal instrumento, aliado a políticas energéticas baseadas em big data e técnicas de aprendizagem automática, pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias adaptativas às mudanças climáticas, além de otimizar a distribuição e o uso de energia renovável em ambientes urbanos.

O estudo de Fan et al. (2023) utiliza dados provenientes da série de satélites Landsat para examinar a relação entre morfologia urbana e temperatura da superfície terrestre (LST). A série *Landsat* é empregada como fonte de SR devido à sua capacidade de fornecer informações espectrais e espaciais sobre a superfície terrestre ao longo do tempo. Nesse contexto, dados do satélite da série Landsat fornecem a base empírica para análise da distribuição térmica urbana em função das características físicas do ambiente construído. Tecnologias de visualização espacial podem auxiliar a criação de mapas climáticos urbanos, conforme discutido por Mauree et al. (2019), para o monitoramento do comportamento das infraestruturas energéticas de geração e distribuição de energia.

Esses mapas devem ser capazes de armazenar, partilhar e redistribuir a energia renovável com o uso de *big data* e técnicas de aprendizagem automática, resultando na melhora da capacidade de previsão e/ou localização de falhas com agilidade. Nesse contexto, destaca-se a importância da otimização dos sistemas energéticos urbanos, considerando suas interações com outras infraestruturas, como transporte, edificações e gestão de resíduos, bem como o potencial dos sistemas distribuídos de energia, que promovem a geração local e a redução da dependência de fontes centralizadas. Assim, ao integrar mapas climáticos ao desenho da cidade, abrem-se oportunidades de desenvolver com maior rapidez estratégias de adaptação.

O diagrama-síntese demonstra inter-relações entre os principais conceitos mencionados na literatura relativos à integração do sensoriamento remoto com a inteligência artificial, suas aplicações e contribuições que podem oferecer para uma gestão urbana sustentável. O quadro de aplicações da combinação entre IA e SR enfatiza aspectos de sustentabilidade tais como identificação de elementos naturais, densidades de área verde, cobertura vegetal, identificação de ilhas de calor, mapeamento de desmatamento, concentrações de CO₂, monitoramento de zonas climáticas. Estes são elementos determinantes para ampliação do espectro analítico da morfologia urbana e consequentemente do seu impacto como

suporte às políticas públicas voltadas para a sustentabilidade.

Conclusões

Contribuições

Segundo as análises de Son et al. (2023), evidencia-se o potencial das tecnologias de IA nas análises complexas realizadas sobre bancos de dados crescentes e em tempo real. Os autores argumentam que a aplicação da IA na análise de *big data* possibilita uma compreensão mais acurada e abrangente por parte dos urbanistas acerca dos múltiplos fatores que influenciam a dinâmica das cidades, e que transcendem o escopo tradicional da morfologia urbana. Conforme Yigitcanlar et al. (2020a), tais ferramentas permitem não apenas o reconhecimento de padrões urbanos complexos e o monitoramento de transformações territoriais, mas análises das condições ambientais, atmosféricas e climáticas, contribuindo para a ampliação do espectro de análise da morfologia urbana. A análise automatizada de dados, segundo Gracias et al. (2023), também favorece a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos das mudanças climáticas, com maior velocidade e precisão, especialmente em áreas vulneráveis.

A articulação entre diferentes plataformas computacionais, como *CitySim*, *City Energy Analyst* (CEA) e o Modelo de Interface de Dossel (CIM), conforme discutido por Mauree et al. (2019), evidencia a relevância da coleta integrada de dados geoespaciais para análises urbanas avançadas. Para os autores, a integração de dados e modelos espaciais prepara o terreno para aplicação futura de técnicas de ML em análises preditivas e na formulação de políticas públicas sustentáveis.

Ainda no contexto climático, Fallmann e Emeis (2020) ressaltam a importância da modelagem computacional para prever os efeitos das transformações morfológicas no microclima urbano. Os autores indicam que tais modelos podem ser aprimorados com dados geoespaciais oriundos de SR, aumentando a capacidade de diagnóstico climático. Por fim, tecnologias baseadas em IA têm se mostrado promissoras na diferenciação automatizada de estruturas espaciais em imagens de satélite.

Limitações

A literatura revisada revela um consenso crítico sobre as limitações associadas à aplicação da IA no SR e no planejamento urbano. Embora os avanços técnicos decorrentes do uso de algoritmos de ML tenham ampliado a capacidade de detecção e classificação de formas urbanas (Wang et al., 2022), autores alertam para riscos de abstração excessiva e desconexão entre dados produzidos e a realidade morfológica das cidades. Representações automatizadas podem obscurecer significados espaciais e comprometer a interpretação urbanística, especialmente quando não são acompanhadas de medições semanticamente explícitas ou de uma leitura crítica do território (Wang et al., 2022; Sang et al., 2024).

Nesse sentido, diversos estudos reforçam a ideia de que a IA deve ser compreendida como ferramenta complementar, e não como substituta de abordagens analíticas contextuais. Wang et al. (2022) defendem que a eficácia da IA depende de sua inserção em fluxos de trabalho que integrem métodos tradicionais e interpretação contextual, permitindo uma compreensão mais completa das implicações socioespaciais das formas urbanas. De forma convergente, Fallmann e Emeis (2020) argumentam que modelos computacionais e simulações devem servir como suporte técnico dentro de estratégias interdisciplinares, alertando para o risco de adoção acrítica de soluções tecnológicas descontextualizadas.

No mesmo eixo de análise, autores como Balogun et al. (2021) e Yigitcanlar e Cugurullo (2020) destacam os riscos associados ao tecnodeterminismo. A centralização decisória em modelos automatizados pode negligenciar variáveis estruturais como desigualdades territoriais e exclusões sociais. Para esses autores, o uso responsável da IA exige articulação com processos decisórios participativos e uma governança urbana democrática e transparente, capaz de mediar os impactos sociais e éticos das tecnologias digitais (Chen et al., 2022; Yigitcanlar et al., 2020a; Yigitcanlar et al., 2020b). A tecnologia, nesses termos, deve ser concebida como meio de ampliação da capacidade de decisão — e não

como elemento autônomo de transformação urbana.

Soma-se a isso a crítica à superficialidade de certas abordagens políticas contemporâneas, como observado por Sang et al. (2024), que destacam o foco excessivo nos impactos de curto prazo das políticas de baixo carbono, com escassa consideração dos efeitos distributivos e de longo prazo. Tais limitações reforçam a necessidade de avaliação mais equitativa e crítica das políticas urbanas baseadas em soluções tecnológicas.

Em conjunto, as evidências analisadas indicam que o protagonismo da IA no planejamento urbano deve ser mediado por critérios interpretativos, participativos e interdisciplinares. O enfrentamento dos desafios urbanos contemporâneos requer não apenas inovação tecnológica, mas também sensibilidade social, responsabilidade política e integração epistemológica. A IA, embora dotada de grande potencial, não substitui o olhar crítico necessário para uma urbanização justa, sustentável e sensível à complexidade dos territórios.

Referências

- Balogun, A. L., Tella, A., Baloo, L. e Adebisi, N. (2021) "A review of the inter-correlation of climate change, air pollution and urban sustainability using novel machine learning algorithms and spatial information science", *Urban Climate* 40, 100989.
- Bibri, S. E., Krogstie, J., Kaboli, A. e Alahi, A. (2024). "Smarter eco-cities and their leading-edge artificial intelligence of things solutions for environmental sustainability: A comprehensive systematic review", *Environmental Science and Ecotechnology*, 19, 100330. <https://doi.org/10.1016/j.esec.2023.100330>
- Chaturvedi, V. e de Vries, W. T. (2021) "Machine learning algorithms for urban land use planning: a review", *Urban Science* 5(3), 68. <https://doi.org/10.3390/urbansci5030068>
- Chen, P., Gao, J., Ji, Z., Liang, H., e Peng, Y. (2022). "Do Artificial Intelligence Applications Affect Carbon Emission Performance?—Evidence from Panel Data Analysis of Chinese Cities", *Energies*, 15(15), 5730. <https://doi.org/10.3390/en15155730>
- Costa, S. D. A. P. e Netto, M. M. G. (2015) *Fundamentos de morfologia urbana* (C/Arte, Belo Horizonte).
- Fallmann, J. e Emeis, S. (2020) "How to bring urban and global climate studies together with urban planning and architecture?", *Developments in the Built Environment* 4, 100023. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100023>
- Fan, J., Chen, X., Xie, S. e Zhang, Y. (2023) "Study on the response of the summer land surface temperature to urban morphology in Urumqi, China", *Sustainability* 15, 15255. <https://doi.org/10.3390/su152115255>
- Gracias, J. S., Parnell, G. S., Specking, E., Pohl, E. A. e Buchanan, R. (2023) "Smart Cities—A Structured Literature Review", *Smart Cities* 6(4), 1719–1743. <https://doi.org/10.3390/smartcities6040080>
- Guo, Y., Jiao, L., Yang, X., Li, J. e Xu, G. (2023) "Simulating urban growth by coupling macro-processes and micro-dynamics: a case study on Wuhan, China", *GIScience & Remote Sensing* 60(1), 2264582. <https://doi.org/10.1080/15481603.2023.2264582>
- Hughes, M. J. e Kennedy, R. E. (2019) "High-quality cloud masking of Landsat 8 imagery using convolutional neural networks", *Remote Sensing* 11(21), 2591. <https://doi.org/10.3390/rs11212591>
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) "Summary for Policymakers", em Core Writing Team, Lee, H. e Romero, J. (eds.). *Anais do Relatório de Síntese da Sexta Avaliação do IPCC – Climate Change 2023: Synthesis Report*, 1–34. IPCC, Genebra, Suíça. https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/download/s/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- Mauree, D., Naboni, E., Cocco, S., Perera, A. T. D., Nik, V. M. e Scartezzini, J.-L. (2019). A review of assessment methods for the urban environment and its energy sustainability to guarantee climate adaptation of future cities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 733–746. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.005>
- Milojjevic-Dupont, N. e Creutzig, F. (2021) "Machine learning for geographically differentiated climate change mitigation in

- urban areas", *Sustainable Cities and Society* 64, 102526. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102526>
- Sang, M., He, H., Shen, L., e Xu, X. (2024). "Research evolution on low-carbon city measure study: A bibliometric analysis", *Environmental Impact Assessment Review*, 106, 107526. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2024.107526>
- Son, T. H., Weedon, Z., Yigitcanlar, T., Sanchez, T., Corchado, J. M. e Mehmood, R. (2023). "Algorithmic urban planning for smart and sustainable development: Systematic review of the literature", *Sustainable Cities and Society*, 94, 104562. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104562>
- Wang, J., Georganos, S., Kuffer, M., Abascal, A. e Vanhuyse, S. (2022) "On the knowledge gain of urban morphology from space", *Environmental Modelling & Software* 153, 105395. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101831>
- Xu, X., Qiu, W., Li, W., Huang, D., Li, X., & Yang, S. (2022). "Comparing satellite image and GIS data classified local climate zones to assess urban heat island: A case study of Guangzhou", *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1029445. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1029445>
- Yigitcanlar, T. e Cugurullo, F. (2020) "The sustainability of artificial intelligence: an urbanistic viewpoint from the lens of smart and sustainable cities", *Sustainability* 12(20), 8548–8572. <https://doi.org/10.3390/su12208548>
- Yigitcanlar, T., Desouza, K., Butler, L., e Roozkhosh, F. (2020a). "Contributions and Risks of Artificial Intelligence (AI) in Building Smarter Cities: Insights from a Systematic Review of Literature", *Energies*, 13(6), 1473. <https://doi.org/10.3390/en13061473>
- Yigitcanlar, T., Kankanamge, N., Regona, M., Ruiz Maldonado, A., Rowan, B., Ryu, A., Desouza, K. C., Corchado, J. M., Mehmood, R. e Li, R. Y. M. (2020b). "Artificial Intelligence Technologies and Related Urban Planning and Development Concepts: How Are They Perceived and Utilized in Australia?", *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 6(4), 187. <https://doi.org/10.3390/joitmc6040187>
- Zhang, P., Ghosh, D. e Park, S. (2023) "Spatial measures and methods in sustainable urban morphology: A systematic review", *Landscape and Urban Planning* 237, 104776. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104776>

Tradução do título, resumo e palavras-chave

Climate crisis and Artificial Intelligence (AI): challenges and solutions for a sustainable future

Abstract. The global climate crisis has brought numerous challenges to contemporary urban planning, requiring new approaches aimed at understanding its causes and effects in cities. The use of geospatial information is an important strategy for mapping and interpreting the territory that has been boosted with the use of artificial intelligence (AI). The objective of this work is to demonstrate how AI has been implemented to improve the generation and interpretation of images generated by remote sensing (SR). The use of AI has great potential to contribute to fill a gap in the methods of analysis of urban territory that is the management of metrics and sustainability indicators, expanding the capacity for diagnosis and intervention. A literature review was conducted on the interaction between IA and SR, and a synthesis diagram was created that emphasizes sustainability aspects for the main urban applications of this combination. As a conclusion, we highlight contributions to the diagnosis of large volumes of images and challenges in the automation of uncritical responses without proper interpretation

Keywords: artificial intelligence, urban morphology, climate change, geospatial technology, sustainable urban planning

Editor responsável pela submissão: Lais Bertolino e Ana Mélice Dias.

Licenciado sob uma licença Creative Commons.

