

Revisão Sistemática de Literatura: Monitoramento de Arvoredo Urbano com Internet das Coisas

Systematic Literature Review: Urban Tree Monitoring with Internet of Things

Elias Emanuel Carvalho Lopes¹
Messias Assunção Santos do Nascimento²
Allan Calebe Batista de Carvalho³
Renildo Viana Azevedo⁴

Resumo

Este trabalho apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o monitoramento de arvoredo urbano com Internet das Coisas. Busca-se identificar a evolução das tecnologias para monitorar árvores e florestas, as principais técnicas utilizadas na análise e conservação da saúde arbórea urbana com uso da tecnologia IoT para auxiliar nesse monitoramento. A metodologia emprega a análise de conteúdo sobre monitoramento de árvores e sistemas de IoT em cidades inteligentes, utilizando como pesquisa estudos nacionais encontrados nas bases de dados Capes, Google Acadêmico e estudos internacionais na base Scopus. A revisão revela uma lacuna de pesquisas na aplicação de tecnologias IoT para o monitoramento de árvores urbanas, especialmente em relação ao risco de queda e em contextos do hemisfério sul. Constata-se uma falta de incentivos no hemisfério sul para com o tema, principalmente na colaboração sociedade com o poder público. O estudo conclui que há um potencial significativo para a integração da IoT na gestão proativa da arborização urbana aliando-se com outras tecnologias emergentes como Inteligência Artificial e Big Data, impulsionando a tomada de decisões baseadas em dados e contribuindo para cidades mais resilientes e inteligentes.

Palavras-chave: Revisão de literatura. Monitoramento de árvores. Internet das Coisas. Arborização urbana. Cidades Inteligentes.

1 INTRODUÇÃO

A crescente urbanização e o inegável impacto das atividades humanas no meio ambiente impõem desafios complexos e sem precedentes às cidades modernas. Com uma parcela significativa da população mundial concentrada em centros urbanos, questões como a gestão de resíduos, consumo energético, poluição do ar e da água, e a pressão sobre os recursos naturais tornam-se críticas para a qualidade de vida e a sustentabilidade do planeta (Nunes et al., 2024). Nesse cenário, emerge com vital importância o conceito de **cidades inteligentes e sustentáveis**, representando uma abordagem inovadora e essencial para promover a harmonia entre o desenvolvimento urbano e a preservação ambiental (Dos Santos et al., 2024).

Uma cidade inteligente é definida pela aplicação estratégica de tecnologias digitais e de informação, como a Internet das Coisas (IoT), *big data*, inteligência artificial (IA) e redes de sensores, para coletar e analisar dados em tempo real (Nunes et al., 2024; Dos Santos et al.,

2024). Essa capacidade de processamento de informações permite otimizar a eficiência dos serviços urbanos, incluindo transporte, energia, água e segurança, e possibilita uma gestão proativa e responsiva aos problemas emergentes (Nunes et al., 2024). Por outro lado, a sustentabilidade nas cidades foca na utilização de recursos de maneira a minimizar impactos ambientais, promover a justiça social e garantir a qualidade de vida para as gerações futuras, sendo um princípio central que orienta a criação e operação desses ambientes urbanos (Nunes et al., 2024; Dos Santos et al., 2024).

A relevância das cidades inteligentes reside na sua capacidade de enfrentar diretamente os desafios urbanos e ambientais contemporâneos. A integração de tecnologias avançadas não apenas melhora a eficiência e a agilidade dos serviços municipais, mas também desempenha um papel crucial na mitigação dos impactos ambientais (Nunes et al., 2024). Isso se traduz em benefícios como a redução de congestionamentos e da poluição através de sistemas de gerenciamento de tráfego inteligentes, a otimização do uso de recursos hídricos com a detecção rápida de vazamentos, e a promoção de ambientes urbanos mais limpos e eficientes por meio de sistemas de energia inteligente e construção sustentável (Nunes et al., 2024; Dos Santos et al., 2024). Além disso, a visão de cidades inteligentes e sustentáveis não se restringe à infraestrutura tecnológica; ela se estende ao empoderamento cidadão, transformando cidades em ambientes mais adaptáveis, resilientes e saudáveis para seus habitantes (Nitoslawski et al., 2019; Dos Santos et al., 2024). A evolução para cidades que não só respondem às demandas, mas que também aprendem e se adaptam, as chamadas "cidades cognitivas", reforça a necessidade de integrar de forma inteligente e contínua as inovações tecnológicas para um futuro urbano mais equilibrado e resiliente (Giuriatti et al., 2024).

Dentro da dimensão ambiental das cidades inteligentes e sustentáveis, a arborização urbana assume um papel de protagonismo inquestionável. As árvores e florestas urbanas não são apenas elementos paisagísticos, mas sim infraestruturas verdes vitais que proporcionam uma vasta gama de benefícios ecológicos, sociais e econômicos, essenciais para a resiliência e habitabilidade urbana (Nitoslawski et al., 2019). Elas contribuem para a mitigação do calor, economia de energia, proteção contra a poluição do ar, sequestro de carbono, gerenciamento de águas pluviais, e oferecem espaços de suporte público e social (Nitoslawski et al., 2019). Dada a sua importância, a gestão eficiente desses elementos é um componente crítico da gestão ambiental urbana, influenciando diretamente a sustentabilidade e resiliência das cidades (Nitoslawski et al., 2019; Nunes et al., 2024).

Historicamente, a gestão da arborização urbana tem enfrentado desafios consideráveis, muitas vezes caracterizada pela falta de recursos, informações insuficientes ou impraticáveis sobre a infraestrutura verde existente, e a deterioração de ativos (Nitoslawski et al., 2019). A avaliação da saúde e estabilidade das árvores é frequentemente realizada de forma subjetiva, por meio de inspeções visuais, o que pode resultar em julgamentos inconsistentes e na ausência de um diagnóstico proativo para prevenir riscos. Essa lacuna na gestão, aliada a fatores como a rápida urbanização e a crescente incidência de eventos climáticos extremos, eleva significativamente o risco de rupturas e quedas de árvores, com potenciais consequências graves para a segurança de pessoas, propriedades e infraestruturas urbanas (Nitoslawski et al., 2019). Tais ocorrências não apenas geram perdas humanas e materiais, mas também podem paralisar serviços essenciais, destacando a urgência por ferramentas preditivas e corretivas.

Nesse contexto, a integração de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) e, em particular, da Internet das Coisas (IoT), emerge como uma solução transformadora para a gestão da arborização urbana. O paradigma da IoT permite a interconexão de objetos do cotidiano – incluindo as árvores – com a rede, possibilitando a coleta e o compartilhamento autônomo de dados em tempo real (Nunes et al., 2024; Nitoslawski et al., 2019). Isso viabiliza o desenvolvimento de sistemas de monitoramento proativos e orientados por dados, capazes de fornecer informações cruciais para a tomada de decisão (Nitoslawski et al., 2019). As aplicações envolvem o uso de diversos tipos de sensores, como aqueles que coletam dados de umidade do solo em tempo real, ou microchips RFID para coleta e armazenamento de informações sobre patologia de plantas e biomonitoramento (Nitoslawski et al., 2019; Luvisi et al., 2012; Luvisi & Lorenzini, 2014). Esses dados, uma vez coletados, podem ser centralizados em plataformas de nuvem, que, por sua vez, oferecem recursos para análise, visualização por meio de *dashboards* e até mesmo o envio de alertas automáticos em caso de detecção de condições de risco (Nitoslawski et al., 2019).

A visão de uma "silvicultura urbana inteligente" impulsionada pela IoT e por sistemas de informação geográfica (SIG) representa um avanço significativo. Ela transcende a gestão reativa para um modelo preditivo e participativo, onde aplicativos móveis permitem o engajamento cidadão no fornecimento de informações e requisições de serviço, enquanto gestores utilizam dados precisos para otimizar o planejamento de plantio, poda e remoção de árvores (Nitoslawski et al., 2019). Essa abordagem tecnológica não só aprimora a eficiência operacional e reduz custos, mas também fortalece a correlação entre as tecnologias

habilitadoras e a dimensão ambiental das cidades inteligentes, promovendo uma arborização urbana mais saudável, segura e sustentável para as futuras gerações.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

Esta seção tem como objetivo fundamental o levantamento e a análise do que já foi publicado sobre o monitoramento de arvoredo urbano no contexto da Internet das Coisas (IoT), com o propósito de estabelecer um quadro teórico e conceitual que sustente a presente pesquisa. Serão abordados o estado da arte e o estado da técnica, bem como as lacunas de pesquisa identificadas na literatura.

2.1 A Arborização Urbana: Fundamentos e Desafios no Cenário Contemporâneo

O fenômeno da urbanização global, caracterizado pela crescente concentração populacional em áreas urbanas, projeta que até 2050, 70% da população mundial residirá em cidades (Trindade, 2022). Esse cenário impõe desafios ambientais e sociais complexos, tornando a gestão eficaz do ambiente urbano um imperativo para a sustentabilidade e a qualidade de vida. Nesse contexto, a arborização urbana transcende sua função meramente estética, consolidando-se como um pilar essencial da infraestrutura verde das cidades, capaz de proporcionar múltiplos e vitais serviços ecossistêmicos (Buckeridge, 2015; Ferreira da Silva et al., 2019; Trindade, 2022).

Os estudos analisados convergem ao detalhar os inúmeros benefícios das árvores urbanas. Buckeridge (2015), por exemplo, enfatiza a capacidade das árvores em promover o conforto térmico, ao cortar a incidência solar em mais de 90% e, por meio da evapotranspiração, liberar para a atmosfera uma grande quantidade de vapor de água. O autor ilustra esse ponto ao mencionar que uma única árvore de grande porte pode transpirar cerca de 400 litros de água por dia, totalizando aproximadamente 150 mil litros anuais. Ferreira da Silva et al. (2019) corroboram, explicando que esse fenômeno contribui para a formação de um "rio aéreo", que influencia diretamente o ciclo hidrológico local. Além do conforto térmico, as árvores desempenham um papel crucial na melhoria da qualidade do ar. Conforme Buckeridge (2015), elas atuam como filtros naturais, absorvendo gases poluentes como o dióxido de carbono (CO₂) e material particulado (MP). Faria (2023) aprofunda, destacando que essa absorção e a filtragem de poluentes contribuem significativamente para a saúde

humana, com o autor referenciando estudos que indicam a prevenção de mortes prematuras e a redução de sintomas respiratórios agudos devido à atuação das árvores. Ferreira da Silva et al. (2019) complementam que as árvores também auxiliam na absorção de ruídos, na regularização do ciclo hidrológico – reduzindo o escoamento superficial da água da chuva e, consequentemente, os impactos de enchentes – e na conservação do solo e da biodiversidade. Os benefícios não se restringem ao ambiente físico; Ferreira da Silva et al. (2019) apontam que a presença de áreas verdes e árvores está associada à redução do estresse e da depressão, além de estimular atividades físicas e interações sociais, o que resulta em uma percepção aprimorada de bem-estar.

No entanto, a gestão da arborização em ambientes urbanos complexos apresenta desafios significativos, muitas vezes decorrentes da própria expansão urbana. Buckeridge (2015) e Ferreira da Silva et al. (2019) explicitam que o crescimento desordenado das cidades historicamente levou à substituição da paisagem natural por superfícies construídas, resultando em uma distribuição heterogênea das áreas verdes. O caso de São Paulo é um exemplo disso, onde Buckeridge (2015) observa uma acentuada variação no Índice de Cobertura Vegetal (ICV) entre diferentes regiões, com carências notórias em zonas densamente povoadas. Ferreira da Silva et al. (2019) complementam que essa desigualdade reflete problemas de planejamento e a ausência de uma "visão de estado" para as políticas de arborização. A manutenção inadequada também é uma preocupação. Segundo Buckeridge (2015), podas drásticas, frequentemente realizadas para evitar conflitos com a infraestrutura "cinza" (como a fiação elétrica), podem comprometer o equilíbrio e a longevidade das árvores, acelerando seu envelhecimento e diminuindo seu potencial de prestação de serviços ecossistêmicos. Um dos impactos mais críticos dessa manutenção deficiente, ou da simples ação natural, é a ruptura ou queda de árvores. Faria (2023) e Ferreira da Silva et al. (2019) concordam que esse fenômeno, exacerbado por fortes ventos e tempestades – eventos cuja intensidade tem sido observada como crescente em função das mudanças climáticas –, acarreta prejuízos econômicos e ambientais substanciais, além de riscos diretos à vida humana e à propriedade. Essa problemática reforça a urgência na valorização e gestão eficiente das áreas verdes urbanas.

2.2 Cidades Inteligentes e Sustentáveis como Paradigma para a Gestão Ambiental Urbana

Para abordar os desafios multifacetados do ambiente urbano contemporâneo, o conceito de Cidades Inteligentes e Sustentáveis (CIS) emergiu como um paradigma estratégico. Trindade (2022) define as CIS como ambientes urbanos que integram avançadas tecnologias da informação e comunicação (TIC) com o propósito de oferecer serviços inovadores, impulsionar o crescimento sustentável e, consequentemente, elevar a qualidade de vida de seus habitantes. A dimensão ambiental, segundo Trindade (2022) e Ferreira da Silva et al. (2019), é um componente intrínseco e vital para as CIS, pois a verdadeira sustentabilidade de uma cidade implica na não ultrapassagem dos limites ecológicos e planetários.

Nesse contexto, as TICs, e em particular a Internet das Coisas (IoT), são reconhecidas como elementos habilitadores cruciais para a concretização do ideal das CIS. Trindade (2022) detalha que a IoT, caracterizada pela interconexão ubíqua de objetos físicos e virtuais, permite a coleta massiva de dados por meio de sensores, o armazenamento e processamento dessas informações em ambientes de nuvem, e a análise em tempo real. Faria (2023) complementa que essa capacidade de coleta e processamento de dados é fundamental para subsidiar a tomada de decisões no ambiente urbano, otimizando a gestão de diversos elementos, que vão desde a mobilidade e o consumo de energia até a gestão de resíduos e, primordialmente, a gestão ambiental.

2.3 Monitoramento de Arvoredo Urbano com IoT: Estado da Técnica e Lacunas de Pesquisa

A integração de tecnologias avançadas, como a IoT, na gestão da arborização urbana representa uma evolução substancial em relação aos métodos tradicionalmente empregados. Faria (2023) e Trindade (2022) enfatizam que, historicamente, a avaliação da saúde e estabilidade das árvores dependia de inspeções visuais subjetivas, o que frequentemente resultava em diagnósticos inconsistentes e avaliações de risco imprecisas. A emergência de um "estado da técnica" mais sofisticado, no entanto, introduziu métodos objetivos e instrumentados.

No que tange às técnicas empregadas, Faria (2023) descreve a utilização do *pulling test* como um método para avaliar a estabilidade de árvores, através da aplicação controlada de cargas e do monitoramento da resposta mecânica do espécime. O autor detalha a instrumentação fundamental para esse tipo de análise e para o monitoramento contínuo:

Acelerômetros triaxiais: Conforme Faria (2023), são empregados para mensurar a vibração, inclinação e deslocamento do tronco e dos galhos, fornecendo dados dinâmicos sobre a resposta da árvore às forças externas, como o vento.

Extensômetros (strain gauges): Faria (2023) explica que esses sensores medem a deformação mecânica das fibras da madeira e das raízes, indicando os níveis de estresse.

Anemômetros e anemoscópios: Segundo Faria (2023), são cruciais para a coleta de dados precisos sobre a velocidade e direção do vento, variáveis determinantes para a compreensão da carga e do comportamento aerodinâmico da árvore.

Data loggers: Faria (2023) aponta que esses dispositivos são essenciais para a coleta e armazenamento local dos dados gerados pelos sensores, com o registro de *timestamps* para assegurar a rastreabilidade temporal das informações e permitir análises subsequentes.

A transição para o paradigma da IoT eleva exponencialmente essas capacidades de monitoramento. Faria (2023) propõe um Sistema de Monitoramento de Árvores (SMA) baseado em IoT, que integra sensores – como o MPU 9250 para medição de aceleração – a microcontroladores (por exemplo, ESP32) e utiliza tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, como o LoRa/LoRaWAN. Conforme o autor, os dados coletados em campo são transmitidos para plataformas em nuvem, mencionando especificamente TagoIO, Mosquitto ou InterSCity, onde são armazenados, processados e analisados em tempo real. Essa arquitetura permite a geração de alertas automáticos, como aqueles que sinalizam a possibilidade de ruptura ou queda da árvore com base em variações anormais na aceleração, ou que indicam a perda de comunicação com o dispositivo, conforme o detalhado em Faria (2023). Além de uma gestão preditiva da saúde das árvores, Trindade (2022) explica que a IoT facilita o gerenciamento de inventários arbóreos e o registro de atividades de manutenção. Trindade (2022) também destaca como a integração de aplicativos móveis e sistemas de informação pode catalisar o engajamento cidadão, permitindo que a população relate ocorrências e solicite serviços, aproximando, assim, a gestão pública dos cidadãos e fomentando a participação.

Apesar do inegável potencial e dos avanços no estado da técnica, a literatura atual ainda revela lacunas significativas na interseção entre Cidades Inteligentes e Sustentáveis, IoT e a gestão da arborização urbana. A revisão de Faria (2023) é particularmente reveladora ao apontar que, embora a IoT seja amplamente explorada em outras aplicações urbanas – como a

gestão de resíduos, controle de iluminação ou monitoramento da qualidade do ar –, sua utilização específica como ferramenta preventiva ou corretiva para os impactos de ventos e tempestades em árvores urbanas ainda é incipiente. Faria (2023) também identifica um predomínio de estudos sobre queda de árvores em florestas cultivadas e uma clara concentração geográfica no hemisfério norte, resultando em uma notável carência de pesquisas focadas no arvoredo urbano e nas espécies características do hemisfério sul. Trindade (2022) corrobora essas observações, enfatizando que a correlação entre CIS e as práticas de arborização urbana permanece insuficientemente explorada na literatura, sobretudo sob a perspectiva da aplicação das TICs. Essas lacunas não apenas justificam a relevância da presente pesquisa, mas também sublinham a urgência de novos estudos que aprofundem o entendimento e a aplicação da IoT na gestão da arborização urbana, visando a construção de ambientes urbanos mais seguros, resilientes e, de fato, inteligentes e sustentáveis.

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como uma revisão sistemática. Conforme Galvão & Pereira (2014), uma revisão sistemática é um tipo de investigação, abrangente e não tendenciosa, com foco em uma questão bem definida e que tem por objetivo identificar, selecionar, avaliar e sintetizar as evidências relevantes disponíveis.

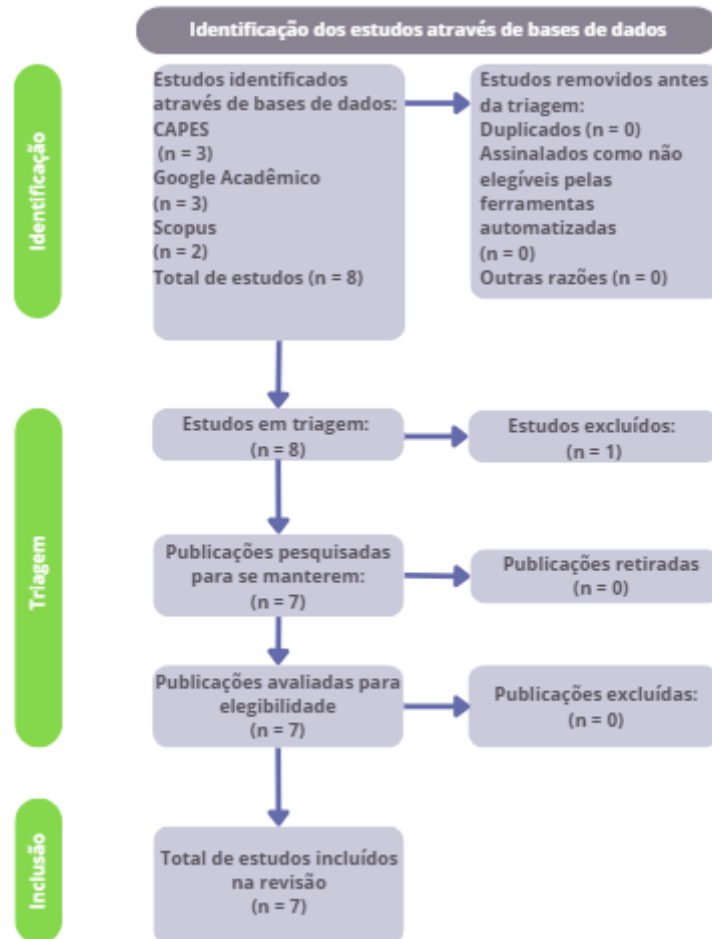
Os critérios desse tipo de estudo são difundidos de modo a permitir a repetição do procedimento por outros pesquisadores. Também são caracterizadas como um estudo secundário, uma vez que possuem fontes de dados de outros estudos, sendo estes os primários, que são artigos científicos que relatam resultados de pesquisa em primeira mão.

Métodos para elaboração de revisões sistemáticas preveem a elaboração da pergunta de pesquisa; busca na literatura; seleção dos artigos; extração dos artigos; avaliação da qualidade metodológica; síntese dos dados (metanálise); avaliação da qualidade das evidências; e a redação e publicação dos resultados.

Portanto, com finalidade de possibilitar a reprodutibilidade e conceder confiabilidade no estudo, optou-se por adotar-se a recomendação PRISMA (Principais Itens para Relatar Revisões sistemáticas e Meta-análise). De acordo com Galvão & Pansani (2015), esse protocolo consiste em um checklist de 27 itens e um fluxograma, e seu foco está em ensaios clínicos randomizados, porém isso não é um item obrigatório, estático, podendo ser utilizado em relatos de revisões sistemáticas de outros tipos de pesquisa, como avaliações de intervenções e avaliações críticas de revisões sistemáticas publicadas. Faz-se necessário

enfatizar que o checklist PRISMA não é um instrumento de avaliação de qualidade de revisões sistemáticas. A figura 1 apresenta o fluxograma do presente estudo.

Figura 1: Fluxograma da revisão baseada na recomendação PRISMA.



Fonte: Elaboração própria, adaptado de Santos & Cortese, 2022.

De forma a abranger a proposta da revisão, foi utilizada uma sequência de termos com relação ao presente estudo, com pequenas alterações entre as buscas realizadas em cada base de dados. Os idiomas e as bases de dados para pesquisa foram definidos de forma prévia, sendo o inglês e português escolhidos de forma a facilitar a compreensão da revisão, uma vez que o inglês é um idioma universal e o português o idioma em que este estudo está redigido.

Durante a fase de identificação (Tabela 1), foram selecionados estudos das bases de dados Capes, Google Acadêmico (nacionais) e Scopus (internacional), o critério inicial para se considerar um estudo como passível de contagem como retorno foi o do título possuir alguma relação direta com as palavras-chaves, coerência e coesão, ou seja, a ocorrência das palavras utilizadas no estudo não indica relação se não houver o mínimo de sentido para com o tema. Na seleção, foram utilizadas combinações de palavras-chaves, na base de dados da

Capes utilizou-se a seguinte combinação: IoT and Meio Ambiente and Monitoramento and Cidades inteligentes and Urbano. Com essa busca, retornou-se um total de três estudos.

Na pesquisa na base de dados Google Acadêmico foi utilizada a seguinte combinação de palavras-chaves: IoT and Ambiente and Monitoramento and Árvores and Cidades inteligentes. Um total de três estudos foi obtido com essa pesquisa inicial.

Por fim, na base de dados internacional Scopus, a combinação de palavras utilizada foi: Iot and Urban Trees and Sensor and Smart Cities. O total retornado foi de dois artigos, sendo um deles sobre RFID aplicado para monitoramento verde e o outro de revisão sobre ecossistemas inteligentes para cidades inteligentes, revisando tecnologias emergentes com pontos sobre florestas urbanas. Sendo assim, a quantidade total inicial de estudos obtidos que condizem com o tema foi de oito estudos.

Tabela 1: Busca nas bases de dados.

Base de dados	Palavras-Chaves	Retorno
Capes	IoT and Meio Ambiente and Monitoramento and Cidades inteligentes and Urbano	3
Google Acadêmico	IoT and Ambiente and Monitoramento and Árvores and Cidades inteligentes	3
Scopus	lot and Urban Trees and Sensor and Smart Cities	2

Fonte: Elaboração própria

Em sequência, na fase de triagem, os estudos selecionados foram revisados utilizando seus títulos e resumos e excluídos caso não abordassem o tema, bem como não tivessem informação suficiente, após essa pré-leitura, os estudos foram lidos integralmente e classificados para inclusão/exclusão conforme critérios de elegibilidade definidos na Tabela 2.

Tabela 2: Critérios de elegibilidade.

Tipo	Critério	Justificativa	Código
Exclusão	Critério de Busca	O idioma não é inglês nem português	CB
	Acesso Indisponível	Texto completo não está disponível para acesso	AI
	Não Relacionado	Os termos não utilizados não possuem coerência e coesão com o assunto	NR
	Vagamente Relacionado	Os termos são utilizados somente nas palavras-chaves, referências, utilizados em alguns exemplos ao longo do texto	VR
Inclusão	Parcialmente Relacionado	A relação Monitoramento de Árvores x Internet das Coisas é apenas um dos pontos tratados	PR1
		A relação Planejamento Urbano x Risco de queda de árvores é apenas um dos pontos tratados	PR2
		O texto trata da importância do planejamento da arborização urbana	PR3
	Diretamente Relacionado	A relação Monitoramento de Árvores x Internet das Coisas x Cidades inteligentes x Meio Ambiente x Planejamento Urbano x Risco de Queda de Árvores é satisfeita de forma íntegra, ou seja, essa relação é o ponto principal do texto	DR1
		O estudo trata dos termos de forma direta, possuindo coerência e coesão, bem como recorrência ampla das palavras ao longo da leitura	DR2

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Santos & Cortese, 2022.

A análise dos estudos permitiu classificar um total de sete estudos em duas categorias principais, conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Classificação dos estudos por categoria

Categoria	Título	Autor (Sobrenome)	Base
Importância de Cidades Inteligentes	Cidades cognitivas: uma estrutura para a gestão resiliente do ambiente urbano	GIURIATTI	CAPES
	Cidades Sustentáveis: As Contribuições De Tecnologias Para A Sustentabilidade E O Meio Ambiente	DOS SANTOS	CAPES
	Meio Ambiente E Sustentabilidade: A Importância Do Uso De Tecnologias Para O Desenvolvimento De Cidades Inteligentes E Sustentáveis	NUNES	CAPES
	Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry	NITOSLAWSKI	Scopus
Monitoramento e Gestão de arborização urbana	RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management	LUVISI	Scopus
	FRAMEWORK ORIENTADO À GESTÃO DA ARBORIZAÇÃO DE VIAS PÚBLICAS PARA CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS	TRINDADE	Google Acadêmico
	Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de internet das coisas.	FARIA	Google Acadêmico

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Santos & Cortese, 2022.

Para fins de visualização do tipo de estudo, foi elaborada uma tabela com uma coluna para isso, bem como uma coluna para visualizar a referência de acordo com a norma ABNT, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Classificação dos estudos por tipo e referência

Título	Referência (ABNT)	Tipo
Cidades cognitivas: uma estrutura para a gestão resiliente do ambiente urbano	GIURIATTI, Tiago et al. Cidades cognitivas: uma estrutura para a gestão resiliente do ambiente urbano. Revista de Gestão e Secretariado, v. 15, n. 9, p. e4123-e4123, 2024.	Artigo
Cidades Sustentáveis: As Contribuições De Tecnologias Para A Sustentabilidade E O Meio Ambiente	DOS SANTOS, Rômulo Ferreira et al. Cidades Sustentáveis: As Contribuições De Tecnologias Para A Sustentabilidade E O Meio Ambiente.	Artigo
Meio Ambiente E Sustentabilidade: A Importância Do Uso De Tecnologias Para O Desenvolvimento De Cidades Inteligentes E Sustentáveis	NUNES, Kennya Rodrigues et al. Meio Ambiente E Sustentabilidade: A Importância Do Uso De Tecnologias Para O Desenvolvimento De Cidades Inteligentes E Sustentáveis.	Artigo
Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry	NITOSLAWSKI, Sophie A. et al. Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry. Sustainable Cities and Society, v. 51, p. 101770, 2019.	Artigo (revisão)
RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management	LUVISI, Andrea; LORENZINI, Giacomo. RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management. Urban forestry & urban greening, v. 13, n. 4, p. 630-637, 2014.	Artigo
FRAMEWORK ORIENTADO À GESTÃO DA ARBORIZAÇÃO DE VIAS PÚBLICAS PARA CIDADES INTELIGENTES E SUSTENTÁVEIS	TRINDADE, Bruno Guaringue et al. Framework orientado à gestão da arborização de vias públicas para cidades inteligentes e sustentáveis. 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.	Dissertação
Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de internet das coisas.	FARIA, José Sinézio Rebello de. Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de internet das coisas. 2023. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.	Dissertação

Fonte: Elaboração própria, adaptado de Santos & Cortese, 2022.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante a pesquisa inicial nas bases de dados acadêmicas (Scopus, Google Acadêmico e CAPES), os itens mais atendidos estavam no título, no resumo e nas palavras-chave do artigo. Pelo método de seleção utilizado nesse estudo, foram encontrados oito artigos, os quais foram submetidos aos seguintes procedimentos de filtragem e eliminação: trabalhos em duplicata; trabalhos cujo título, resumo ou palavras-chave não estavam alinhados com o tema pesquisado; trabalhos apresentados em conferências; e capítulos de livros. Ao final desse processo, obteve-se um total de sete artigos, que foram lidos integralmente. Desses artigos, os sete foram incluídos nesta revisão sistemática, por estarem dentro do escopo da pesquisa "Monitoramento de Arvoredo Urbano com Internet das Coisas".

Os estudos analisados inicialmente delineiam que o conceito de cidades inteligentes e sustentáveis é fundamental para enfrentar os desafios urbanos contemporâneos, integrando tecnologias como Internet das Coisas (IoT), big data e inteligência artificial (IA) para otimizar serviços e reduzir impactos ambientais (Nunes et al., 2024; Dos Santos et al., 2024). Essa abordagem visa não apenas a eficiência, mas também a promoção da justiça social e a garantia da qualidade de vida para as gerações futuras (Nunes et al., 2024). A relevância das cidades inteligentes reside na sua capacidade de transformar ambientes urbanos em espaços mais adaptáveis, resilientes e saudáveis, por meio da integração de tecnologias avançadas na gestão de recursos, como tráfego, energia e água (Nunes et al., 2024). A evolução para "cidades cognitivas", que incorporam capacidades de aprendizagem e resiliência, reforça a necessidade de inovações tecnológicas contínuas para um futuro urbano mais equilibrado (Giuriatti et al., 2024).

Dentro dessa macro-visão de cidades inteligentes, a arborização urbana emerge como um componente crítico da infraestrutura verde, proporcionando múltiplos benefícios ecológicos e sociais (Nitoslawski et al., 2019). Historicamente, a gestão desse arvoredo tem sido desafiadora, marcada pela escassez de dados precisos e a predominância de avaliações subjetivas, o que aumenta o risco de falhas em face de eventos extremos e urbanização acelerada (Nitoslawski et al., 2019). Essa lacuna na gestão tradicional evidencia a urgência por ferramentas preditivas e corretivas que transcendam as inspeções visuais (Nitoslawski et al., 2019).

Nesse contexto, a integração de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) e, especificamente, da Internet das Coisas (IoT), representa uma solução transformadora para o monitoramento e a gestão do arvoredo. Os artigos analisados evidenciam que a IoT viabiliza a coleta e o compartilhamento autônomo de dados em tempo real, permitindo uma gestão proativa e baseada em evidências (Nunes et al., 2024; Nitoslowski et al., 2019). As aplicações incluem o uso de sensores para monitoramento da umidade do solo, identificação por RFID (Identificação por Radiofrequência) para inventário e saúde das árvores, e tecnologias como LiDAR para mapeamento e análise estrutural (Nitoslawski et al., 2019). O processamento desses dados é frequentemente potencializado por inteligência artificial e machine learning, que identificam padrões e anomalias para subsidiar decisões, transformando dados brutos em dados para tomada de decisão (Giuriatti et al., 2024; Nitoslowski et al., 2019).

A evolução do conceito de cidades inteligentes para "cidades cognitivas", ambientes que aprendem e se adaptam às demandas urbanas, com foco na resiliência, reforça a necessidade de integrar a cognição pela resiliência na gestão urbana (Giuriatti et al., 2024). Essa perspectiva se alinha perfeitamente com a "silvicultura urbana inteligente", que transcende a gestão reativa ao promover um modelo preditivo e participativo (Nitoslawski et al., 2019). Ferramentas como aplicativos móveis e plataformas de mapeamento de código aberto são cruciais para o engajamento cidadão e a otimização da manutenção e planejamento das árvores (Nitoslawski et al., 2019).

Contudo, a implementação dessas soluções não está isenta de desafios. Os estudos apontam barreiras como a necessidade de investimentos significativos em infraestrutura e tecnologia, a proteção da privacidade dos dados coletados, e a superação das desigualdades no acesso às tecnologias (Nunes et al., 2024; Dos Santos et al., 2024). Além disso, a durabilidade dos sensores em ambientes externos, a complexidade da integração de sistemas e a preocupação com o lixo eletrônico ao final da vida útil dos dispositivos são questões práticas relevantes (Nitoslawski et al., 2019). A gestão de grandes volumes de dados (big data) também emerge como um desafio que demanda ferramentas analíticas robustas (Nunes et al., 2024; Nitoslowski et al., 2019).

Para que o monitoramento inteligente do arvoredo alcance seu pleno potencial, os estudos sugerem uma abordagem colaborativa entre governos, setor privado e sociedade civil (Nitoslawski et al., 2019; Dos Santos et al., 2024). É fundamental o desenvolvimento de

políticas públicas eficazes que garantam a distribuição equitativa dos benefícios e a adoção de uma cultura de melhoria contínua na gestão desses sistemas (Nunes et al., 2024). A "silvicultura urbana inteligente", por meio da IoT e da IA, não apenas aprimora a eficiência operacional e reduz custos, mas também fortalece a dimensão ambiental das cidades inteligentes, promovendo ecossistemas urbanos mais saudáveis, seguros e sustentáveis para as futuras gerações (Nitoslawski et al., 2019; Dos Santos et al., 2024).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo utilizou o método PRISMA, pois ele é um protocolo para o desenvolvimento sistematizado de estudos de revisão e meta-análises. Foi utilizado a fim de investigar o estado da arte do tema “Monitoramento de Arvoredo Urbano com Internet das Coisas.

A análise dos estudos nacionais e internacionais corroboram a visão de que cidades precisam se tornar inteligentes, uma vez que o crescimento da população urbana é acelerado e o planejamento urbano é de extrema valia para desenvolvimento econômico e de qualidade de vida do cidadão. A pesquisa reafirma o papel indispensável da arborização urbana como infraestrutura verde vital, que, frente aos desafios da urbanização acelerada e das mudanças climáticas, exige uma gestão mais eficiente e proativa, assim como a importância do alinhamento com Internet das Coisas e suas integrações com tecnologia recentes como Inteligência Artificial.

Os achados demonstram que a IoT emerge como uma solução transformadora, capacitando a gestão do arvoredo urbano a evoluir de um modelo reativo para um preditivo e baseado em dados. A integração de diversos tipos de sensores (como umidade do solo e RFID) com plataformas de coleta e análise de dados em tempo real, impulsionadas por inteligência artificial, permite insights sem precedentes sobre a saúde e estabilidade das árvores. Essa abordagem não apenas otimiza a manutenção e o planejamento, mas também reforça a segurança pública e a resiliência das cidades, conforme evidenciado pela otimização de serviços e a mitigação de riscos (Nunes et al., 2024; Nitoslawski et al., 2019).

Adicionalmente, esta revisão destacou como o monitoramento inteligente do arvoredo se alinha e contribui para a visão mais ampla de cidades inteligentes e, mais recentemente, de "cidades cognitivas". Essas últimas, caracterizadas pela capacidade de aprendizagem e adaptação, dependem da integração inteligente de tecnologias para promover um ambiente urbano mais equilibrado e resiliente (Giuriatti et al., 2024). O arvoredo urbano e sua gestão impulsionada pela IoT não só aprimora a eficiência operacional e reduz custos, mas também promove a transparência e o engajamento cidadão, transformando a relação entre os habitantes e seu ambiente natural (Nitoslawski et al., 2019; Dos Santos et al., 2024).

Contudo, a jornada rumo a um monitoramento inteligente totalmente integrado não está isenta de obstáculos. Desafios como os custos iniciais de implementação, a necessidade de infraestrutura robusta, a proteção da privacidade dos dados e a gestão de lixo eletrônico exigem atenção contínua. As desigualdades no acesso à tecnologia e a complexidade da interoperabilidade entre diferentes sistemas também se apresentam como barreiras que necessitam de soluções colaborativas e políticas públicas eficazes (Nunes et al., 2024; Nitoslowski et al., 2019).

Em suma, o monitoramento de arvoredo urbano com IoT representa uma fronteira promissora para a gestão ambiental urbana. Para que seu pleno potencial seja alcançado, é imperativo que a inovação tecnológica seja acompanhada por estratégias de implementação cuidadosas, investimentos contínuos e uma forte colaboração multissetorial, envolvendo governos, academia, setor privado e a comunidade. Futuras pesquisas devem focar na superação dos desafios técnicos e éticos, explorando modelos de financiamento sustentáveis e garantindo que os benefícios da "silvicultura urbana inteligente" sejam amplamente acessíveis, contribuindo para cidades verdadeiramente mais verdes, seguras e habitáveis para as próximas gerações.

Dessa forma, a revisão aqui apresentada pode ampliar os conhecimentos, delimitar o assunto para novas implementações e artigos e ajudar os gestores de organizações públicas, privadas e sociedade como um todo a entenderem a importância do monitoramento de árvores urbanas alinhadas ao uso de tecnologias emergentes como IoT, permitindo tomada de decisões rápidas e eficientes, de acordo com as nuances de cada cidade.

As limitações desse estudo estão relacionados ao número de pesquisas incluídas na revisão, que foram poucos e a causa, que é o fato de que IoT é um tema muito recente. O estudo cumpre o objetivo, porém é necessária uma nova revisão integrando ainda mais com conceitos emergentes como Inteligência Artificial e Big Data.

REFERÊNCIAS

BUCKERIDGE, Marcos. Árvores urbanas em São Paulo: planejamento, economia e água. *Estudos Avançados*, v. 29, n. 84, p. 85-101, 2015.

DOS SANTOS, Rômulo Ferreira et al. Cidades Sustentáveis: As Contribuições De Tecnologias Para A Sustentabilidade E O Meio Ambiente.

FARIA, José Sinézio Rebello de. Proposta de sistema de monitoramento de árvores utilizando sensores inerciais dentro do paradigma de Internet das Coisas. 2023. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

GALVÃO, Taís Freire; PANSANI, Thais de Souza Andrade; HARRAD, David. Principais itens para relatar Revisões sistemáticas e Meta-análises: A recomendação PRISMA. Epidemiologia e serviços de saúde, v. 24, p. 335-342, 2015.

GALVÃO, Taís Freire; PEREIRA, Mauricio Gomes. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. Epidemiologia e serviços de saúde, v. 23, n. 1, p. 183-184, 2014.

GIURIATTI, Tiago et al. Cidades cognitivas: uma estrutura para a gestão resiliente do ambiente urbano. Revista de Gestão e Secretariado, v. 15, n. 9, p. e4123-e4123, 2024.

LUVISI, Andrea; LORENZINI, Giacomo. RFID-plants in the smart city: Applications and outlook for urban green management. Urban forestry & urban greening, v. 13, n. 4, p. 630-637, 2014.

NITOSLAWSKI, Sophie A. et al. Smarter ecosystems for smarter cities? A review of trends, technologies, and turning points for smart urban forestry. Sustainable Cities and Society, v. 51, p. 101770, 2019.

NUNES, Kennya Rodrigues et al. Meio Ambiente E Sustentabilidade: A Importância Do Uso De Tecnologias Para O Desenvolvimento De Cidades Inteligentes E Sustentáveis.

SANTOS, Rafaela Pastoura; CORTESE, Tatiana Tucunduva P. Planejamento Urbano e Desastres: Uma Revisão Sistemática de Literatura PRISMA. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades. ISSN eletrônico, p. 2318-8472, 2022.

SILVA, Erica Moniz Ferreira da et al. Um novo ecossistema: florestas urbanas construídas pelo Estado e pelos ativistas. *Estudos Avançados*, v. 33, n. 97, p. 81-102, 2019.

TRINDADE, Bruno Guaringue. Framework orientado à gestão da arborização de vias públicas para cidades inteligentes e sustentáveis. 2022. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022.