

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

ALISSON HENRIQUE SILVA DOS SANTOS

**TECNOLOGIAS GEOESPACIAIS NA GESTÃO DE RISCOS: MAPEAMENTO E
ZONEAMENTO DE QUEDAS DE ÁRVORES EM ÁREAS VULNERÁVEIS EM
MACEIÓ, ALAGOAS**

Rio Largo, AL

2025

ALISSON HENRIQUE SILVA DOS SANTOS

**TECNOLOGIAS GEOESPACIAIS NA GESTÃO DE RISCOS: MAPEAMENTO E
ZONEAMENTO DE QUEDAS DE ÁRVORES EM ÁREAS VULNERÁVEIS EM
MACEIÓ, ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação de Engenharia Florestal da
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito para obtenção do título de Bacharelado
em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof.^a Dra. Andréa de Vasconcelos
Freitas Pinto.

Coorientador: Prof. Dr. Jhonathan Gomes dos
Santos.

Rio Largo, AL

2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S237t Santos, Alisson Henrique Silva dos.

Tecnologias geoespaciais na gestão de riscos: mapeamento e zoneamento de quedas de árvores em áreas vulneráveis em Maceió, Alagoas. / Alisson Henrique Silva dos Santos. – 2025.

55 f.: il.

Orientador(a): Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto.
Coorientador(a): Jhonathan Gomes dos Santos.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Graduação em Engenharia Florestal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Arborização urbana. 2. sensoriamento remoto. 3. Segurança urbana. I. Título.

CDU: 630*2

Folha de aprovação

ALISSON HENRIQUE SILVA DOS SANTOS

Tecnologias geoespaciais na gestão de riscos: mapeamento e zoneamento de quedas de árvores em áreas vulneráveis em Maceió, Alagoas

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em 06/05/2025

Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
 **ANDREA DE VASCONCELOS FREITAS PINTO**
Data: 19/05/2025 15:54:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) Andréa de Vasconcelos Freitas Pinto
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
(Orientadora)

Documento assinado digitalmente
 **JHONATHAN GOMES DOS SANTOS**
Data: 21/05/2025 09:42:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jhonathan Gomes dos Santos
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
(Coorientador)

Documento assinado digitalmente
 **SHEILA VALERIA ALVARES CARVALHO**
Data: 19/05/2025 16:01:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Sheila Valéria Alvares Carvalho
Universidade Federal de Alagoas
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias

Documento assinado digitalmente
 **MARIA JOSE DE HOLANDA LEITE**
Data: 19/05/2025 15:45:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Maria José de Holanda Leite
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

A Deus, fonte de sabedoria e força, que
iluminou cada passo desta jornada. À minha
família, alicerce incondicional, cujo apoio
transformou sonhos em realidade.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha sincera gratidão à Defesa Civil por disponibilizar os dados essenciais que enriqueceram esta pesquisa e proporcionaram bases sólidas para o meu trabalho. Sem essa colaboração, este estudo não teria alcançado sua profundidade científica.

Aos meus orientadores, em especial à Professora Andreia, sou profundamente grato. Sua expertise em dinâmica florestal foi uma fonte constante de inspiração. Mesmo quando minha pesquisa se direcionou para a dinâmica florestal em ambientes urbanos, sua orientação garantiu que o rigor científico e a clareza de objetivos permanecessem como pilares deste trabalho.

Meus calorosos agradecimentos vão aos meus colegas e queridos amigos Thyago e Ramon, cuja camaradagem e conhecimento em sensoriamento remoto foram inestimáveis. Seu apoio incansável não apenas aprimorou minhas habilidades técnicas, mas também culminou na alegria de publicar meu primeiro trabalho acadêmico.

À minha família—meus alicerces—devo tudo. Meus pais, Alda e Marinaldo, que me permitiram dedicar-me integralmente aos estudos, merecem minha eterna gratidão. Meus irmãos, cujo incentivo e amor me sustentaram nos momentos desafiadores, lembram-me diariamente que toda conquista é coletiva.

Agradeço também à Universidade Federal de Alagoas (UFAL) por proporcionar um ambiente de saber e crescimento, onde a curiosidade e a excelência acadêmica florescem.

Por fim, reconheço a mim mesmo—por persistir nas incertezas, por enxergar nos tropeços degraus para a evolução e por acreditar no caminho. Que este trabalho reflita não apenas esforço individual, mas a confluência de saberes compartilhados, mãos estendidas e laços que nos fortalecem.

RESUMO

A arborização urbana desempenha papel fundamental na sustentabilidade das cidades, oferecendo serviços ecossistêmicos essenciais, como regulação térmica, redução de poluentes atmosféricos e conservação da biodiversidade. No entanto, Maceió, assim como outras metrópoles brasileiras — a exemplo de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte —, enfrenta desafios estruturais que comprometem sua infraestrutura verde. Fatores como o envelhecimento arbóreo, práticas de manejo inadequadas e a intensificação de eventos climáticos extremos elevam os riscos de quedas de árvores, ameaçando não apenas a segurança urbana, mas também a resiliência ambiental desses centros. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo desenvolver um zoneamento de risco de queda de árvores por meio de tecnologias geoespaciais. Para investigar tais dinâmicas, o trabalho foi realizado no município de Maceió, abrangendo todos os seus bairros. Utilizaram-se registros de ocorrências da Defesa Civil de Maceió (DCM, 2021–2024), tratados em planilhas do Microsoft Excel para organização, padronização e garantia de integridade dos dados. Posteriormente, as informações foram importadas para o software QGIS 3.34, onde se procedeu ao geoprocessamento. Na etapa inicial do QGIS, criaram-se camadas de pontos georreferenciados, representando ocorrências de quedas de árvores e ameaças associadas. Aplicou-se, então, a ferramenta "Contagem de Pontos em Polígonos" para quantificar eventos por bairro, seguida da classificação por simbologia graduada, que categorizou os riscos em: sem ocorrência, muito baixa, baixa, moderada, alta e muito alta. Como resultado, a análise comparativa dos registros da DCM (2021–2024) revelou padrões críticos associados a precipitações intensas e ventos fortes, sendo eventos climáticos extremos, como chuvas torrenciais e ventanias, determinantes para a instabilidade arbórea. Os dados apontaram maior incidência de quedas em bairros densamente povoados, com destaque para Benedito Bentes, Jacintinho e Jatiúca, que emergiram como áreas críticas devido à recorrência de ocorrências, especialmente durante períodos úmidos. O mapeamento identificou Benedito Bentes como uma das áreas prioritárias para intervenção imediata, além de outras regiões vulneráveis, direcionando políticas públicas de prevenção e mitigação. Conclui-se que a integração de geotecnologias, como sensoriamento remoto e SIG, é fundamental para otimizar a gestão de riscos urbanos, uma vez que permitem análises temporais e espaciais refinadas. Essa abordagem não apenas reduz impactos socioeconômicos, mas também promove resiliência ambiental frente a cenários climáticos crescentemente adversos.

Palavras-chave: arborização urbana; sensoriamento remoto; segurança urbana.

ABSTRACT

Urban tree planting plays a fundamental role in urban sustainability, providing essential ecosystem services such as thermal regulation, reduction of atmospheric pollutants, and biodiversity conservation. However, Maceió, like other Brazilian metropolises — such as São Paulo, Rio de Janeiro, and Belo Horizonte — faces structural challenges that compromise its green infrastructure. Factors such as tree aging, inadequate management practices, and the intensification of extreme climatic events increase the risks of tree falls, threatening not only urban safety but also the environmental resilience of these centers. In this context, this study aimed to develop a risk zoning map for tree falls using geospatial technologies. The research was conducted in the municipality of Maceió, covering all its neighborhoods. Records of incidents from the Civil Defense of Maceió (DCM, 2021–2024) were processed in Microsoft Excel spreadsheets for data organization, standardization, and integrity assurance. Subsequently, the data were imported into QGIS 3.34 software for geoprocessing. In the initial QGIS stage, georeferenced point layers were created to represent tree fall incidents and associated hazards. The "Point-in-Polygon Count" tool was applied to quantify events per neighborhood, followed by graduated symbology classification, which categorized risks into: no occurrence, very low, low, moderate, high, and very high. As a result, the comparative analysis of DCM records (2021–2024) revealed critical patterns associated with heavy rainfall and strong winds, with extreme climatic events, such as torrential rains and windstorms, being decisive factors for tree instability. Data indicated a higher incidence of falls in densely populated neighborhoods, particularly Benedito Bentes, Jacintinho, and Jatiúca, which emerged as critical areas due to the recurrence of incidents, especially during wet periods. The mapping identified Benedito Bentes as a priority area for immediate intervention, alongside other vulnerable regions, guiding public prevention and mitigation policies. It is concluded that the integration of geotechnologies, such as remote sensing and GIS, is crucial to optimize urban risk management, as they enable refined temporal and spatial analyses. This approach not only reduces socioeconomic impacts but also promotes environmental resilience in the face of increasingly adverse climatic scenarios.

Keywords: urban forestry; remote sensing; urban safety;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização do município de Maceió.....	32
Figura 2 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2021	35
Figura 3 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2022	36
Figura 4 - Precipitação para o mês de abril de 2021	38
Figura 5 - Precipitação para o mês de abril de 2022	39
Figura 6 - Precipitação para os meses de janeiro a março de 2021	40
Figura 7 - Precipitação mensal do período úmido de Maceió para o ano de 2021.....	40
Figura 8 - Precipitação para o período úmido de 2022	41
Figura 9 - Zoneamento do risco de ameaças de queda de árvore para o ano de 2021.....	43
Figura 10 - Zoneamento do risco de ameaças de queda de árvore para o ano de 2022.....	44
figura 11 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2023	46
Figura 12 - Zoneamento do Risco de Queda de Árvore para o ano de 2024.....	47
Figura 13 - Precipitação histórica dos meses do período úmido de Maceió entre 2021 a 2024	49
Figura 14 - Precipitação para o período úmido dos anos entre 2021 a 2024.....	49
Figura 15 - Zoneamento do Risco de Ameaças de Queda de Árvore para o ano de 2023	51
Figura 16 - Zoneamento do Risco de Ameaças de Queda de Árvore para o ano de 2024	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAP	Circunferência à Altura do Peito
DAP	Diâmetro à Altura do Peito
DCM	Defesa Civil de Maceió
GEE	Google Earth Engine
G1 AL	Portal de Notícias G1 Alagoas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
NDVI	Índice de Vegetação por Diferença Normalizada
NEB	Nordeste Brasileiro
QGIS	Quantum Geographic Information System (Sistema de Informação Geográfica)
SEPLAG	Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio
SIG	Sistema de Informação Geográfica
ZRQA	Zoneamento de Risco de Queda de Árvores
ONU	Organização das Nações Unidas
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
MPE	Ministério Público do Estado (referência ao manual de Curitiba-PR)
ZA	Zoneamento Ambiental

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Gestão de riscos na arborização urbana.....	17
2.2 Mapeamento e monitoramento de árvores em áreas urbanas	21
2.3 Identificação de áreas prioritárias para monitoramento	24
2.4 Análise de fatores de risco para queda de árvores	26
2.5 Tecnologias geoespaciais aplicadas à gestão e zoneamento de risco de queda de árvores	28
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.1 Área de estudo	32
3.2 Coleta e preparação de dados	33
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1 Comparativo das quedas de árvores identificadas pelo zoneamento (2021 a 2022)	34
4.2 Comparativo das quedas de árvores identificadas pelo zoneamento (2023 a 2024)	45
5 CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A arborização urbana é fundamental para a sustentabilidade das cidades, oferecendo serviços como regulação térmica, redução de poluentes, fixação de gases tóxicos e conservação da biodiversidade (Pires et al., 2010; Almeida; Barbosa, 2010). No entanto, Maceió, assim como outras metrópoles brasileiras – a exemplo de São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte –, enfrenta desafios estruturais que comprometem sua infraestrutura verde. Fatores como o envelhecimento arbóreo, práticas de manejo inadequadas e a intensificação de eventos climáticos extremos elevam os riscos de quedas de árvores, ameaçando não apenas a segurança urbana, mas também a resiliência ambiental desses centros.

Nesse contexto, a gestão florestal urbana demanda intervenções periódicas em toda a vegetação, como controle fitossanitário, podas ou remoções, para garantir segurança e equilíbrio ambiental. Conforme ressaltam Santos et al. (2019), essas práticas exigem ajustes no planejamento da seleção, distribuição e manejo das espécies arbóreas, visando adaptar-se às dinâmicas urbanas e ecológicas. Vale destacar que a queda de árvores em áreas urbanas representa um risco significativo, causando danos à infraestrutura e acidentes graves (Santos; Lima; Santana, 2024).

Em Maceió, esse problema é intensificado pela expansão urbana desordenada, que, conforme Sartori e Balderi (2011), gera conflitos entre infraestruturas críticas (redes elétricas, vias pavimentadas) e a vegetação, aumentando a predisposição a quedas. Dados recentes da Defesa Civil de Maceió (DCM, 2021–2024) indicam que, entre março e julho, ocorreram 24 quedas de árvores e mais de 30 alertas de risco iminente. Esses dados estão concentrados principalmente em bairros populosos, como Farol, Jacintinho e Benedito Bentes.

Além disso, os registros destacam que esses episódios não apenas evidenciam a fragilidade urbana diante de eventos climáticos extremos, mas também demandam a implementação imediata de medidas preventivas sistemáticas. Nesse contexto, as tecnologias geoespaciais destacam-se como alternativa eficiente para aprimorar a gestão de riscos em áreas propensas a desastres naturais, integrando precisão técnica e planejamento estratégico.

Conforme Pereira (2018), a aplicação integrada dessas ferramentas permite diagnósticos detalhados e viabiliza análises espaciais dinâmicas para orientar prioridades de intervenção. Os autores complementam que, em Maceió, essa abordagem poderia subsidiar diretamente as operações da Defesa Civil, otimizando a eficiência das respostas mediante a focalização em áreas críticas.

Nogueira et al. (2017) afirmam que a utilização de tecnologias geoespaciais em ambientes urbanos permite a criação de zoneamentos de risco específicos para quedas arbóreas, ao integrar critérios fitossanitários e interferências com infraestruturas urbanas. Os pesquisadores destacam que esse método ganha relevância em cenários de ocupação irregular, alterações no uso do solo e maior incidência de eventos extremos, como observado em Maceió. Paralelamente, o zoneamento ambiental configura-se como estratégia fundamental para harmonizar segurança pública, conservação ecológica e organização territorial, conforme apontam Castro e Bomfim (2019).

Contudo, embora essencial, Maceió ainda não dispõe de um Zoneamento de Risco de Queda de Árvores (ZRQA), cenário agravado pela falta de dados georreferenciados e pela expansão urbana sobre áreas verdes (Santos; Lima; Santana, 2024). Os autores ressaltam que essa lacuna compromete a capacidade de ações preventivas do poder público, expondo comunidades de regiões centrais e periféricas a riscos recorrentes, como quedas de árvores durante tempestades.

A inexistência de um Zoneamento de Risco de Queda de Árvores (ZRQA) em Maceió configura-se como uma lacuna estratégica na gestão urbana, agravada pela recorrência de fenômenos climáticos extremos e pela expansão urbana sobre zonas verdes (Santos; Lima; Santana, 2024). Embora a vegetação urbana seja reconhecida por seus benefícios socioambientais, a carência de manejo técnico especializado, associada ao crescimento desordenado da cidade, amplifica os riscos de quedas e seus impactos diretos à população (Nogueira et al., 2017).

Nesse contexto, a pesquisa apresenta caráter inovador ao propor, pioneiramente para Maceió, a integração de dados geoespaciais, sensoriamento remoto e registros históricos para a construção de um zoneamento de risco direcionado. A originalidade da metodologia reside no emprego combinado de tecnologias como NDVI, imagens de alta resolução espacial e análise espacial em SIG, permitindo mapear e hierarquizar áreas críticas com base em variáveis multifatoriais (Pereira, 2018).

Além de atender demandas urgentes do setor público, a proposta estabelece uma base técnico-científica para políticas preventivas, aprimorando a tomada de decisão e fortalecendo a resiliência urbana em prol da segurança coletiva (Castro; Bomfim, 2019). Diante dessa lacuna, o estudo propôs-se a desenvolver um Zoneamento de Risco de Queda de Árvores (ZRQA) em Maceió-AL, mediante a integração de registros históricos de ocorrências, imagens de satélite, sensoriamento remoto e ferramentas de SIG.

A hipótese central pressupõe que a articulação de dados geoespaciais, registros de ameaças e análises de sensoriamento remoto viabiliza a identificação precisa de zonas críticas, subsidiando ações preventivas contra eventos catastróficos urbanos (Santos; Lima; Santana, 2024; Pereira, 2018).

A conjectura apresentada alinha-se aos objetivos da pesquisa, podendo ser validada mediante a confrontação entre áreas classificadas como de alto risco pelo modelo e os registros reais de quedas arbóreas no período de 2021 a 2024. Essa validação comparativa é fundamental para refinar a precisão metodológica e garantir a aplicabilidade prática do zoneamento proposto (Santos; Lima; Santana, 2024).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão de riscos na arborização urbana

Pesquisas recentes evidenciam que mais de 50% da população mundial vive nos centros urbanos, com a expectativa de que esse percentual demográfico aumente para 70% até 2050 (ONU, 2019). Grimm et al. (2008) apresentam dados relevantes que comprometem a ecologia urbana, uma vez que esse aumento desenfreado da população leva à remoção da vegetação arbórea pela infraestrutura cinza (área construída). Outro ponto a destacar são os impactos negativos na composição química e física dos solos, nos corpos hídricos, na biodiversidade e nos ciclos biogeoquímicos (Grimm et al., 2008; Silva, 2023).

Sendo assim, os riscos ocasionados por essas mudanças no meio urbano evidenciam um aumento significativo na emissão de dióxido de carbono. Ribeiro (2008) aponta uma crescente emissão de CO₂ na atmosfera, o que impacta a qualidade do ar, promove ondas de calor e, conseqüentemente, amplia as áreas de risco. Dessa forma, a intensificação dos impactos ambientais nos centros urbanos demanda ações estratégicas para mitigar os efeitos negativos dessas transformações, reduzindo a probabilidade de riscos.

A queda de árvores em áreas habitadas pode representar uma ameaça significativa, especialmente em contextos urbanos e em regiões sujeitas a eventos climáticos extremos. A avaliação desse fenômeno envolve a consideração de diversos fatores, como a estabilidade das árvores, condições ambientais, presença de infraestrutura e populações vulneráveis (Emerick, 2021; Van Haaften et al., 2021; Silva; Moraes, 2023). Nesse sentido, compreender o conceito de risco associado a essa ocorrência é fundamental para a adoção de medidas preventivas e de gestão (Garcias; Ferentz; Pinheiro, 2019).

Silva (2023) define risco como a probabilidade de que a população e seus bens materiais sejam afetados negativamente pela queda de uma árvore, considerando também a gravidade das possíveis consequências desse evento. Dessa forma, o risco pode ser compreendido como a relação entre probabilidade e impacto, sendo que sua ocorrência não implica, necessariamente, em um desastre (Cavalari et al., 2024).

Diante desse cenário, torna-se essencial a implementação de medidas voltadas para a gestão de riscos urbanos, a fim de minimizar vulnerabilidades e promover a resiliência das cidades frente às mudanças ambientais e sociais (Van Haaften et al., 2021). Nesse contexto, a definição e a importância da gestão de riscos urbanos ganham destaque como ferramentas fundamentais para planejar e mitigar os impactos decorrentes da urbanização acelerada. Para que a gestão de riscos urbanos seja eficiente, é fundamental a adoção de políticas públicas integradas, que considerem aspectos ambientais, sociais e estruturais (Garcias; Ferentz; Pinheiro, 2019).

Esse processo deve seguir etapas que incluem o conhecimento, a percepção e a aceitação dos riscos (Kauchakje et al., 2005; Kuhnén, 2009; Costa; Ferreira, 2010; Negrão; Silva, 2014; Ferreira et al., 2022; Moreira, 2024). Além disso, a gestão de riscos pode ser dividida entre medidas preventivas, como planejamento urbano adequado e educação da população, e medidas reativas, como resposta a emergências e reconstrução das áreas afetadas (Ribeiro; Fortunato; Machado, 2012; Zamparoni, 2012; Espírito-Santo; Szlafsztein, 2016; Silveira; Cardoso, 2016; Silva, 2023).

No contexto da prevenção, a implementação de sistemas de monitoramento e a fiscalização adequada são essenciais para minimizar os impactos de desastres urbanos. A resposta a emergências, por sua vez, deve incluir ações rápidas e eficientes para reduzir danos e preservar vidas. Por fim, a recuperação das áreas afetadas requer planejamento estratégico e investimentos adequados para restabelecer a normalidade e fortalecer a resiliência das cidades (Brasil, 2010; Pereira et al., 2011; Klug, 2018; Silva, 2023; Costa et al., 2023).

A queda de árvores em áreas urbanas configura-se como um fenômeno com implicações multidimensionais, afetando tanto a infraestrutura física quanto a segurança pública. Defeitos estruturais, como rachaduras e declínio da madeira, aliados à presença de pragas, comprometem a estabilidade arbórea (Silva; Moraes, 2023). Pesquisas recentes indicam que esses impactos são amplificados pela combinação de fatores intrínsecos (cavidades, cupins, injúrias mecânicas) e extrínsecos (precipitação intensa, ventos fortes), os quais comprometem a estabilidade estrutural das árvores e elevam a probabilidade de colapso.

As forças atuantes nas árvores são categorizadas em estáticas (relacionadas ao peso próprio e à distribuição de massa) e dinâmicas (decorrentes de cargas variáveis, como o vento) (Bobrowski, 2010). Conforme James (2003), o vento representa a principal força dinâmica, exercendo pressão heterogênea sobre a copa, o tronco e o sistema radicular. Nesse caso, árvores isoladas, comumente encontradas em ambientes urbanos, estão mais expostas a esses efeitos, pois não dispõem da proteção oferecida por maciços florestais, que dissipam a energia do vento coletivamente.

A interação entre a copa e o vento gera momentos de flexão no tronco, com tração na região a barlavento (lado oposto à direção do vento) e compressão a sotavento (lado sob pressão direta) (Bobrowski, 2010). Pesquisas mostram que essa distribuição assimétrica de tensões pode exacerbar defeitos estruturais pré-existentes, como rachaduras ou podridões, aumentando o risco de fratura. Logo, a queda desses indivíduos de grande porte pode gerar danos significativos às infraestruturas públicas e privadas, pois a projeção do raio de queda equivale à altura total das árvores (Silva; Moraes, 2023).

Desse modo, espécies arbóreas estão constantemente sujeitas a forças físicas, como a gravidade e ventos persistentes, que atuam ao longo de sua vida. Embora o impacto contínuo da gravidade seja uma constante, são nas rajadas ocasionais de vento que as árvores experimentam as maiores cargas (Moore, 2014). Analisando o trabalho de Moore (2014), observa-se que as rajadas, embora esporádicas, são as forças naturais mais intensas a afetar árvores individuais ou grupos, com potencial para causar danos significativos. O autor ainda destaca que a intensidade dessas forças varia conforme o ambiente em que a árvore se encontra, pois, indivíduos arbóreos urbanos enfrentam cargas laterais consideráveis.

Esse aumento na exposição a ventos intensos eleva os momentos de flexão sobre a árvore (Fathi; Bejo; Divos, 2020). Estudos indicam que, quando a intensidade do vento ultrapassa o limite de resistência dos galhos, troncos e sistemas radiculares das árvores, essas estruturas podem se romper ou ser arrancadas (Cranmer et al., 2024). Nesse caso, a estabilidade mecânica das árvores está diretamente relacionada à sua capacidade de resistir às forças dinâmicas, como o vento, ao longo de sua vida (James; Haritos; Ades, 2006).

A interação com o vento faz com que as árvores possam transferir energia, resultando em movimentos de balanço que exibem padrões específicos e característicos (Cranmer et al., 2024). Esses movimentos são distintos para cada árvore e podem ser influenciados por sua arquitetura (James, 2003; Jackson et al., 2021). Logo, a queda de uma única árvore pode desencadear efeitos em cascata, como a ruptura de raízes entrelaçadas de espécies adjacentes, ampliando o dano ecossistêmico.

A interrupção de serviços ecossistêmicos, como a regulação térmica e a interceptação de água pluvial, agrava problemas urbanos, incluindo ilhas de calor e alagamentos (Berland et al., 2017). Pesquisas recentes mostram que árvores classificadas na categoria de alto risco estão associadas a danos relevantes a pessoas e patrimônio. A ocorrência de galhos secos e inclinação acentuada eleva a probabilidade de acidentes (Silva; Moraes, 2023), principalmente durante eventos climáticos extremos, quando a combinação de solo encharcado e ventos fortes reduz a ancoragem radicular (Bobrowski, 2010).

Em âmbito urbano, desastres dessa natureza podem resultar em ferimentos graves ou óbitos, além de sobrecarregar sistemas de emergência. Pereira et al. (2011) destacam que quedas de árvores em vias públicas respondem por 8% dos acidentes não veiculares em áreas de lazer no Brasil, com custos médios de R\$ 15.000 por evento em despesas médicas e reparos. Desse modo, é possível notar que, em Maceió, a proximidade de alvos críticos, como escolas e redes de média tensão, amplia a gravidade dos efeitos colaterais, exigindo a criação de protocolos de evacuação e sinalização de risco.

Outrossim, estudos realizados em estados do Brasil mostram que, na infraestrutura, os danos incluem interrupções em redes elétricas, com destaque para interferências de palmeiras (*Syagrus coronata*), responsáveis por 11,5% dos desligamentos de energia em São Paulo (Carmelo; Seitz, 2008). Logo, vias públicas e edificações também são afetadas, seja pelo bloqueio de tráfego ou por danos estruturais causados por raízes superficiais, como em *Ficus benjamina*, que possui raízes agressivas, podendo atingir até cem metros de comprimento (Toscan et al., 2010), elevando calçadas e rompendo tubulações (Vargas-Garzón; Molina-Prieto, 2012). Desse modo, em Maceió, a combinação de solos instáveis e dados de inventário florestal desatualizados intensifica esses riscos.

Esses eventos, frequentemente associados a falhas estruturais intrínsecas às espécies ou a condições ambientais adversas, demandam análises técnicas aprofundadas para mitigar riscos e orientar políticas de gestão arbórea. O estudo de caso do *Pinus pinea* (pinheiro-doméstico), que apresenta um modelo mecânico singular baseado na dominância da raiz pivotante e na flexibilidade das raízes superficiais (Gasperini; Roatti; Morelli, 2016), ilustra como características anatômicas e morfofisiológicas específicas podem influenciar padrões de queda, ampliando desafios para o planejamento urbano.

Esses eventos frequentemente bloqueiam vias públicas, interrompendo o tráfego e exigindo a realocação de recursos para a remoção de detritos (Vogt; Hauer; Fischer, 2015). Conforme Otero-Durán e Torres (2024), a escolha das espécies é feita com base em poucos indicadores ambientais ou financeiros, ignorando critérios relevantes, como impactos

ecossistêmicos negativos. De acordo com Roman et al. (2016), solos urbanos compactados e pobres em nutrientes comprometem a estabilidade radicular, elevando os riscos de tombamento. Koeser et al. (2014) destacam que a escolha inadequada de espécies, como árvores de grande porte em vias estreitas, aumenta as falhas estruturais.

Juntos, esses estudos evidenciam que a interação entre estresse crônico (solo, espécie) e eventos agudos (clima) potencializa acidentes urbanos, exigindo políticas integradas de manejo (Hilbert Et Al., 2018; Ataíde et al., 2024). Pesquisa realizada por Ataíde et al. (2015), mostra que a ação do vento sobre a copa das árvores gera esforços mecânicos que resultam em torques de torção e flexão na base do tronco. Os autores também afirmam que, quando essas forças excedem a capacidade de ancoragem do sistema radicular, pode ocorrer o tombamento ou arrancamento da árvore, especialmente em solos de baixa coesão ou saturados por umidade.

Trabalhos recentes mostram que, em 80% das quedas analisadas, o afundamento do tronco no lado comprimido cria desníveis no solo, exigindo reparos custosos em calçadas e sistemas de drenagem (Gasperini; Roatti; Morelli, 2016). Nesse sentido, no contexto da segurança pública, a queda de indivíduos arbóreos de grande porte pode acarretar traumatismos graves, incluindo lesões torácicas e cranianas, além de politraumas (Way; Balogh, 2022).

Nesse caso, é possível observar que áreas de fluxo intenso, como calçadas e parques, ampliam a probabilidade de fatalidades, exigindo estratégias de zoneamento de risco. Assim, espécies como *Pinus pinea*, que possuem sistemas radiculares pivotantes, são particularmente perigosas em solos urbanos compactados, podendo tombar sem aviso (Gasperini; Roatti; Morelli, 2016). Dessa forma, a mitigação desses impactos demanda um planejamento urbano integrado, com o uso de geotecnologias para monitorar a gestão da arborização urbana, permitindo a atualização contínua dos dados geoespaciais (Silva et al., 2016).

2.2 Mapeamento e monitoramento de árvores em áreas urbanas

O manejo da arborização urbana apresenta grandes desafios, tanto para quantificar os indivíduos arbóreos quanto para avaliar a sua fitossanidade. Variáveis ambientais — como velocidade do vento, precipitação e temperatura — são fatores que influenciam a vida útil das árvores no meio urbano. Rebelatto, Leal e Moraes (2019) destacam que variáveis ambientais, como temperaturas elevadas e escassez de precipitação, comprometem as espécies arbóreas nesse ambiente, intensificando o estresse hídrico e antecipando a senescência foliar.

Para Pereira e Amaral (2008), a queda foliar em espécies arbóreas está diretamente relacionada às variações sazonais, ocorrendo com maior intensidade durante períodos de menor precipitação e na transição para a estação chuvosa. Outro fator importante são os ventos fortes que, embora auxiliem na dispersão de sementes, também aumentam a perda de folhas e danificam estruturas reprodutivas (Rebelatto; Leal; Moraes, 2019). Assim, essas condições, comuns em áreas urbanas, limitam a capacidade das árvores de se desenvolverem plenamente, comprometendo sua saúde e viabilidade reprodutiva.

Nesse sentido, considerando os diversos fatores que influenciam a estabilidade das árvores urbanas, torna-se essencial a realização de monitoramento contínuo e avaliações periódicas (Weber; Brazolin, 2022). Essas medidas preventivas visam minimizar riscos de quedas ou danos a indivíduos arbóreos, além de prevenir danos materiais e proteger a integridade física da população (Sampaio et al., 2010; Weber; Brazolin, 2022). Portanto, a falta de um planejamento eficiente na arborização das cidades pode gerar diversos problemas, tais como a interferência no pavimento das calçadas — situação em que o crescimento desordenado das raízes resulta em danos estruturais.

Outro ponto são os danos estruturais significativos que os indivíduos arbóreos sofrem, os quais, muitas vezes, podem ocorrer de forma irreversível; uma vez que alguns tipos de pragas atuam de maneira silenciosa e, frequentemente, só são detectadas quando os impactos já se manifestam, comprometendo a integridade da árvore. Lima et al. (2022) destacam que problemas fitossanitários, como infestações por cupins e brocas, causam danos significativos, evidenciando a necessidade de manejo preventivo.

De acordo com Ângelo et al. (2023), os inventários florestais são fundamentais para a gestão do verde urbano, pois permitem identificar os problemas resultantes do planejamento inadequado da arborização. Nesse caso, a realização de avaliações quantitativas e qualitativas possibilita um diagnóstico preciso dos principais impactos, contribuindo para a formulação de estratégias eficazes no manejo sustentável das árvores em áreas urbanas (Nunes et al., 2013).

Diante disso, Melo, Lira Filho e Rodolfo Júnior (2007) destacam que o inventário florestal é uma das principais ferramentas utilizadas nesse processo, cujo objetivo é coletar dados sobre o patrimônio arbóreo e arbustivo de uma localidade. Assim, as informações das características morfológicas das espécies, obtidas por meio desse método tradicional, são altamente relevantes para decisões estratégicas.

Lima et al. (2021) destacam que variáveis dendrométricas, como diâmetro, altura e volume, são fundamentais para avaliar o desenvolvimento das árvores, sua estabilidade e os benefícios ecológicos que proporcionam. Com isso, evidencia-se a importância do inventário

florestal e de suas variáveis dendrométricas, pois, por meio delas, é possível analisar eventos de queda de árvores — uma vez que as dimensões dos indivíduos, expressas pela circunferência à altura do peito (CAP) e pelo diâmetro à altura do peito (DAP), representam parâmetros fundamentais para a avaliação da estabilidade mecânica de árvores de pequeno, médio e grande porte.

Nesse sentido, diversos estudos utilizam dados de inventários florestais para identificar áreas prioritárias para manejo, intervenções fitossanitárias e árvores com risco potencial de queda. Souza, Bittencourt e Martini (2020), por exemplo, empregam características visuais das árvores e variáveis dendrométricas para analisar fatores associados à queda de indivíduos arbóreos, embasando a definição de áreas prioritárias para manejo preventivo. Já Carvalho, Nogueira e Lemos (2016) direcionam sua pesquisa para o uso de inventários florestais na identificação de áreas com pontos de plantio que demandam intervenções de manejo.

Relacionado a isso, Marotti Corradi (2023) associa o inventário arbóreo à geolocalização e à avaliação de risco para priorizar intervenções emergenciais em áreas específicas, identificando exemplares arbóreos que demandam supressão imediata ou poda corretiva. O estudo da autora evidenciou, ainda, variáveis dendrométricas, fitossanitárias e a exposição das árvores a ventos intensos como critérios para mapear zonas prioritárias de intervenção.

Segundo Oliveira et al. (2021), o processo convencional de quali-quantificar a vegetação arbórea pode ser oneroso e demorado, especialmente quando aplicado a grandes extensões territoriais. Além disso, restrições financeiras e operacionais muitas vezes limitam a quantidade de levantamentos terrestres realizados, o que pode comprometer a precisão dos resultados obtidos (Gomes et al., 2012).

De acordo com Rodrigues (2019), o manejo e o monitoramento da arborização urbana exigem investimentos consideráveis, englobando custos com aquisição e manutenção de equipamentos, veículos e mão de obra, além do tempo necessário para análises. Como alternativa, o emprego de geotecnologias, como o sensoriamento remoto por meio de imagens de satélite, destaca-se como uma ferramenta eficiente para aprimorar os inventários florestais.

Oliveira et al. (2021) destacam que, por meio das geotecnologias, é possível realizar uma avaliação mais ágil da vegetação. Além disso, estudos apontam que variáveis dendrométricas apresentam estruturação espacial, permitindo que técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento sejam aplicadas na análise da distribuição da vegetação (Alvarenga et al., 2012; Guedes et al., 2012; Oliveira et al., 2021). Lima Neto (2011) ressalta que as

geotecnologias, incluindo o geoprocessamento, consolidaram-se como ferramentas essenciais para o planejamento e a definição de ações adequadas.

Dessa forma, a coleta, o armazenamento e a análise detalhada de informações em tempo hábil favorecem uma gestão mais eficiente dos dados de cada indivíduo arbóreo (Rodrigues, 2019). Além disso, o cruzamento de dados de indivíduos arbóreos com locais de maior incidência de quedas pode auxiliar na identificação de possíveis fatores comuns associados a esses eventos (IPT, 2004). Mendes (2016), em seu trabalho, ressalta que o uso do geoprocessamento tem permitido a elaboração de um mapeamento sistemático das quedas de árvores, tornando-se fundamental para o manejo arbóreo e a prevenção de riscos.

2.3 Identificação de áreas prioritárias para monitoramento

Quando se fala em risco de queda de árvores, fala-se no impacto que sua estrutura arquitetônica pode causar ao meio natural. Nesse caso, pode-se entender que, no meio urbano, se não houvesse pessoas, carros, infraestrutura ou qualquer interferência humana, o risco de queda de árvores continuaria existindo; no entanto, seus significados e impacto seriam completamente diferentes. Nesse cenário, a queda de árvores não representa um “risco” no sentido de perigo humano ou material, mas sim um evento natural e ecológico, parte do ciclo de vida das florestas e ecossistemas.

Logo, na dinâmica dos cânions urbanos, em que a vegetação arbórea se apresenta muitas vezes como um risco porque ameaça vidas, propriedades e infraestrutura, o fluxo intenso de pessoas transforma um evento natural em um problema de segurança pública. Para Shackleton et al. (2016), a queda de árvores em áreas urbanas configura uma questão preocupante, uma vez que compromete funções essenciais, processos e características dos ecossistemas urbanos. Nesse caso, fica evidente que os critérios para que se possam obter áreas críticas são a densidade populacional, infraestrutura urbana, circulação de pessoas e veículos.

Em relação à densidade populacional de pessoas, é notório observar diversos impactos causados pela ocorrência de queda total ou parcial de indivíduos arbóreos. São Paulo, a capital mais rica do Brasil, sofre com o efeito de suas estruturas megadiversas, como também por ter um ambiente com grande concentração de antropização. Um estudo realizado por Manfra et al. (2022) mostrou que a altura dos prédios e a largura das calçadas são fatores que influenciam e aumentam o risco de queda de árvores. Isso mostra que o fluxo alto de pedestres, veículos e concentração de pessoas são precursores para proporcionar esse risco.

Nesse caso, com o aumento da urbanização nas últimas décadas, ficam evidentes os conflitos relacionados às árvores e ao meio urbano. Assim, essa condição acarreta diversos conflitos com a expansão urbana, incluindo danos a calçadas, redes de esgoto e abastecimento de água, prejuízos a edificações, obstrução de bueiros (Pereira et al., 2011) e comprometimento da visibilidade de sinalizações, invasão da pista e calçada (Emerick, 2021), além, também, de dificultar o tráfego de pedestres e veículos (Cecchetto; Christmann; Oliveira, 2014).

Milano e Dalcin (2000) relatam em seu trabalho a influência da população nas cidades através da sua concentração e uso de veículos, gerando prejuízos significativos à arborização urbana. Esse impacto negativo também fica evidente no trabalho de Meneghetti (2003), em que o desenho urbano com seu fluxo iminente de pessoas resulta em perda de áreas verdes em praças, parques e remanescentes florestais. Desse modo, o adensamento populacional se torna um grande fator para interferência negativa à vegetação, pois a relação homem-natureza sempre foi de execrar as características ambientais na estrutura urbana e fazer com que a natureza seja descartável (Neto, 2011).

A infraestrutura urbana também é um precursor de impacto à vegetação de grande porte nos centros urbanos. Em relação ao espaço no ambiente urbano, existe um conflito entre os objetos presentes, sendo eles: árvores e veículos, árvores e construção e árvores com equipamentos públicos. Meneghetti (2003) mostra que esses impasses se dão pela necessidade da expansão dos serviços de infraestrutura. Desse modo, pesquisas recentes apontam uma influência significativa no diâmetro do tronco de algumas espécies arbóreas presentes em calçadas. Sartori et al. (2021) falam que não é a altura da árvore que causa danos estruturais no pavimento, mas sim o seu diâmetro à altura do peito (DAP), uma vez que as árvores têm sua altura controlada (poda).

Nesse caso, os inúmeros desafios que as árvores enfrentam estão intrinsecamente ligados à infraestrutura cinza, pois, o ambiente propiciado se torna nocivo ao seu desenvolvimento natural. Egerer et al. (2024) afirmam que os desafios são os tipos de solos e o espaço limitado para seu crescimento, uma vez que elas estão cercadas por superfícies impermeabilizadas. Logo, estudos realizados por Mullaney, Lucke e Trueman (2015) denotam que o crescimento de área de asfalto e calçadas aumenta o estresse hídrico em florestas urbanas. Isso mostra que essas condições criam um cenário de estresse para a longevidade das árvores no ambiente urbanizado.

Outro fator determinante para estabelecer o risco de conflito de árvores com o ambiente urbano é a circulação de pessoas e veículos. Hilbert et al. (2019) estabelecem que a mortalidade de indivíduos arbóreos está ligada a atividades desenvolvidas pela ação do homem,

como ações administrativas e de manutenção. Essas dinâmicas promovidas pelo homem vêm de movimentos realizados no meio urbano, como o uso e ocupação do solo, que se caracteriza pela construção de asfalto para fluxo de veículos e pedestres. Isso fica evidente no trabalho de Klein et al. (2016) e Koeser e Smiley (2017), em que o tráfego passa a ser um fator crucial para classificar o risco de queda de árvores.

Outrossim, o fluxo de veículos em vias movimentadas acaba acarretando muitos acidentes envolvendo veículos e vegetação arbórea. Isso porque a maioria dos acidentes com esse tipo de conflito está ligada à falta de planejamento na alocação dos indivíduos arbóreos, que muitas vezes são plantados sem respeitar o limite de segurança da faixa livre. Em seu trabalho, Ewing e Dumbaugh (2009) deixam evidente essa falha na gestão arbórea e afirmam que 85% dos acidentes relacionados a árvores ocorrem a menos de 9 metros da via de circulação. Segundo ainda os autores, mais de 50% das árvores envolvidas nos acidentes tinham sua localização ao longo das curvas e estavam a menos de 6 metros da faixa livre ou acostamento.

Dessa forma, a escolha de áreas críticas passa a ser fundamental para a mitigação de possíveis acidentes ou até mesmo de conflitos entre a vegetação arbórea e os alvos, sejam eles estáticos, transitórios ou móveis. Essa afirmação se baseia no risco que o indivíduo arbóreo pode causar com sua falha, uma vez que, se houver perigo para pessoas, bens patrimoniais ou infraestrutura, a permanência ou não da árvore na zona de risco deve ser analisada (CORRADI, 2023).

2.4 Análise de fatores de risco para queda de árvores

Atualmente, as questões envolvendo o risco de queda de árvores estão ligadas a acidentes fatais envolvendo fatores ambientais, biológicos e antropogênicos. As árvores em ambiente urbano estão expostas a uma série de fatores que comprometem sua estabilidade, dentre os quais se destacam as forças do vento, a expansão desordenada das cidades e as condições topográficas (Li et al., 2018; Lee et al., 2018; Kim et al., 2020). Segundo Emerick (2021), a possibilidade de queda de uma árvore ou de parte dela está relacionada à resistência natural da madeira, à sua estrutura geométrica e às cargas incidentes.

Pesquisas recentes mostram que a interação entre a geometria e a carga determina o nível de tensão aplicado que, ao ultrapassar a resistência do material, pode resultar em falhas estruturais (Emerick, 2021). Além disso, defeitos estruturais, como rachaduras, lesões e deteriorações, contribuem para o aumento da probabilidade de falhas (Emerick, 2021), pois

reduzem a resistência da madeira, exigindo do avaliador técnico uma análise criteriosa quanto à gravidade desses danos (Kane et al., 2015).

No cenário atual, espera-se que eventos extremos, como tempestades de vento catastróficas, tornem-se mais frequentes devido às mudanças climáticas, ampliando os riscos associados à queda de árvores (Seidl et al., 2014; Tippner et al., 2019; Emerick, 2021). Em regiões tropicais, como o Brasil, é comum que a maioria das falhas ocorra durante temporais, especialmente quando acompanhados por chuvas intensas (Gardner et al., 2013; Chirici et al., 2017; Tippner et al., 2019; Li et al., 2019). Logo, com grande volume de água infiltrando no solo, as propriedades físicas acabam sendo comprometidas, e a resistência do solo se torna ineficiente para ancorar as raízes dos indivíduos arbóreos, gerando, assim, o tombamento precoce das árvores.

Em Maceió, por exemplo, para o ano de 2017, foram registrados aproximadamente 40 chamados de emergência, dos quais sete se referiam à queda de árvores (Agência Brasil, 2017). Além disso, no primeiro semestre de 2017, a cidade contabilizou mais de 70 quedas de árvores, superando significativamente as 15 ocorrências registradas em todo o ano de 2016. A maior parte desses eventos concentrou-se entre o final de maio e o início de junho, período marcado por chuvas intensas no estado (DCM; Tribuna Independente, 2017).

Mais recentemente, em 2024, chuvas fortes ocasionaram a queda de uma árvore de grande porte em uma via central da capital alagoana, gerando transtornos no trânsito e risco à população, embora não tenham sido registrados feridos (Extra, 2024). Na mesma ocasião, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) emitiu um alerta meteorológico de nível amarelo para Maceió e outras cidades do estado, indicando a possibilidade de chuvas moderadas. O alerta identificou ventos de até 60 km/h, com potencial para causar alagamentos, quedas de galhos, descargas elétricas e interrupções no fornecimento de energia elétrica (G1 AL, 2024).

Segundo Emerick (2021), as falhas mecânicas em árvores estão geralmente associadas à ruptura de galhos individuais, falhas no fuste ou no sistema radicular. No entanto, problemas estruturais mais amplos, como falhas no tronco ou na base da árvore, tendem a ser mais destrutivos e representam riscos significativamente maiores em áreas urbanas (Li et al., 2019).

Esse tipo de incidente figura como uma das principais causas de acidentes envolvendo pessoas, além de ocasionar prejuízos significativos ao patrimônio público e privado, sobretudo durante episódios de eventos climáticos extremos (Duarte, 2018; Cavalari et al., 2024).

Apesar dos avanços no manejo urbano, a ocorrência de quedas de árvores e galhos continua sendo uma problemática recorrente em diversos centros urbanos ao redor do mundo (Pereira et al., 2011). Somado a isso, fatores biológicos e antropogênicos também são associados como precursores que afetam a saúde da vegetação arbórea. Na cidade de São Paulo, as quedas de árvores já foram relacionadas a múltiplas causas, como a inadequação na seleção das espécies utilizadas em arborização urbana e processos de biodeterioração provocados por organismos xilófagos (IPT, 2004).

Conforme Meneghetti (2003), a falta de adaptação da árvore ao ambiente compromete sua vitalidade, tornando difícil a recuperação mesmo após curtos períodos de estresse. A autora ainda afirma que essa ação torna a planta mais suscetível à ação de organismos patogênicos, como insetos xilófagos, fungos, vírus, micoplasmas, e doenças como o cancro, o que pode culminar em morte.

Além disso, a ação antropogênica vem acarretando diversos danos à dinâmica das florestas urbanas, uma vez que sua interferência, como corte em tronco de árvores e danificação das raízes, causa aberturas para organismos patogênicos, que vão gerar podridão das raízes ou parte do fuste.

Diante disso, a atividade humana traz características como a compactação excessiva, a limitação da circulação de água e ar, a presença de materiais artificiais, o espaço restrito para o crescimento radicular e a interrupção dos ciclos naturais (Craul, 1995; Meneghetti, 2003). Esses problemas são muito recorrentes e acabam dificultando o desenvolvimento natural da planta e afetando a sua longevidade na fase adulta.

2.5 Tecnologias geoespaciais aplicadas à gestão e zoneamento de risco de queda de árvores

A iniciativa Tree Cities of the World, feita em conjunto entre a Arbor Day Foundation e a Organização das Nações Unidas (ONU) para a Alimentação e Agricultura (FAO), estabelece diretrizes globais para a gestão responsável da arborização urbana (Tree Cities Of The World, 2024). Em 2024, o programa identificou 171 municípios que adotam práticas exemplares de conservação eficiente de coberturas arbóreas e florestais em áreas urbanizadas, destacando-se o Brasil com 20 localidades (Agência Cidades, 2025).

A distribuição nacional inclui predominância paulista (8 cidades), seguida pelo Paraná (6), Rio de Janeiro (2) e representatividade singular em estados como Alagoas, Mato Grosso do Sul, Ceará, Paraíba e Pernambuco (Tree Cities Of The World, 2024). Esses dados demonstram relevância quantitativa, ao evidenciar indicadores deficitários na qualidade da

arborização urbana. Tal assertiva fundamenta-se no contexto territorial brasileiro, composto por 26 estados e 5.570 municípios, dos quais apenas 8 unidades federativas implementaram sistemas consolidados de arborização urbana sustentável (IBGE, 2022).

Essa realidade reflete a existência de planejamento e gestão urbana integrada nos estados mencionados, uma vez que pesquisas recentes identificaram a disponibilidade de manuais técnicos de arborização urbana robustos em suas jurisdições. Como exemplo paradigmático, o *Manual para Elaboração do Plano Municipal de Arborização Urbana de Curitiba-PR* destaca que o planejamento arbóreo em vias públicas constitui uma estratégia fundamental (MPE, 2018). O manual ainda destaca que esse planejamento é de suma importância, mesmo em municípios com diretrizes urbanísticas consolidadas.

No contexto urbano de Recife-PE, ao analisar o Manual de Arborização Urbana, o planejamento arbóreo assume caráter fundamental (SDSMA, 2017). O manual destaca que a seleção de espécies vegetais, alinhada às características ambientais, visa minimizar a ocorrência de interferências antagônicas com infraestruturas urbanas, como redes elétricas e mobiliário urbano. Essa estratégia, além de otimizar o desenvolvimento vegetal, contribui para a redução sistemática de riscos associados à convivência entre a arborização e os elementos construídos (SDSMA, 2017).

Para o estado de Minas Gerais, o *Manual de Arborização de Belo Horizonte* enfatiza que o planejamento da arborização urbana constitui pressuposto fundamental para a gestão pública integrada, exigindo a atuação coordenada de um órgão gestor especializado (CEMIG, 2011). Já o *Manual Técnico de Arborização Urbana de São Paulo* mostra que a seleção criteriosa de espécies arbóreas, aliada à análise geoespacial do local de implantação, otimiza as condições ecofisiológicas (SVMA, 2024). O manual ainda ressalta que essas ações acabam mitigando potenciais riscos de acidentes associados à queda de árvores.

Conforme Oliveira et al. (2017), o planejamento da arborização urbana demanda seleção criteriosa de espécies vegetais, visando garantir sua eficácia funcional em horizontes temporais distintos. Os autores ainda ressaltam que, caso esse objetivo não seja alcançado, a avaliação técnica surge como recurso para mapear a condição arbórea e apontar falhas passíveis de correção. Com isso, as geotecnologias vêm como instrumentos fundamentais para a execução de mapeamentos técnicos e elaboração de propostas estratégicas (Kane; Ryan, 1998; Castro; Dias; Amanajás et al., 2016).

Kane e Ryan (1998), em seu trabalho, mostram que uma integração dos Sistemas de Posicionamento Global (GPS), associada à aerofotogrametria, imagens orbitais e Sistemas de Informação Geográfica (SIG), possibilita correlacionar a quantidade de espécimes arbóreas.

Além disso, o SIG viabiliza a representação georreferenciada de informações em diferentes escalas de precisão (Lima Neto, 2011; Lima Neto; Biondi, 2012).

Sendo assim, as atividades de planejamento ambiental são cada vez mais realizadas em SIG, com simulação da realidade espacial, integração de dados geoespaciais e geração de representações cartográficas via técnicas de geoprocessamento (Castro; Dias; Amanajás et al., 2016). Logo, as geotecnologias podem contribuir de forma efetiva para a gestão e monitoramento do risco de queda de árvores no meio urbano, uma vez que, através do geoprocessamento, é possível espacializar e quantificar números de ocorrências relacionados a ameaças e quedas de indivíduos arbóreos e, com isso, determinar zonas de intervenções.

Essa espacialização dos dados fica evidente no trabalho de Schuch (2006), em que o geoprocessamento é estabelecido como o conjunto de ferramentas tecnológicas que articulam etapas de coleta, tratamento e aplicação de dados vinculados ao ambiente geográfico. Essa interação do comportamento das árvores, somada a processos oriundos das geotecnologias, ajuda a estabelecer uma gestão das florestas urbanas mais eficiente. Além disso, a construção dessas informações fica disponibilizada de forma digital, contribuindo, assim, para a reutilização dos dados por tempo indeterminado.

Conforme Silva et al. (2016), mesmo com a execução de levantamentos in loco e inventário das espécies arbóreas registradas em tabelas físicas, essas informações tendem a se tornar desatualizadas em poucos anos, comprometendo o acompanhamento do estado fitossanitário. Os autores ainda abordam a limitação funcional de mapas convencionais sem o uso de SIG, já que a falta de integração automatizada entre dados espaciais e análises tabulares compromete a eficiência das análises.

Essa ferramenta se torna estratégica para análises ambientais urbanas integradas, permitindo, de modo ágil, avaliações que fundamentam o planejamento territorial e direcionam a gestão da arborização urbana (Fonseca et al., 2014). Sendo assim, essa digitalização de informações contribui não apenas para otimizar a gestão e o monitoramento da arborização urbana, mas também para promover a redução de custos operacionais na administração municipal (Castro et al., 2016).

Nesse contexto, a utilização do geoprocessamento para estabelecer áreas prioritárias, criando zonas de intervenções e adequando o manejo das árvores, vem se tornando primordial para saber quando e onde realizar ações silviculturais. Logo, a cidade de Maceió, assim como outras cidades do Brasil, não apresenta um Zoneamento do Risco de Queda de Árvores (ZRQA), ferramenta fundamental para mitigações de risco associados a danos

florestais urbanos. Com isso, a definição dessas áreas passa a ser a primeira parte de todo o planejamento arbóreo, para evitar erros nos tratamentos culturais.

Conforme Pereira et al. (2011), as intervenções de poda são frequentemente realizadas de forma inadequada, como no corte em formato “U”, prática que compromete o equilíbrio estrutural das árvores e eleva sua vulnerabilidade a quedas. Assim, para Kovacs et al. (2013), a criação de zonas de intervenção deve ser respaldada por simulações que avaliem custos de manejo — como podas e remoções — contra benefícios tangíveis para redução de acidentes e melhoria da qualidade de vida. Essas tomadas de decisão partem do pressuposto de garantir a eficiência no uso de recursos públicos, algo fundamental e um dos objetivos da criação do Zoneamento de Risco de Queda de Árvores (ZRQA).

Sendo assim, a definição dessas zonas para intervenções silviculturais em Maceió, como proposto neste estudo, alinha-se às recomendações de Coleman et al. (2022), que defendem a integração de tecnologias geoespaciais e critérios de equidade socioambiental. Os autores ainda ressaltam que esse tipo de abordagem geoespacial serve para otimizar a gestão de riscos em áreas urbanas. Desse modo, a divisão do território de Maceió servirá para que se mostre qual tipo de intervenção será abordada em determinada localidade.

De acordo com Mendonça et al. (2007), a criação de zoneamentos consiste na segmentação de um território em áreas homogêneas, com atributos fisiográficos e ecológicos equivalentes, nas quais são definidos usos permitidos e restritos, conforme diretrizes técnicas preestabelecidas. Conforme Santos, Lima e Santana (2024), existem vários mecanismos de gestão ambiental. Os autores falam do Zoneamento Ambiental (ZA), que visa regulamentar a ocupação territorial e fomentar a preservação de ecossistemas. Observa-se, porém, carência de pesquisas direcionadas ao Zoneamento do Risco de Queda de Árvores (ZRQA) como abordagem específica (Santos; Lima; Santana, 2024).

Somado a isso, o zoneamento de riscos via geoprocessamento permite direcionar recursos para áreas prioritárias, alinhando-se a políticas públicas de prevenção de acidentes. Koeser et al. (2016) destacaram que a gestão proativa, como podas preventivas e remoção de árvores deterioradas, reduz custos a longo prazo. Outro ponto é a integração dos dados sobre defeitos estruturais via imagens de satélite e proximidade de alvos críticos, através de SIG, para mapear zonas prioritárias em Maceió.

Segundo Koeser et al. (2015), a gravidade de defeitos estruturais, como apodrecimento interno, e a proximidade de alvos (veículos, estruturas) são os principais fatores que influenciam a percepção de risco. Portanto, de acordo com Santos, Lima e Santana (2024), a escassez de estudos técnicos e publicações sobre o tema evidencia a urgência de suprir essa

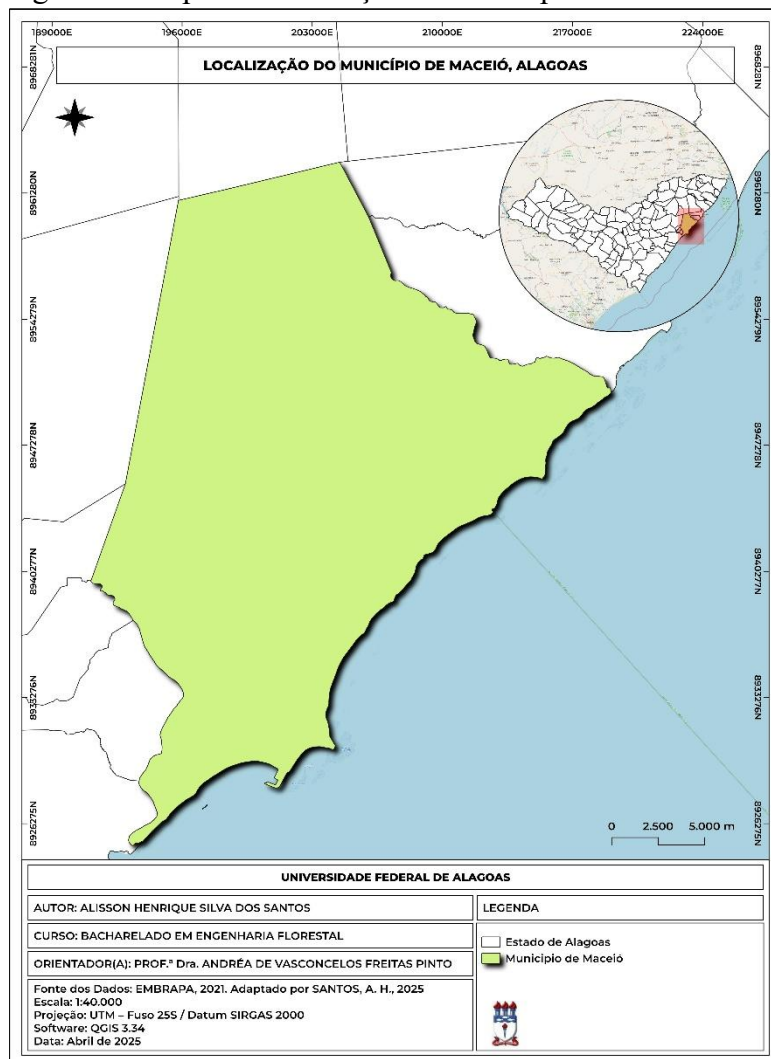
deficiência no âmbito científico, especialmente diante da relevância da segurança coletiva e da conservação ambiental.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O presente estudo foi realizado durante os **meses de janeiro a março de 2025** em Maceió, capital de Alagoas, que situa na zona costeira do Nordeste brasileiro, nas coordenadas 9°39'S de latitude e 35°44'O de longitude (Figura 1). O município abrange uma extensão territorial de 503,07 km², distribuída em 193,34 km² de zona urbana, 285,47 km² de área rural e 23,26 km² de áreas lagunares (Júnior et al., 2021).

Figura 1 - Mapa de localização do município de Maceió



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

O clima predominante é o tropical úmido, caracterizado por elevadas temperaturas anuais e estação chuvosa concentrada entre abril e agosto (Santos; Lima; Santana, 2024). Conforme Marengo et al. (2018), a precipitação anual média na região oscila entre 1.400 mm e 1.500 mm, com maior concentração entre abril e julho. Os autores ainda abordam a ocorrência de secas prolongadas monitoradas nas últimas décadas, associadas ao aumento na frequência de crises hídricas, e episódios de precipitação extrema que desencadeiam desastres como enchentes.

A média térmica anual em Maceió registra 24,2 °C durante o período de estiagem, enquanto na estação pluviométrica as temperaturas variam entre 22,4 °C e 25,5 °C (Nascimento et al., 2018). A cobertura vegetal da região investigada caracteriza-se como Floresta Ombrófila Densa, com velocidade média mensal dos ventos durante eventos mais críticos podendo atingir até 10 m/s, predominantemente na direção nordeste (Santos; Lima; Santana, 2024).

Conforme Parahyba et al. (2008), os solos predominantes na região são profundos a muito profundos e de textura argilosa, classificados como Latossolos e Argissolos. O estudo ainda aborda que sua variabilidade ambiental e potencial de uso está diretamente associada à morfologia do relevo, que varia desde áreas planas até zonas de forte ondulação.

3.2 Coleta e preparação de dados

Foram utilizados dados secundários disponibilizados pela Defesa Civil de Maceió (DCM), referentes ao período de 2021 a 2024. Esses dados estão organizados em planilhas do *Microsoft Excel* e incluem as seguintes variáveis: ano da ocorrência, bairro e coordenadas geográficas (latitude e longitude).

Inicialmente, os dados foram tratados e padronizados no *Microsoft Excel*, com o objetivo de garantir a integridade das informações e viabilizar sua importação para um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Esse processo incluiu a verificação de duplicidades, padronização dos nomes dos bairros e validação das coordenadas geográficas fornecidas.

Os dados foram importados para o software *QGIS* (versão 3.34), onde foram convertidos em um arquivo vetorial do tipo *shapefile* (.shp). Essa conversão possibilitou a visualização espacial dos registros, permitindo a construção de uma camada de pontos georreferenciados, representando os locais de ocorrência de quedas e ameaças de queda de árvores em cada bairro no município.

Com a camada de bairros utilizada como base poligonal, foi aplicada a ferramenta "**Contagem de pontos em polígonos**" do *QGIS* para contabilizar as ocorrências por bairro, separando os registros de queda de árvores e de ameaças. Posteriormente, foi realizada uma manipulação gradual desses dados por meio da simbologia do *QGIS*.

Para os casos de queda de árvores, foram definidas cinco classes, com intervalos personalizados de valores mínimo e máximo, permitindo diferenciar os bairros conforme o número de ocorrências. Já para as ameaças de queda, foram estabelecidas seis classes, também com base em faixas específicas de ocorrência.

Na queda de árvores, foram estabelecidos limiares entre 0 a 0, sendo os demais valores atribuídos a 5, somando-se ao limiar máximo da classe anterior; gerando assim as categorias Sem Ocorrência (0 – 0), Baixa (0 – 5), Moderada (5 – 10), Alta (10 – 15) e Muito Alta (> 15). Para ameaças, seguiu-se o mesmo critério, porém com ajustes da inclusão de mais uma categoria (categoria muito baixa), uma vez que o número de ocorrências de ameaças é significativamente maior que o de quedas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparativo das quedas de árvores identificadas pelo zoneamento (2021 a 2022)

O zoneamento para o risco de queda de árvores realizado para a cidade de Maceió identificou bairros de grande importância em infraestrutura, arborização urbana, densidade demográfica e circulação de veículos e pedestres. A análise comparativa dos dados de risco de queda de árvores referentes aos anos de 2021 e 2022 revelou mudanças nas categorias de classificação dos bairros: sem ocorrência, baixa, moderada, alta e muito alta.

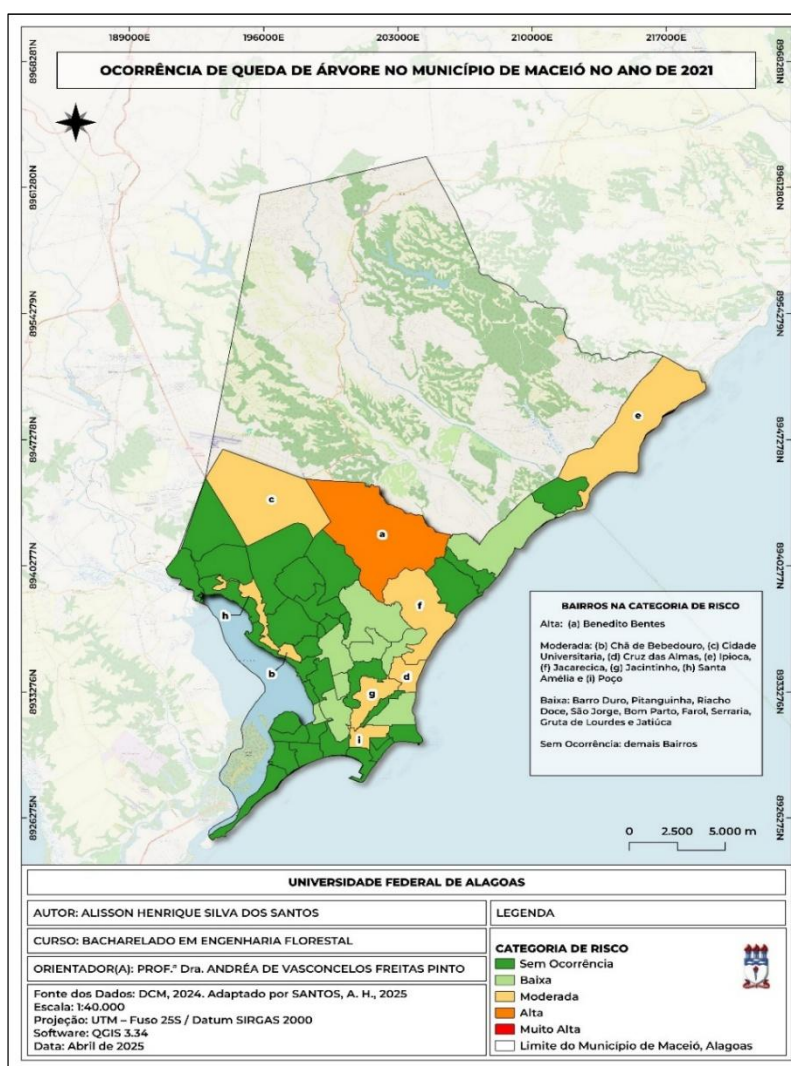
Em 2021, a categoria alta foi atribuída exclusivamente ao bairro Benedito Bentes, enquanto a moderada abrangeu oito bairros: Chã de Bebedouro, Cidade Universitária, Cruz das Almas, Ipioca, Jacarecica, Jacintinho, Santa Amélia e Poço. A categoria baixa incluiu nove bairros: Barro Duro, Pitanguinha, Riacho Doce, São Jorge, Bom Parto, Farol, Serraria, Gruta de Lourdes e Jatiúca (Figura 2). Em 2022, observou-se uma reestruturação significativa: Jatiúca ascendeu à categoria alta, substituindo Benedito Bentes, que foi rebaixado para moderada (Figura 3).

Esses dados evidenciam a relação com a precipitação pluviométrica ocorrida nesses anos. Segundo Emerick (2021), a queda de árvores ou colapso total durante eventos de ventos

intensos está frequentemente correlacionado com índices pluviométricos elevados, evidenciando a influência combinada desses fatores.

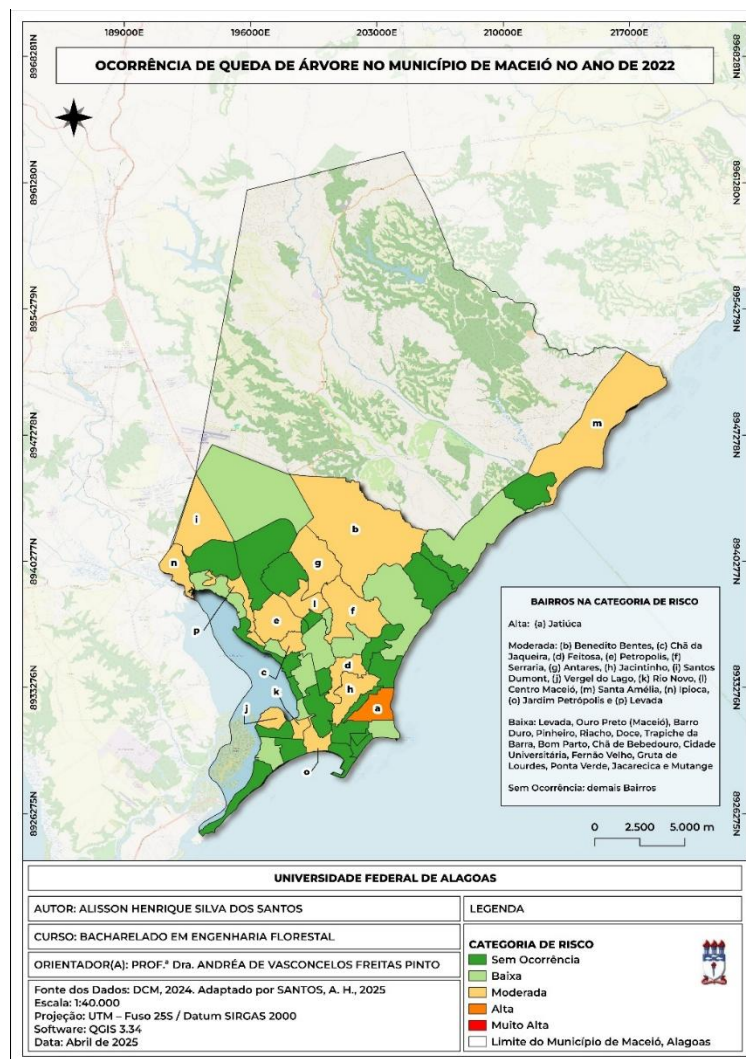
Outro ponto a destacar é que, o vento atua como agente climático relevante na modulação do crescimento e conformação estrutural das árvores, influenciando tanto os processos transpiratórios quanto as propriedades mecânicas do lenho (Ataíde et al., 2015). Essa dinâmica afeta diretamente a resistência dos troncos a tensões físicas externas, o que diminui a ancoragem no substrato do exemplar arbóreo.

Figura 2 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2021



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Figura 3 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2022



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Desse modo, dados da Defesa Civil de Maceió (DCM, 2024) confirmam esses fatores, uma vez que, entre os anos de 2021 a 2024, os meses mais críticos foram abril com 7 ocorrências (2021) e maio com 12 (2022) (Tabela 1).

Com isso, esse enquadramento de fatores se baseia no índice pluviométrico para cada mês dos respectivos anos. De acordo com dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2021), o esperado para o mês de abril de 2021 era de 207 mm; no entanto, ocorreu uma precipitação de 473,71 mm (Figura 4).

Vale ressaltar que, para o mesmo ano, o bairro que mais obteve registro de ocorrência devido à queda de árvores foi o Benedito Bentes, com 7 quedas. Isso se deu pelo fato de a estação pluviométrica da região registrar, para aquele ano, um acumulado de 515,87 mm de chuva para o mês (Tabela 1 e Figura 4).

Somado a isso, as estações pluviométricas localizadas no bairro Tabuleiro do Martins registraram um acúmulo de 602,68 mm (Estação 1, Figura 4) e 524,18 mm (Estação 2, Figura 4). Esses dados são relevantes para compreender a influência da chuva na queda dos indivíduos arbóreos, haja vista que os bairros estão próximos geograficamente, o que pode ter influenciado significativamente no colapso das árvores.

Dentro desse cenário, o trabalho de Emerick (2021) mostra que, em 25 de outubro de 2019, o município de Viçosa foi atingido por precipitação intensa e ventanias, com registro de rajadas de 82,4 km/h e acumulado pluviométrico de 67,0 mm. A autora ainda aborda que, em cinco horas, o volume total alcançou 112,4 mm, superando a média mensal, havendo, assim, impactos de queda de árvores, postes e estruturas urbanas, evidenciando a magnitude do evento.

Outrossim, Cavalari et al. (2024) falam que, no estado de São Paulo, o período entre 2016 e 2018, correspondente à estação chuvosa, registrou a maior incidência de quedas de árvores. Os pesquisadores hipotetizaram que a saturação hídrica do solo, decorrente de precipitações intensas, pode comprometer a estabilidade do sistema radicular. Logo, essa probabilidade abordada pode ser ocasionada por danos no sistema radicular através da compactação do solo provocada pela impermeabilização da pavimentação.

Desse modo, Li et al. (2019) destacam que a combinação de ventos e chuvas intensas é um fator crítico para a instabilidade de árvores em ambientes urbanos tropicais. Os autores explicam que a elevada precipitação mensal (> 100 mm) reduz a rigidez e a resistência do solo devido à infiltração de água, comprometendo a capacidade de suporte do sistema radicular das árvores.

Zanella, Sales e Abreu (2009), falam que eventos com maior impacto territorial estão associados a precipitações máximas iguais ou superiores a 60 mm em 24 horas. O estudo ainda aborda que esse limiar pluviométrico constitui um indicador crítico para desencadear danos significativos na malha urbana.

Nesse contexto, em Maceió, a queda ou o tombamento integral de árvores ocorre frequentemente durante ventos intensos, frequentemente potencializados por elevados volumes pluviométricos. O período em que ocorrem mais quedas está relacionado aos meses que compõem a fase úmida, que começa em abril e vai até agosto. Dados midiáticos sobre o colapso de árvores de grande porte destacam que, geralmente, em menos de 24 horas, no período úmido, a capital alagoana costuma registrar precipitação de mais de 40 mm (G1 AL, 2024).

Complementarmente, Moser et al. (2010) destacam que essa associação entre ventos fortes e precipitação intensa amplifica significativamente os riscos de danos à infraestrutura urbana e à segurança pública.

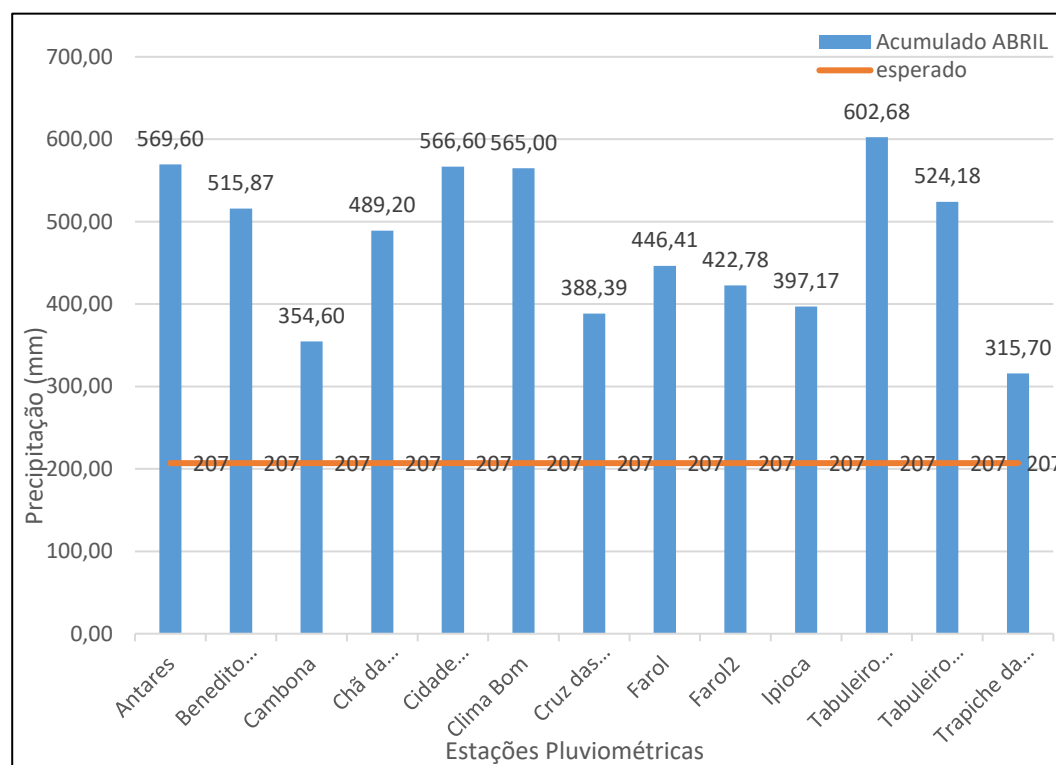
Tabela 1 - Análise dos meses com mais ocorrências por ano (2021 - 2022)

Meses críticos por ano

Ano	Mês com mais ocorrências	Nº de ocorrências
2021	Abril	7
2022	Maio	12

Fonte: DCM (2024) adaptado pelo autor (2025)

Figura 4 - Precipitação para o mês de abril de 2021



Fonte: INMET (2021) adaptado pelo autor (2025)

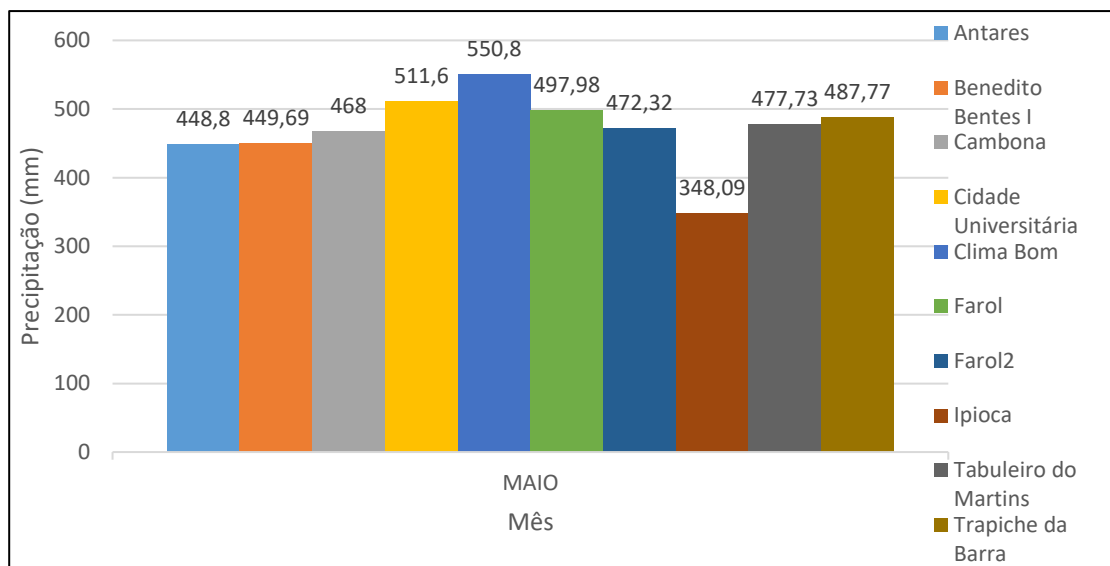
Correlacionando os fatos, para o ano de 2022, o mês de maio foi o que mais ocorreu queda de indivíduos arbóreos, apresentando 12 registros de ocorrência. Dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022) mostram um índice pluviométrico mensal de 471,28 mm (Figura 5). Logo, ao comparar o período úmido de 2021 com o de 2022, os valores de

precipitação se caracterizaram como eventos extremos, tendo em vista que a estação úmida de Maceió começa em abril com término em agosto.

Essa afirmação se dá pelo índice pluviométrico entre os meses de janeiro a março de 2021, que apresentaram uma precipitação mensal de 59,56 mm para janeiro, 41 mm para fevereiro e 192 mm para março, conforme a Figura 6 (DCM, 2021). Logo, ao chegar no período úmido, o mês de abril – início do período – apresentou 473,71 mm, e, para o mês de maio, a precipitação caiu para 264,32 mm de chuva, conforme mostra a Figura 7 (INMET, 2021; DCM, 2021). Além disso, junho apresentou 308,93 mm, seguido por julho com 209,96 mm e agosto com 278,94 mm (Figura 7).

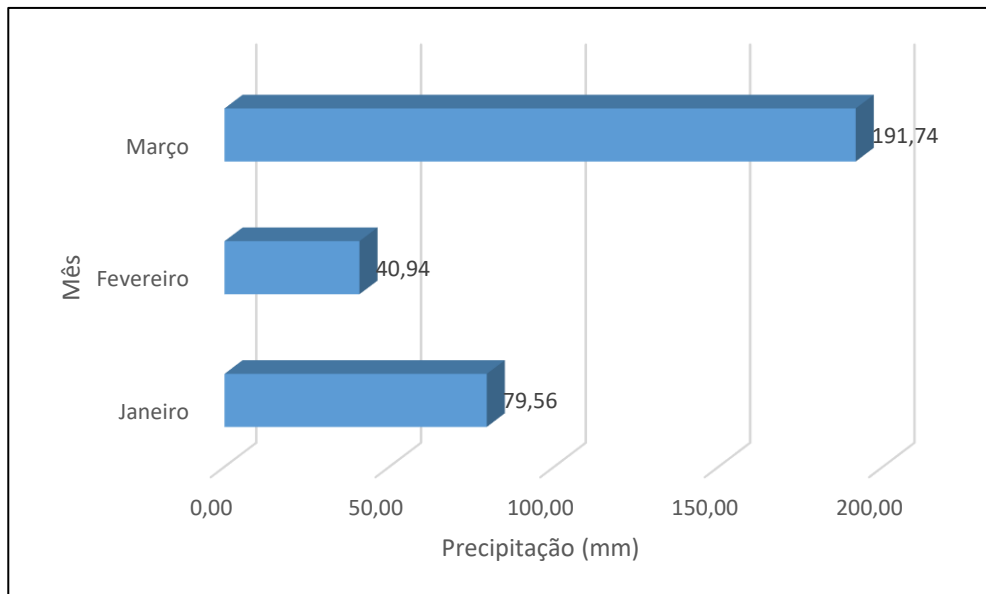
Essa desuniformidade de distribuição pluviométrica, enfatizada na Figura 7, mostra os eventos meteorológicos extremos que afetam a capital alagoana, que, ao comparar com o período úmido de 2022, evidencia essa alteração.

Figura 5 - Precipitação para o mês de abril de 2022



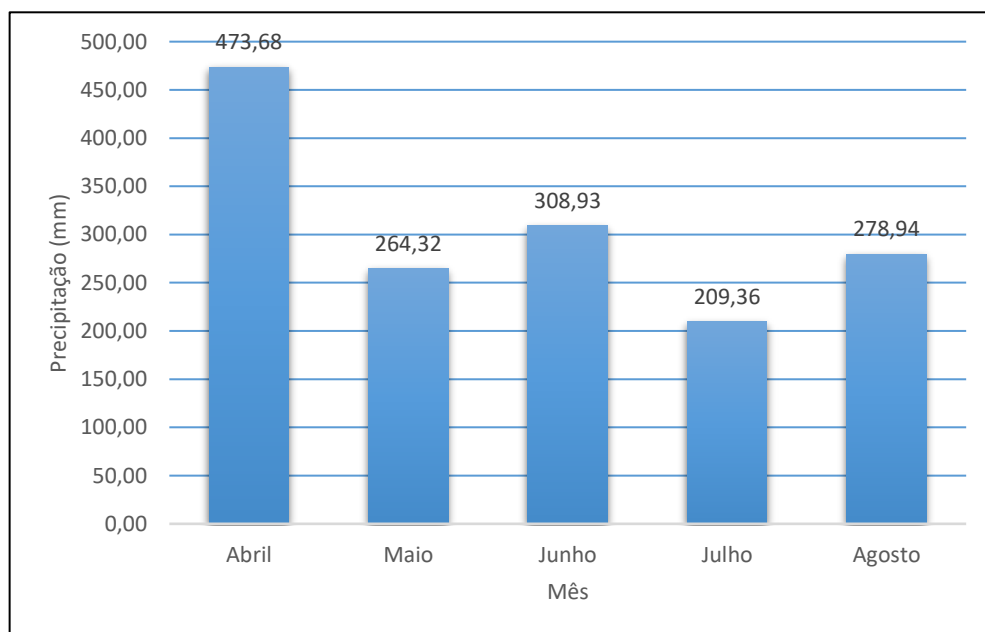
Fonte: INMET (2022) adaptado pelo autor (2025)

Figura 6 - Precipitação para os meses de janeiro a março de 2021



Fonte: DCM (2021) adaptado pelo autor (2025)

Figura 7 - Precipitação mensal do período úmido de Maceió para o ano de 2021



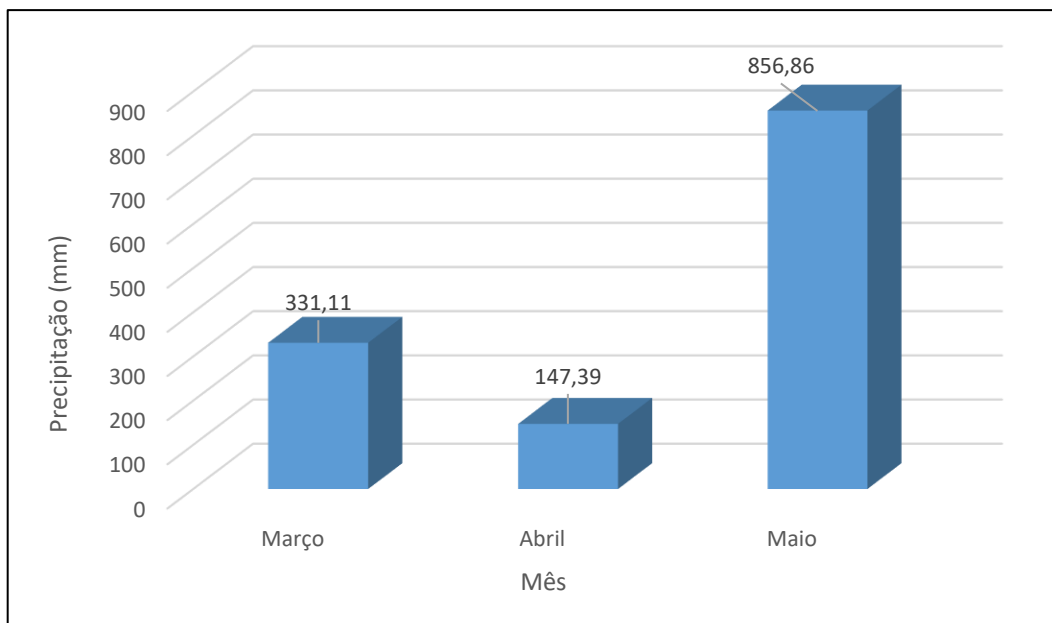
Fonte: DCM (2021) adaptado pelo autor (2025)

Em 2022, o período úmido foi antecipado para o mês de março, com uma precipitação de 331,11 mm, seguido por abril (147,39 mm) e maio (856,86 mm de chuva), conforme a Figura 8 (INMET, 2022). Dessa forma, fica evidente a ocorrência de eventos hidrometeorológicos extremos e como essas alterações impactam diretamente na queda de árvores, uma vez que, em abril de 2021, caíram 7 árvores, enquanto em maio de 2022, o número quase dobrou, com 12 indivíduos arbóreos colapsando durante o período úmido de Maceió.

Nesse contexto, Aragão e Duarte (2023) destacam que o Nordeste Brasileiro (NEB), embora historicamente associado a secas prolongadas e escassez hídrica, tem gerado preocupação devido ao aumento na frequência de desastres hidrometeorológicos extremos. Vale ressaltar que, segundo Correa, Lima e Coutinho (2019), os maiores volumes de precipitação durante esses eventos no NEB ocorrem em áreas litorâneas, incluindo a maioria das capitais da região.

Assim sendo, Sampaio et al. (2010) e Pereira et al. (2011) enfatizam que fenômenos climáticos extremos, como tempestades e ventanias intensas, comprometem a estabilidade estrutural da arborização urbana. Além disso, os autores abordam que a queda de galhos ou o colapso total de espécimes arbóreas resultam em danos materiais significativos.

Figura 8 - Precipitação para o período úmido de 2022



Fonte: INMET (2022) adaptado pelo autor (2025)

Para o zoneamento da ameaça de queda de árvore, a espacialização dos dados se apresentaram de forma diferente. No caso de 2021, o bairro Benedito Bentes foi classificado na categoria Muito Alta (Figura 9). Já Jacintinho e Chã da Jaqueira ficaram na categoria Alta, seguidos pelo Centro de Maceió e Feitosa, classificados como Moderada (Figura 9).

Em 2022, Benedito Bentes foi rebaixado para Alta. Jacintinho migrou para Moderada, e Petrópolis entrou nessa mesma categoria. Feitosa, Antares, Chã da Jaqueira e Poço foram classificados como Baixa, enquanto o Centro de Maceió foi listado como Sem Ocorrência (Figura 10). Pesquisas recentes mostram que a classificação para o risco de quedas de árvores para os bairros de Maceió foi segmentada em cinco níveis de risco: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Além disso, a maior parcela do território analisado apresenta classificações de baixa ou muito baixa periculosidade, enquanto áreas de risco moderado a muito alto se concentram nas regiões centrais e adjacentes.

Santos, Lima e Santana (2024) mostram que os bairros Feitosa e Bom Parto estão classificados como categoria muito alta. Vergel do Lago, Ponta Grossa, Trapiche da Barra, Jacintinho, Poço e Ponta da Terra foram classificados como categoria alta. Logo, ao comparar esses dados com o zoneamento de ameaças e de queda de árvores desenvolvido neste trabalho, foram observadas diferenças significativas.

Feitosa apresenta uma discrepância notável entre as duas análises. No trabalho atual, o bairro foi classificado na categoria Baixa em 2022, enquanto no estudo de Santos, Lima e Santana (2024), Feitosa foi reclassificado para Muito Alta. Essa mudança na avaliação do risco de queda de árvores pode ser atribuída à densidade demográfica do bairro Feitosa, uma vez que uma das variáveis do estudo publicado para inferir o risco foi a densidade populacional dos bairros.

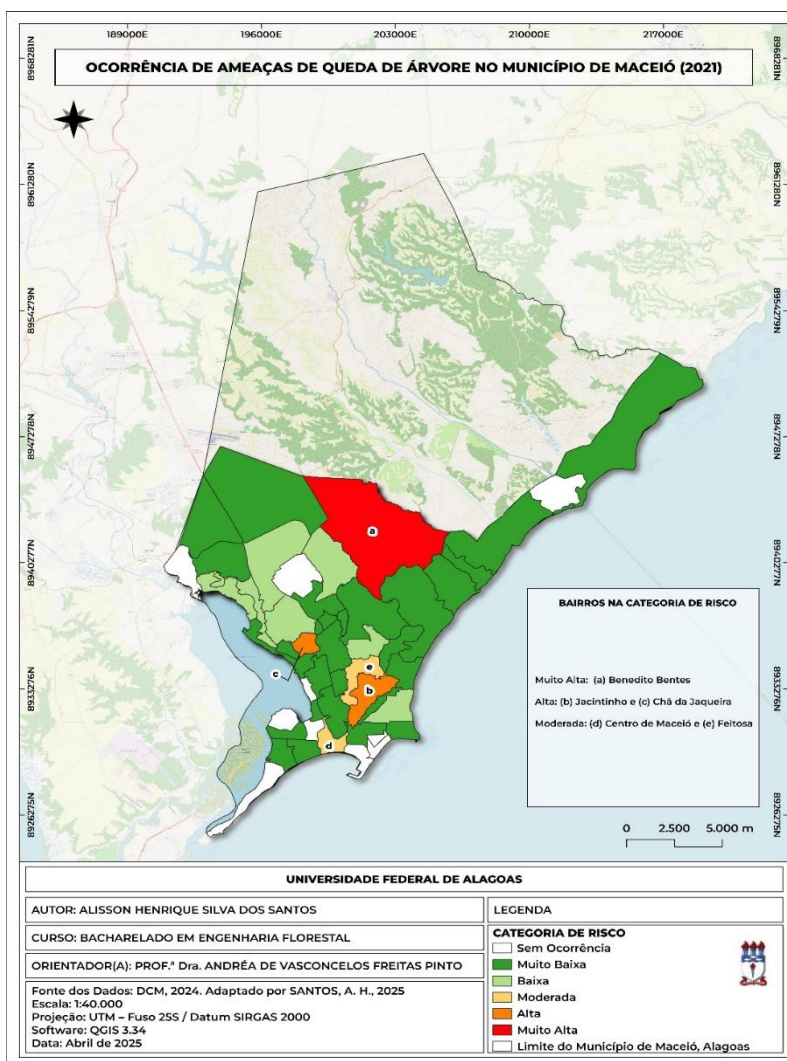
Por outro lado, Jacintinho manteve a mesma classificação em ambas as análises, sendo categorizado como moderada. Poço apresenta uma mudança em sua categoria de risco. Nessa pesquisa, o bairro foi classificado como Baixa em 2022, mas reclassificado para moderada no trabalho de Santos, Lima e Santana (2024). Essa mudança indica, novamente, a influência da densidade demográfica e, possivelmente, dos efeitos dos ventos.

Conforme o Plano de Adaptação a Mudanças Climáticas de Maceió (MACEIÓ, 2024), os ventos que incidem com maior frequência sobre o município são predominantemente originários do quadrante leste, embora os ventos alísios de sudeste (SE) registrem maior constância. Dentro do plano, observou-se que, ao longo do ano, os ventos de nordeste (NE) predominam no período seco (janeiro a março) (MACEIÓ, 2024). Além disso, os autores

complementam que a velocidade média anual desses ventos na cidade é de 2,8 m/s, indicando padrões climáticos estáveis, porém sujeitos a variações sazonais (MACEIÓ, 2024).

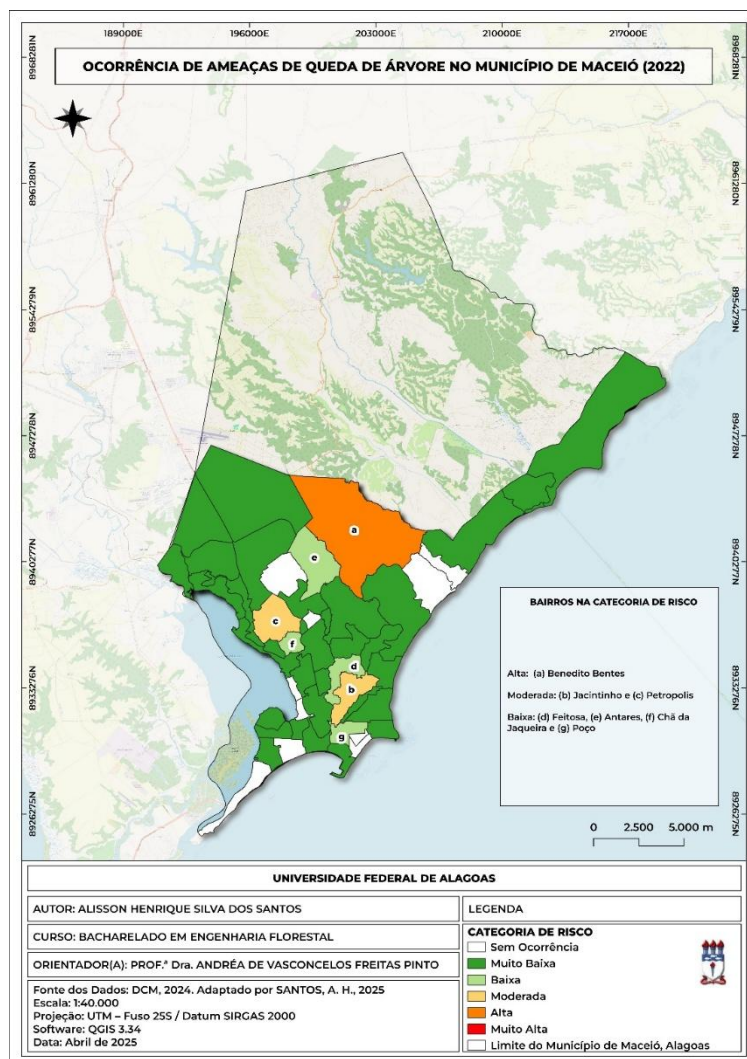
Mendes (2026) afirma que ventos com intensidade de 7 m s^{-1} são suficientes para comprometer a estabilidade de árvores urbanas, resultando em quedas. Além disso, segundo Ataíde et al. (2015), rajadas de vento intensas, embora ocorram em breves intervalos de tempo, são capazes de gerar danos severos à vegetação arbórea. Os autores complementam que esse efeito decorre das elevadas velocidades atingidas, mesmo em eventos de curta duração.

Figura 9 - Zoneamento do risco de ameaças de queda de árvore para o ano de 2021



Fonte: DCM, 2021 adaptado pelo autor (2025)

Figura 10 - Zoneamento do risco de ameaças de queda de árvore para o ano de 2022



Fonte: DCM, 2022 adaptado pelo autor (2025)

Diante disso, é possível inferir que, através das mudanças sazonais que o município enfrenta – já expostas nesta pesquisa –, as categorias de risco são modificadas por esses eventos, principalmente em bairros próximos à região costeira, como o Poço. Por exemplo, Petrópolis foi classificado como moderada no trabalho atual, mas não foi citado no estudo de Santos, Lima e Santana (2024). Da mesma forma, Benedito Bentes foi classificado como Alta em 2022, porém também não foi incluído na análise de Santos, Lima e Santana (2024).

Isso indica que, ao longo dos dois anos analisados, o Registro de Ocorrência de ameaças de quedas de árvores e quedas registradas contribui significativamente para mapear o risco de colapso dos exemplares arbóreos nos bairros.

4.2 Comparativo das quedas de árvores identificadas pelo zoneamento (2023 a 2024)

Diferentes dos anos de 2021 e 2022, os anos de 2023 e 2024 se mostraram distintos quanto ao risco iminente de quedas de árvores no município de Maceió. Conforme ilustra a Tabela 2, no ano de 2023, o mês com maior incidência de quedas foram maio (8 ocorrências). Por outro lado, em 2024, o mês crítico foi novembro, com 6 quedas registradas (DCM, 2023; DCM, 2024).

A análise comparativa dos dados de risco de queda de árvores no município de Maceió, referente aos anos de 2023 e 2024, revelou dinâmicas significativas na distribuição das categorias de risco. Em 2023, a categoria moderada incluiu quatro bairros: Farol, Trapiche da Barra, Jacintinho e Jatiúca. Por sua vez, a categoria baixa destacou-se com onze bairros, como Benedito Bentes, Centro Maceió e Feitosa, enquanto a categoria alta não apresentou registros (Figura 11).

Já em 2024, a categoria moderada expandiu-se para oito bairros, incluindo novos como Chã da Jaqueira, Gruta de Lourdes, Pinheiro e Levada (Figura 12 e Tabela 3). Em contrapartida, a categoria baixa reduziu para nove bairros, com a saída de Ouro Preto e Pajuçara (Tabela 4). Essa alteração está diretamente relacionada à desuniformidade da distribuição pluviométrica do município, reforçando a influência de eventos climáticos extremos na dinâmica de risco urbano.

Nesse contexto, Cavalcante, da Silva e Brandão (2022) destacam que, embora exista a percepção de homogeneidade pluviométrica em Maceió – com suposta distribuição uniforme de chuvas entre os bairros –, há carência de mapeamento de áreas com padrões pluviométricos homogêneos. Além disso, os autores ressaltam a importância de identificar setores com elevada precipitação, visando subsidiar estratégias de prevenção a eventos extremos.

Ao analisar as Tabelas 3 e 4, observa-se que o período úmido de 2023 e 2024 em Maceió sofreu alterações significativas em comparação ao período úmido entre 2021 e 2022. Nas duas tabelas, fica claro que as mudanças nas categorias de risco entre os bairros tiveram influência direta do índice pluviométrico, como ilustra a Figura 14.

Por exemplo, a Figura 14 mostra a precipitação histórica para os períodos úmidos de 2021 a 2024. Os dados evidenciam, com veemência, variações anuais significativas: em 2023, o mês de maio registrou a maior precipitação (287 mm de chuva), enquanto, em 2024, o mesmo mês apresentou 262 mm. Essa relação entre precipitação e categorias de risco é reforçada pela Figura 15, que exibe a precipitação média dos períodos analisados. Nota-se,

assim, que os anos de 2021 e 2022 foram marcados por eventos extremos, os quais resultaram em um número maior de quedas de árvores em comparação a 2023 e 2024.

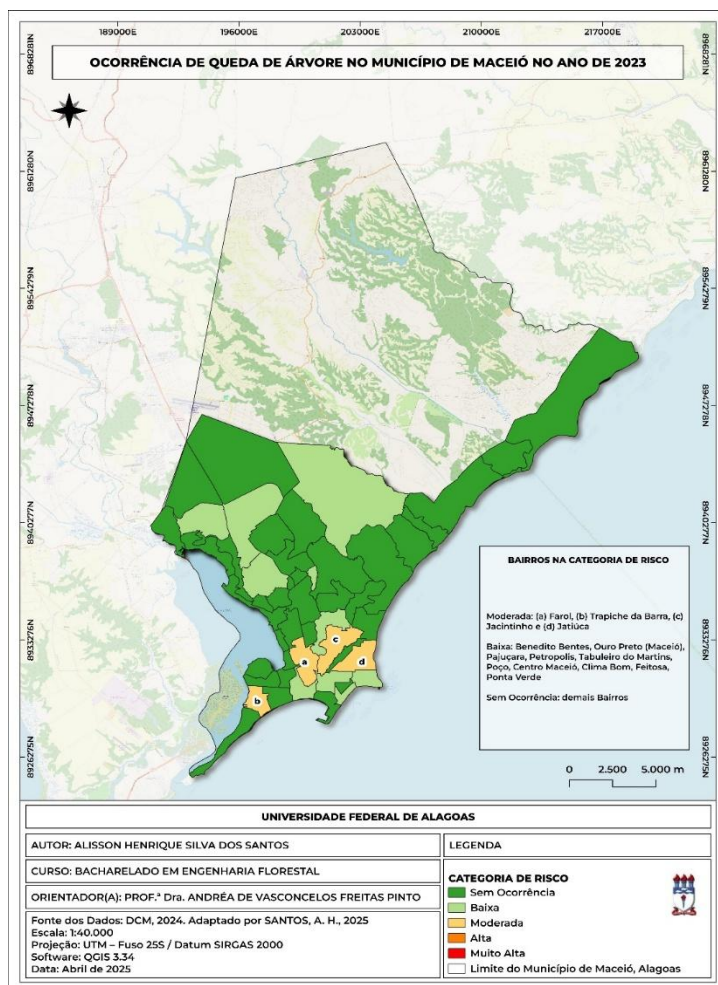
Tabela 2 - Análise dos meses com mais ocorrências de quedas de árvores por ano (2023 - 2024)

Meses críticos por Ano

Ano	Mês com mais ocorrências	Nº de ocorrências
2023	Maio	8
2024	Novembro	6

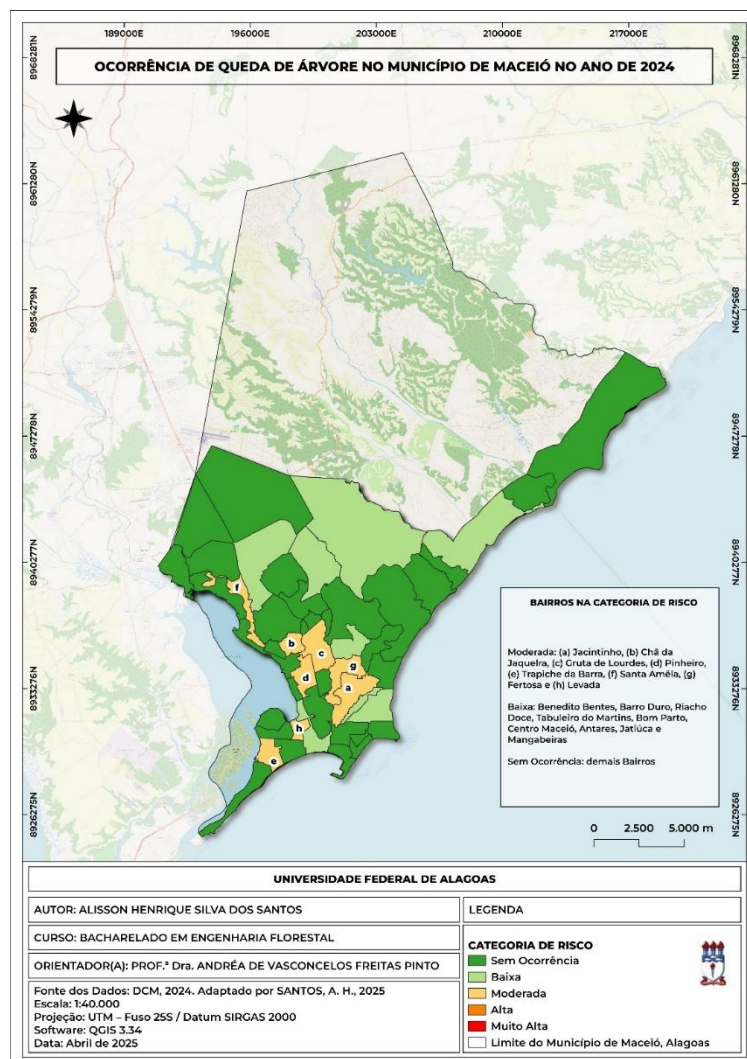
Fonte: DCM, 2023; DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

figura 11 - Zoneamento do risco de queda de árvore para o ano de 2023



Fonte: DCM, 2023 adaptado pelo autor (2025)

Figura 12 - Zoneamento do Risco de Queda de Árvore para o ano de 2024



Fonte: DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

Tabela 3 - Expansão da categoria moderada e redução da baixa em 2024

Bairro	Categoria (2024)	Quedas (2024)	Meses com Quedas
Chã da Jaqueira	Moderada	4	fevereiro (1), abril (2), novembro (1)
Gruta de Lourdes	Moderada	2	abril (1), outubro (1)
Pinheiro	Moderada	3	fevereiro (2), novembro (1)
Levada	Moderada	2	fevereiro (2)

Santa Amélia	Moderada	1	maio (1)
Feitosa	Moderada	2	fevereiro (1), dezembro (1)
Jacintinho	Moderada	5	fevereiro (2), abril (2), maio (1)
Trapiche da Barra	Moderada	3	fevereiro (2), novembro (1)

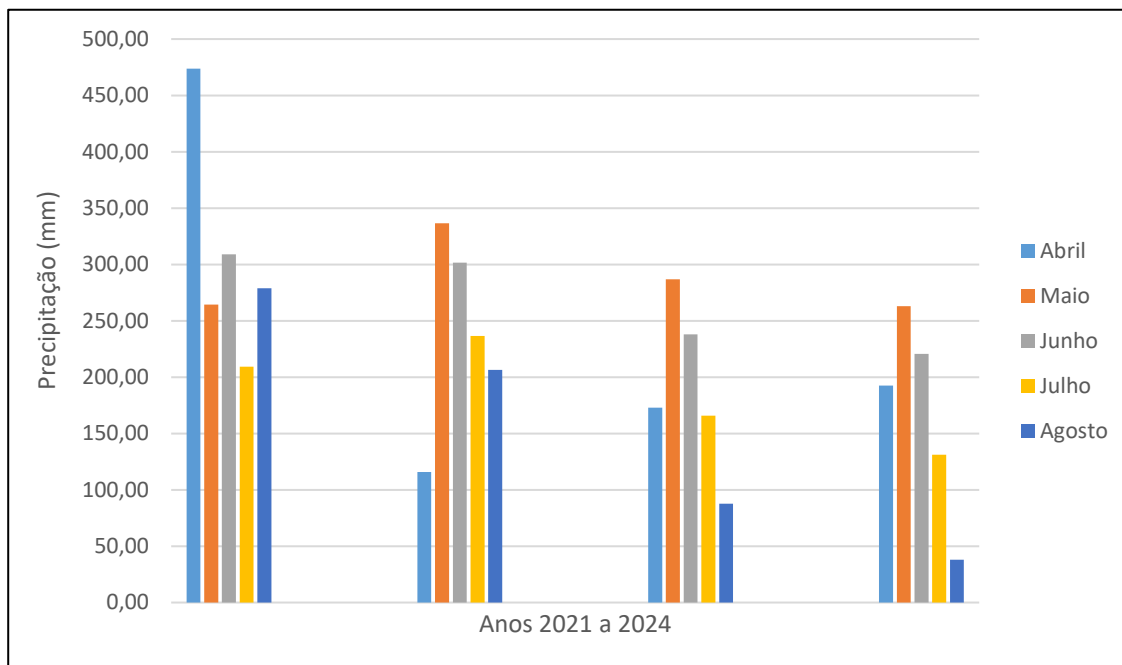
Fonte: DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

Tabela 4 - Bairros que permaneceram na categoria baixa em 2024

Bairro	Quedas (2023)	Quedas (2024)	Meses com Quedas (2024)
Tabuleiro do Martins	1	2	janeiro (1), junho (1)
Bom Parto	-	1	fevereiro (1)
Riacho Doce	-	1	fevereiro (1)
Barro Duro	-	2	julho (1), agosto (1)
Mangabeiras	-	2	abril (1), julho (1)
Antares	-	1	abril (1)
Centro Maceió	1	1	julho (1)
Benedito Bentes	1	1	abril (1)
Farol	3	1	fevereiro (1)

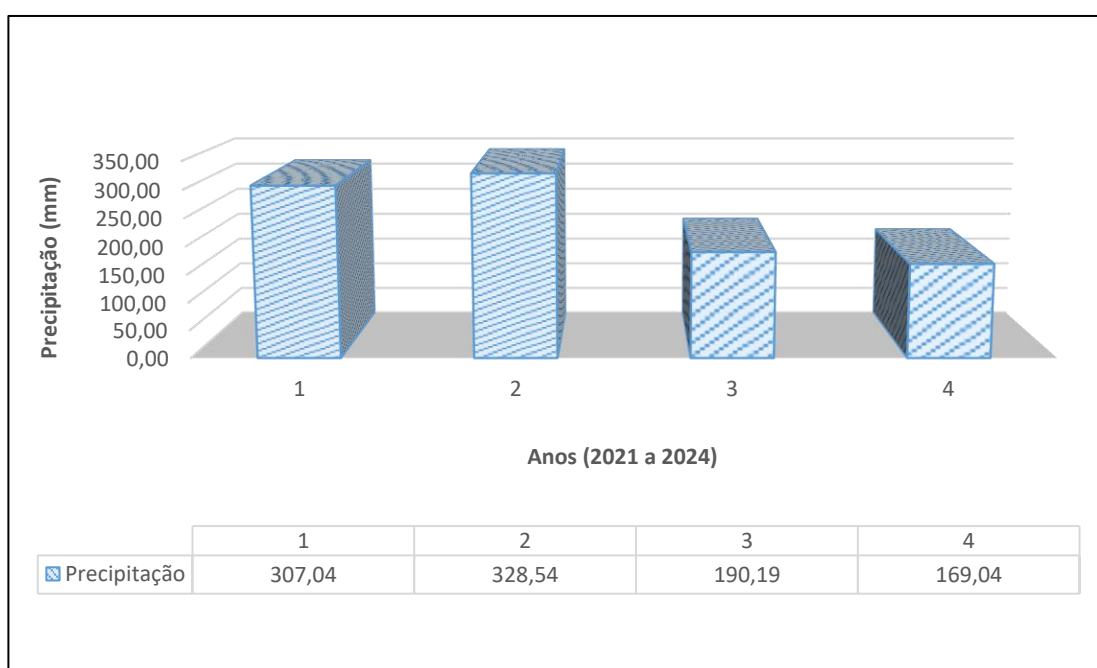
Fonte: DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

Figura 13 - Precipitação histórica dos meses do período úmido de Maceió entre 2021 a 2024



Fonte: DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

Figura 14 - Precipitação para o período úmido dos anos entre 2021 a 2024



Fonte: INMET, 2022; DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

A redução no número de indivíduos arbóreos colapsados em relação aos anos de 2021 e 2022 pode estar relacionada a danos estruturais nas árvores causados por eventos climáticos extremos. Conforme Emerick (2021), esses eventos danificam drasticamente exemplares arbóreos, podendo resultar em lesões irreversíveis.

Diante dessa problemática, mesmo com a precipitação média do período úmido de 2023 e 2024 ficando abaixo das de 2021 e 2022, a grande quantidade de chuva dos anos anteriores pode ter agravado o sistema radicular das árvores. Isso ocorre porque, segundo Seitz (2005), lesões ou injúrias na região basal do tronco constituem-se como indicadores relevantes de um sistema radicular comprometido, evidenciando fragilidades estruturais na sustentação da árvore.

Além disso, Meneghetti (2003) demonstrou em seu trabalho que quedas de exemplares arbóreos são causadas por diversos fatores; porém, fortes vendavais aliados a raízes danificadas ou lesões significativas podem resultar em quedas iminentes. Nesse contexto, Pereira (2018) atribui a queda de árvores à perda de vitalidade, uma vez que grande parte dos indivíduos arbóreos se encontra em idade avançada, sofrendo estresse ocasionado pelo ambiente urbanizado.

Assim, tais fenômenos contribuem de forma impactante para danos diretos na integridade arbórea (Gardner et al., 2013; Chirici et al., 2017; Tippner et al., 2019). Isso ocorre porque há indícios de tempestades catastróficas com ventos intensos, associadas às alterações climáticas, projetadas para os próximos anos (Seidl et al., 2014; Tippner et al., 2019), especialmente em climas tropicais, onde a queda de árvores urbanas ocorre predominantemente durante eventos meteorológicos extremos (Emerick, 2021).

Dessa forma, esses fenômenos intensificam a precipitação, comum nessas regiões, o que resulta na diminuição da rigidez e resistência do solo devido à infiltração hídrica, comprometendo a ancoragem das plantas (Gardner et al., 2013; Tippner et al., 2019; Emerick, 2021). Assim, a queda de árvores constitui uma ameaça significativa em ambientes urbanos e naturais, resultante da interação entre fatores bióticos, abióticos e antrópicos.

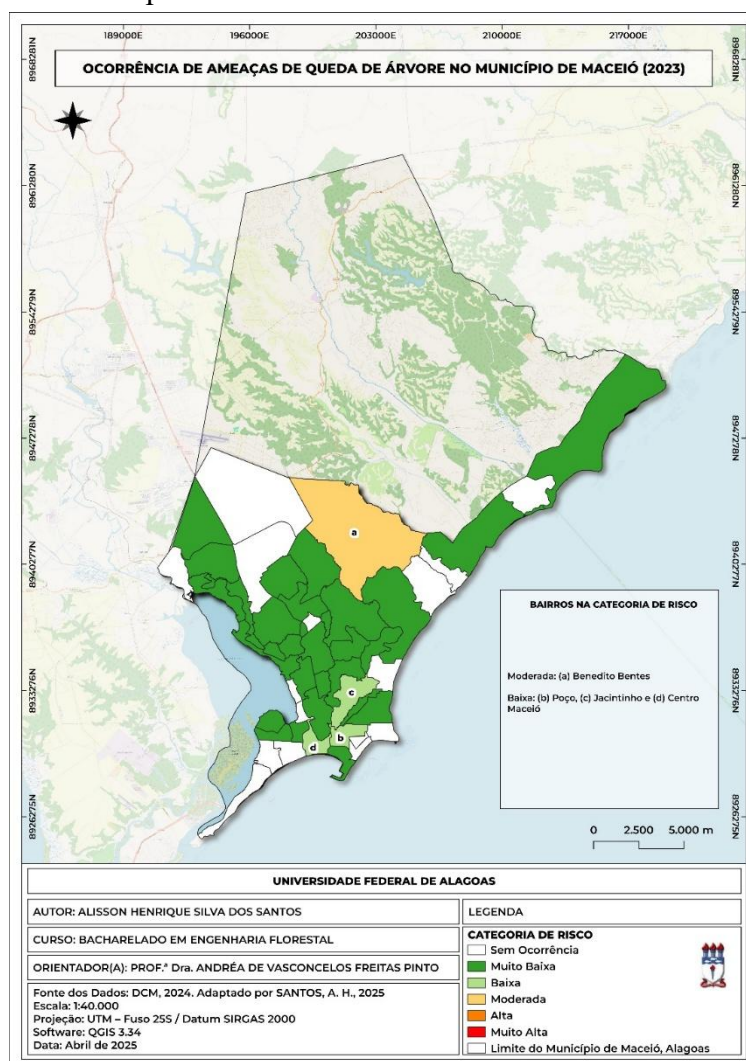
Biologicamente, o declínio fisiológico decorrente de doenças (podridões radiculares por *Armillaria* spp.), infestações de pragas (como brocas-do-tronco) e senescência natural comprometem a integridade estrutural dos indivíduos (Pokorny, 2003). A avaliação contínua desses elementos é essencial para prever falhas estruturais, exigindo abordagens multidisciplinares que integrem silvicultura, climatologia e ecologia urbana.

Em 2023, por exemplo, no zoneamento de ameaça de queda de árvores, Benedito Bentes foi reclassificado para a categoria Moderada, enquanto Jacintinho, Poço e Centro de Maceió

alcançaram a categoria Baixa. Por outro lado, a ausência de Petrópolis e Antares na classificação indica que esses bairros permaneceram na categoria Sem Ocorrência (Figura 15).

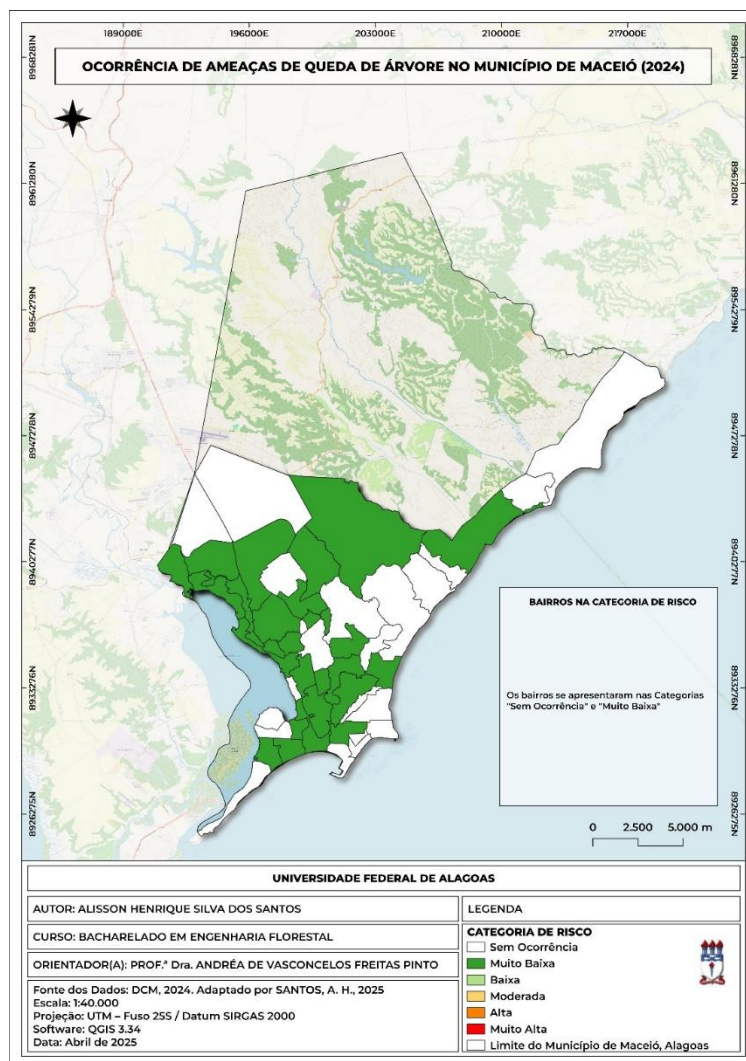
Como reflexo direto dessas condições, para 2024, todos os bairros foram categorizados como Sem Ocorrência ou Muito Baixa, evidenciando que os fatores que contribuem para a queda de árvores, debatidos nos zoneamentos de risco, foram os principais precursores para esse desfecho, uma vez que eventos climáticos extremos influenciam significativamente na queda dos indivíduos arbóreos (Figura 16).

Figura 15 - Zoneamento do Risco de Ameaças de Queda de Árvore para o ano de 2023



Fonte: DCM, 2023 adaptado pelo autor (2025)

Figura 16 - Zoneamento do Risco de Ameaças de Queda de Árvore para o ano de 2024



Fonte: DCM, 2024 adaptado pelo autor (2025)

Portanto, a interação multifatorial entre processos biológicos (declínio fisiológico, patógenos e pragas), condições ambientais extremas (precipitação intensa, saturação hídrica do solo, ventos) e ações antrópicas (intervenções inadequadas) configura a complexa etiologia da queda de árvores.

A mitigação efetiva desse fenômeno, evidenciada pela reclassificação positiva dos bairros de Maceió entre 2023 e 2024, demanda monitoramento sistemático e gestão adaptativa fundamentada na integração de indicadores de ameaça, corroborando a eficiência das estratégias de zoneamento de risco na prevenção de falhas estruturais.

5 CONCLUSÃO

Este estudo alcançou seu objetivo central de desenvolver um zoneamento de risco de queda de árvores em Maceió-AL, utilizando tecnologias geoespaciais para identificar áreas prioritárias de intervenção. Os resultados evidenciaram padrões críticos associados a fatores climáticos, oferecendo subsídios para políticas públicas mais eficazes.

A análise comparativa dos dados entre 2021 e 2024 revelou que eventos climáticos extremos, como chuvas intensas e ventanias, são determinantes para a instabilidade arbórea.

Bairros como Benedito Bentes, Jacintinho e Jatiúca destacaram-se como áreas críticas, com registros recorrentes de quedas, especialmente durante períodos úmidos.

A sazonalidade e a distribuição heterogênea da precipitação influenciaram diretamente a dinâmica de risco, evidenciando a necessidade de estratégias adaptativas frente às mudanças climáticas.

A comparação entre os zoneamentos apontou divergências nas classificações de risco, principalmente em bairros como Feitosa e Poço, onde fatores como densidade populacional e exposição a ventos costeiros podem potencializar a vulnerabilidade.

Essas discrepâncias reforçam a importância de integrar dados históricos de ocorrências, inventários arbóreos atualizados e critérios socioambientais para aprimorar a precisão das análises.

Assim, a pesquisa realizada neste estudo serve como um ponto de partida para futuras investigações e ações.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. R. DE ; BARBOSA, C. G. Diagnóstico da arborização urbana da cidade de Cacoal-RO. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 1, p. 61–81, 1 maio 2010.
- ALMEIDA, L. S. et al. Distribuição dos casos de infecção por vírus Zika vírus (ZIKV) na Região Metropolitana de Maceió. **Confins**, n. 41, p. 1–15, 8 ago. 2019.
- ANDRADE, E. DE L.; CALHEIROS, S. Q. C.; CONCEIÇÃO, D. N. DA. Áreas críticas à ocupação urbana sujeitas a deslizamento de terra na bacia hidrográfica do Riacho Reginaldo, Maceió-AL. **Revista Contexto Geográfico**, v. 3, n. 5, p. 01-11, 11 jan. 2019.
- ARAGÃO, M. L.; DUARTE, C. C. Dinâmica climática, eventos extremos e impactos associados no município do Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 2, p. 818–836, 3 abr. 2023.
- ATAÍDE, G. DA M. et al. Interação árvores e ventos: aspectos ecofisiológicos e silviculturais. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 2, p. 523–535, 30 jun. 2015.
- ATAIDE, P. S. DE et al. Estruturas verdes urbanas: uma revisão. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 9, p. 01-22, 16 set. 2024.
- BATISTA, E.; FERREIRA, T. A. Planejamento urbano e gestão de riscos : vida e morte nas cidades brasileiras. **Revista Olam Ciência e Tecnologia (UNESP)**, v. 10, n. 2, 1 jan. 2010.
- BELLANITH , V.-G.; MOLINA-PRIETO, L. F. Ficus benjamina L. in the cities: high number of individuals, severe damages to infrastructure and expensive economic losses. **ResearchGate**, v. 7, n. 13, p. 93–101, 30 jun. 2012.
- BERLAND, A. et al. The role of trees in urban stormwater management. **Landscape and urban planning**, v. 162, n. 162, p. 167–177, 1 jun. 2017.
- BOBROWSKI, R. **A avaliação de árvores e ações de manejo de risco**. Disponível em: <<https://anais.unicentro.br/sef/iisef/apresentacao.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- BRAZOLIN, S. et al. Associação entre fungos apodrecedores e cupins subterrâneos no processo de biodeterioração do lenho de árvores de Tipuana tipu (Benth.) O. Kuntze da cidade de São Paulo, SP. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 86, p. 215–224, 2010.
- CARMELO, S.; ELETROPAULO, A.; SEITZ, R. Diagnóstico das interferências de árvores na re- de de distribuição aérea de energia elétrica. **Centro de Gestão de Tecnologia e Informação**, abr. 2016.
- CARVALHO, L. A.; NOGUEIRA, J. F.; LEMOS, J. R. Inventário da arborização de um bairro da cidade de Parnaíba - Piauí, com a utilização de um Sistema de Informação Geográfica. **ResearchGate**, v. 18, n. 1, p. 100–118, 30 jul. 2016.
- CASTRO, J. M. L.; BOMFIM, I. A. S. Zoneamento das áreas verdes circundantes à escola Josefina Teixeira de Azevedo, em Guanambi - BA. **Geosaberes**, v. 10, n. 22, p. 125–135, set. 2019.

CAVALARI, A. A. et al. Predicting tree failure to define roles and guidelines in risk management, a case study in São Paulo / Brazil. **Urban forestry & urban greening**, v. 91, p. 128–181, jan. 2024.

CHIRICI, G. et al. Assessing forest windthrow damage using single-date, post-event airborne laser scanning data. **Forestry**, v. 91, n. 1, p. 27–37, 6 jul. 2017.

COLEMAN, A. F. et al. Street Tree Structure, Function, and Value: A Review of Scholarly Research (1997–2020). **Forests**, v. 13, n. 11, p. 1779, 27 out. 2022.

CORRADI, M. M. **Gestão digital de risco de queda de árvores e suas partes no parque Ibirapuera – São Paulo – SP**. Disponível em: <<https://rima.ufrrj.br/jspui/handle/20.500.14407/8774/simple-search?filterquery=Corradi%2C+Mariana+Marotti&filtername=author&filtertype>equals>>. Acesso em: 29 jan. 2025.

CORREA, J.; LIMA, K. C.; COUTINHO, M. D. L. Contribuição dos fluxos de umidade em evento de precipitação intensa ocorrido no leste do Nordeste do Brasil em maio de 2017: Um estudo de caso (Contribution of moisture flows in heavy rainfall event occurred in eastern Northeast Brazil in May 2017: A case study). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 5, p. 1703–1712, 15 jun. 2019.

COSTA, S. M. F. DA et al. Uma contribuição ao estudo da resiliência urbana das pequenas cidades do delta do Rio Amazonas: uma avaliação a partir da infraestrutura, da economia urbana e de aspectos sociais. **Ambiente Construído**, v. 23, n. 4, p. 25–41, 25 set. 2023.

CRANMER, N. et al. Tree Trimming Effects on 3-Dimensional Crown Structure and Tree Biomechanics: A Pilot Project. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 50, n. 6, p. 395–413, nov. 2024.

DUARTE, P. G. D. S. **Comparação de métodos de análises de risco de queda de árvores urbanas: eficiência técnica, ergonômica e econômica**. Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso Superior de Engenharia Florestal—Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR: [s.n.].

EGERER, M. et al. The challenges of urban street trees and how to overcome them. **Frontiers in Sustainable Cities**, v. 6, 30 maio 2024.

EMERICK, T. D. G. **Risco de queda de árvores urbanas: a associação entre os parâmetros da análise visual, tomogramas e ocorrência de queda**. Dissertação (mestrado)—Universidade Federal de Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 23 jun. 2021.

ESPÍRITO-SANTO, C. M. DO; SZLAFSZTEIN, C. F. Gestão de risco de desastres em planos diretores de três municípios da zona costeira do estado do Pará, Brasil. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 16, n. 2, p. 223–229, jun. 2016.

EWING, R.; DUMBAUGH, E. The Built Environment and Traffic Safety. **Journal of Planning Literature**, v. 23, n. 4, p. 347–367, maio 2009.

EXTRA. **Chuva provoca queda de árvore no Centro de Maceió**. Disponível em: <<https://ojornalextra.com.br/noticias/maceio/2024/04/103342-chuva-provoca-queda-de-arvore-no-centro-de-maceio>>. Acesso em: 1 fev. 2025.

FATHI, S.; BEJO, L.; DIVOS, F. Investigating the Effect of Weather and Seasonal Factors on Root Stability Using Dynamic Measurements. **Open Journal of Forestry**, v. 10, n. 01, p. 124–134, 2020.

FERREIRA, M. A. et al. Gestão de riscos de desastres socioambientais associados a chuvas: desafios de governança na metrópole de São Paulo. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 60, p. 736–756, 23 dez. 2022.

G1 AL. **Chuva provoca alagamentos e queda de árvores em Maceió**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2024/05/07/videos-mostram-alagamentos-provoados-pela-chuva-em-maceio-inmet-emite-alertas-para-regioes-de-al.ghml>>. Acesso em: 29 maio. 2025.

G1-AL. **Com chuva forte e ruas alagadas em Maceió, Defesa Civil alerta para perigo em áreas de risco**. Disponível em: <<https://g1.globo.com/al/alagoas/noticia/2024/04/14/chuva-maceio-ruas-alagadas.ghml>>. Acesso em: 1 fev. 2025.

GARCIAS, C. M.; FERENTZ, L. M. DA S.; PINHEIRO, E. G. A Resiliência como Instrumento de Análise da Gestão Municipal de Riscos e Desastres. **Redes**, v. 24, n. 2, p. 99–121, 3 maio 2019.

GASPERINI, STEFANIA; BENEDETTA ROATTI; MORELLI, G. Analysis of anatomic structures of trees in relation to uprooting behaviour: the case study of Pinus pinea. **ResearchGate**, p. 142–149, 19 out. 2016.

GRIMM, N. B. et al. Global Change and the Ecology of Cities. **Science**, v. 319, n. 5864, p. 756–760, 8 fev. 2008.

HILBERT, D. et al. Urban Tree Mortality: A Literature Review. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 45, n. 5, p. 167–200, 1 set. 2019.

IGNARRA, G. Estudo de dois métodos de amostragem para inventário da arborização de ruas dos bairros da orla marítima do município de Santos, SP. **USP**, 7 out. 2003.

JACKSON, T. D. et al. The motion of trees in the wind: a data synthesis. **Biogeosciences**, v. 18, n. 13, p. 4059–4072, 6 jul. 2021.

JAMES, K. Dynamic Loading of Trees. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 29, n. 3, p. 165–171, 1 maio 2003.

JAMES, K. R.; HARITOS, N.; ADES, P. K. Mechanical stability of trees under dynamic loads. **American Journal of Botany**, v. 93, n. 10, p. 1522–1530, 1 out. 2006.

JÚNIOR, J. F. DE O. et al. Climatologia da Chuva em Maceió: Aspectos Climáticos e Ambientais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 04, p. 2253–2264, 1 jan. 2021.

KANE, B.; RYAN III, H. D. Locating Trees Using a Geographic Information System and the Global Positioning System. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 24, n. 3, p. 135–143, 1 maio 1998.

- KANE, B.; WARREN, P. S.; LERMAN, S. B. A broad scale analysis of tree risk, mitigation and potential habitat for cavity-nesting birds. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 4, p. 1137–1146, 2015.
- KAUCHAKJE, S. et al. Gestão de riscos em áreas urbanas degradadas: tecnologia social e política urbana. **Revista Internacional de Desenvolvimento Local**, v. 7, n. 11, p. 95–102, set. 2005.
- KIM, Y.; RAHARDJO, H.; TSEN-TIENG, D. L. Stability analysis of laterally loaded trees based on tree-root-soil interaction. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 49, p. 1137–1146, mar. 2020.
- KLEIN, R. W. et al. Relationship between perceived and actual occupancy rates in urban settings. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 19, p. 194–201, set. 2016.
- KLUG, L. B. Resiliência e ecologia urbana. **Ipea.gov.br**, 2018.
- KOESER, A. et al. Frequency, Severity, and Detectability of Internal Trunk Decay of Street Tree *Quercus* spp. in Tampa, Florida, U.S. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 42, n. 4, 1 jul. 2016.
- KOESER, A. K. et al. Factors influencing urban tree planting program growth and survival in Florida, United States. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 13, n. 4, p. 655–661, 2014.
- KOESER, A. K. et al. Factors driving professional and public urban tree risk perception. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 14, n. 4, p. 968–974, 2015.
- KOESER, A. K.; SMILEY, E. T. Impact of assessor on tree risk assessment ratings and prescribed mitigation measures. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 24, p. 109–115, maio 2017.
- KOVACS, K. F. et al. The marginal cost of carbon abatement from planting street trees in New York City. **Ecological Economics**, v. 95, p. 1–10, nov. 2013.
- KUHNEN, A. Meio ambiente e vulnerabilidade a percepção ambiental de risco e o comportamento humano. **GEOGRAFIA (Londrina)**, v. 18, n. 2, p. 37–52, 20 dez. 2009.
- LI, Y. et al. CFD analyses of the wind drags on *Khaya Senegalensis* and *Eugenia Grandis*. **Urban forestry & urban greening**, v. 34, p. 29–43, 16 maio 2018.
- LI, Y.; RAHARDJO, H.; IRVINE, K. N. Effect of weather conditions on leans of one *Eugenia Grandis* tree in Singapore. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 43, p. 1–13, jul. 2019.
- LIMA NETO, E. M. D. **Aplicação do sistema de informações geográficas para o inventário da arborização de ruas de Curitiba, pr.** Dissertação (mestrado) - Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal—Universidade Federal do Paraná: [s.n.].
- LOPES, D. DA C. et al. **Gestão de riscos e desastres: contribuição da psicologia.** Florianópolis: CEPED, 2010. Disponível em:

<<https://antigo.mdr.gov.br/images/stories/ArquivosDefesaCivil/ArquivosPDF/publicacoes/gestao.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2023.

MANFRA, R. et al. Average height of surrounding buildings and district age are the main predictors of tree failure on the streets of São Paulo/Brazil. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 74, p. 1–8, ago. 2022.

MARENGO, J. A. et al. Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the semiarid Northeast Brazil region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 90, n. 2 suppl 1, p. 1973–1985, ago. 2018.

MAYER, C. L. D. **Análise de conflitos da arborização de vias públicas utilizando Sistemas De Informações Geográficas: caso Irati, Paraná**. Dissertação (mestrado) - Pós-Graduação em Ciências Florestais, área de concentração em Manejo Sustentável dos Recursos Florestais, área de atuação em Geotecnologias—UNICENTRO: [s.n.].

MEDEIRA, C. D. **Uso do Geoprocessamento no estudo da relação entre variáveis ambientais e volume de madeira em talhão de pinus elliottii em Dois Vizinhos-PR**. Trabalho de Conclusão de Curso—Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR: [s.n.].

MENDONÇA, G. S. et al. Uso de SIG no zoneamento agroecológico de pequena escala para Araucaria angustifolia, Hymenaea courbaril e Myrcarpus frondosus para a Bacia Hidrográfica do Rio Itapemirim - ES . **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p. 1741–1748, 21 mar. 2007.

MENEGHETTI, G. I. P. **Estudo de dois métodos de amostragem para inventário da arborização de ruas dos bairros da orla marítima do município de Santos, SP**. Dissertação (mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiro—Universidade de São Paulo: [s.n.].

MILANO , M.; DALCIN , E. **Arborização de vias públicas**. 1. ed. Rio de Janeiro: BIOSYS - Consultoria Ltda., 2000. p. 226p

MIRANDA, P. R. et al. Riesgo del arbolado urbano: estudio de caso en el Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Puebla. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 9, n. 45, p. 208–228, 26 jan. 2018.

MOORE, G. M. Wind-Thrown Trees: Storms or Management? **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 40, n. 2, 1 mar. 2014.

MOREIRA, R. Interface dos riscos urbanos: fundamentos, métodos e análises aplicadas a interdependências em infraestruturas. **Risco Revista de Pesquisa em Arquitetura e Urbanismo (Online)**, v. 22, n. 1, p. 1–18, 10 set. 2024.

MULLANEY, J.; LUCKE, T.; TRUEMAN, S. J. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 157–166, fev. 2015.

NASCIMENTO, M. C. DO et al. Análise da vulnerabilidade físico-ambiental causada pelas chuvas intensas na região metropolitana de Maceió. **Caminhos de Geografia**, v. 19, n. 67, p. 268–288, 22 out. 2018.

NETO, E. M. D. L. **Aplicação do Sistema de Informações Geográficas para o inventário da arborização de ruas de Curitiba, PR**. Dissertação (mestrado) - Pós Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias—Universidade Federal do Paraná: [s.n.].

NETO, E. M. L.; BIONDI, D. Detecção de árvores de ruas da cidade de Curitiba, PR, utilizando fotografias aéreas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 7, n. 4, p. 641–647, 5 dez. 2012.

NOGUEIRA, T. et al. Dinamica de uso e ocupacao territorial do perimetro urbano de Vilhena – Ro, utilizando geotecnologias. **Agrarian Academy**, v. 4, n. 7, p. 152–165, 31 jul. 2017.

NORTH, E. A. et al. The influence of sidewalk replacement on urban street tree growth. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 24, p. 116–124, maio 2017.

OLIVEIRA, L. M. DE et al. Diagnóstico da arborização nas calçadas de Gurupi, TO. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 12, n. 1, p. 105–105, 27 mar. 2017.

ONU, N. U. **ONU prevê que cidades abriguem 70% da população mundial até 2050**. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/02/1660701>>. Acesso em: 2 mar. 2025.

PEREIRA A. W. **Análise quali-quantitativa da arborização urbana de dois bairros do município do Rio de Janeiro por meio do Geoprocessamento**. Monografia—Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro: Universidade Federal do Paraná, 14 jun. 2018.

PEREIRA, P. H. et al. Estudo de caso do risco de queda de árvores urbanas em via pública na cidade de Dois Vizinhos-PR. **ResearchGate**, v. 6, n. 1, 8 jun. 2011.

PIRES, N. A. M. T. et al. A arborização urbana do município de Goiandira/GO – caracterização quali-quantitativa e propostas de manejo. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 3, p. 185–185, 30 set. 2010.

RODRIGUES, M. D. R. **Geoprocessamento aplicado a gestão de riscos de queda de árvores: estudo de caso em um bairro no município de Belém – PA**. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação—Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará: [s.n.].

SAMPAIO, A. C. F. et al. Avaliação de árvores de risco na arborização de vias públicas de Nova Olímpia, Paraná. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 2, p. 82–82, 10 jun. 2010.

SANTOS, A. H. S. DOS ; LIMA, T. A. S. L.; SANTANA , R. A. DE . **Uso do sensoriamento remoto aplicado ao zoneamento do risco de queda de árvores nos bairros de Maceió, Alagoas**. Anais. **Anais...** In: IV END - ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES DA ABRHIDRO. Curitiba/PR: ABRHidro, 2024. Disponível em: <<https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=16277>>. Acesso em: 2 fev. 2025

SANTOS, H.; CRISTINA, T.; VILHENA, V. A geotecnologia como ferramenta para o diagnóstico da arborização urbana: o caso de Macapá, Amapá. **Deleted Journal**, v. 38, p. 146–146, 12 dez. 2016.

SARTORI, R. A. et al. Urban forestry in the south area of Rio de Janeiro: the society, the species and the damage to urban infrastructure. **Rodriguésia**, v. 72, p. 1–10, 1 jan. 2021.

SARTORI, R. A.; BALDERI, A. P. Inventário da arborização urbana do município de Socorro – SP e proposta de um índice de danos à infra-estrutura das cidades. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 6, n. 4, p. 68–89, 15 dez. 2011.

SEIDL, R. et al. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 9, p. 806–810, 3 ago. 2014.

SHACKLETON, C. M. et al. Unpacking Pandora’s Box: Understanding and Categorising Ecosystem Disservices for Environmental Management and Human Wellbeing. **Ecosystems**, v. 19, n. 4, p. 587–600, 4 jan. 2015.

SILVA, D. C. DA; MORAES, B. C. DE. Avaliação de risco de queda de árvores no Museu Parque Seringal, no município de Ananindeua, Pará. **Even3 Publicações eBooks**, v. 1, n. 1, 1 jan. 2023.

SILVA, K. A. R. DA et al. Diagnóstico e uso de geoprocessamento para manejo da arborização urbana do bairro centro da cidade do Rio de Janeiro - RJ. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 11, n. 4, p. 98, 21 dez. 2016.

SILVEIRA, M. V.; CARDOSO, C. Promoção da cultura de prevenção de desastres. **Revista Ordem Pública**, v. 9, n. 1, p. 211–222, 26 abr. 2016.

TIPPNER, J. et al. Using 3D digital image correlation in an identification of defects of trees subjected to bending. **Urban forestry & urban greening**, v. 46, p. 126513–126513, 3 nov. 2019.

TOSCAN, M. A. G. et al. Inventário e análise da arborização do bairro Vila Yolanda, do município de Foz do Iguaçu – PR. **Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana**, v. 5, n. 3, p. 165–184, 30 set. 2010.

TRIBUNA INDEPENDENTE. **Maceió já registrou queda de 70 árvores durante chuvas das últimas semanas**. Disponível em:

<<https://tribunahoje.com/noticias/cidades/2017/06/20/69054-maceio-ja-registrou-queda-de-70-arvores-durante-chuvas-das-ultimas-semanas>>. Acesso em: 1 fev. 2025.

VAN HAAFTEN, M. et al. Understanding tree failure—A systematic review and meta-analysis. **PLOS ONE**, v. 16, n. 2, p. 1–23, 16 fev. 2021.

VARGAS-GARZÓN, B.; MOLINA-PRIETO, L. F. Ficus benjamina L. in the cities: high number of individuals, severe damages to infrastructure and expensive economic losses. **Revista nodo**, v. 7, n. 13, p. 93–101, 15 jun. 2012.

VOGT, J.; HAUER, R.; FISCHER, B. The Costs of Maintaining and Not Maintaining the Urban Forest: A Review of the Urban Forestry and Arboriculture Literature. **Arboriculture & Urban Forestry**, v. 41, n. 6, 1 nov. 2015.

WAY, T. L.; BALOGH, Z. J. The epidemiology of injuries related to falling trees and tree branches. **ANZ Journal of Surgery**, v. 92, n. 3, p. 477–480, 24 jan. 2022.

ZAMPARONI, C. G. Riscos e desastres naturais em ambiente urbano: o exemplo de Cuiabá/MT. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 10, n. 1, p. 1–14, 30 jun. 2012.