



**GOVERNO DO ESTADO DO CEARÁ
UNIVERSIDADE REGIONAL DO CARIRI – URCA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS E DA SAÚDE - CCBS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DIVERSIDADE BIOLÓGICA E RECURSOS
NATURAIS - PPGDR**

LEONARDO VITOR ALVES DA SILVA

**SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS PROPORCIONADOS PELA ARBORIZAÇÃO
URBANA DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: ESTOQUE E SEQUESTRO DE
CARBONO, PERCEPÇÃO E CONFORTO TÉRMICO**

**CRATO - CEARÁ
2025**

LEONARDO VITOR ALVES DA SILVA

**SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS PROPORCIONADOS PELA ARBORIZAÇÃO
URBANA DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: ESTOQUE E SEQUESTRO DE
CARBONO, PERCEPÇÃO E CONFORTO TÉRMICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em
Diversidade Biológica e Recursos Naturais da Universidade
Regional do Cariri-URCA, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Diversidade Biológica e
Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. João Tavares Calixto Júnior

CRATO - CEARÁ
2025

Eu, Leonardo Vitor Alves da Silva, autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha Catalográfica

Serviço de Biblioteca e Documentação da URCA/Campus Pimenta

Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais - PPGDR

Dados fornecidos pelo(a) autor

Alves Da Silva, Leonardo Vitor

L581s SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS PROPORCIONADOS PELA ARBORIZAÇÃO URBANA DE JUAZEIRO DO NORTE, CEARÁ: ESTOQUE E SEQUESTRO DE CARBONO, PERCEPÇÃO E CONFORTO TÉRMICO / Leonardo Vitor Alves Da Silva. CRATO - CE, 2025.

7 1p.

Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais da Universidade Regional do Cariri - URCA.

Orientador(a): Prof. Dr. João Tavares Calixto Júnior

1.Arborização, 2.Fitossociologia, 3.Microclima urbano, 4.Mudanças climáticas;
I.Título.

CDD: 570

Leonardo Vitor Alves da Silva

Serviços ecossistêmicos proporcionados pela arborização urbana de Juazeiro do Norte, Ceará: estoque e sequestro de carbono, percepção e conforto térmico. Dissertação do Mestrado em Diversidade Biológica e Recursos Naturais apresentada à Universidade Regional do Cariri – URCA, para obtenção do título de Mestre(a) em Diversidade Biológica e Recursos Naturais.

APROVADO(A) EM: 28/07/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. João Tavares Calixto Júnior (Orientador)
Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Dr. Janerson José Coelho (Membro interno)
Universidade Regional do Cariri – URCA

Prof. Dr. Francisco Edmar de Sousa Silva Pinheiro (Membro externo)
Universidade Regional do Cariri – URCA

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha companheira, Maria Amanda Nobre Lisboa, por todo seu amor, compreensão, paciência e por ser a fonte onde recarrego minhas forças todos os dias. Mulher digna de todo o meu amor e respeito. Eu te amo mais do que as palavras podem expressar!

À minha mãe, Valdineusa Alves de Barros Silva, mesmo à distância ela sempre acreditou e apoiou as minhas escolhas. Ao meu irmão, Daniel Vinicius Alves da Silva, por estar sempre disposto a me ajudar quando necessário.

Agradeço ao meu Orientador, Dr. João Tavares Calixto Júnior, pelo apoio, por todos os ensinamentos, desde a graduação, que foi de grande valor para meu desempenho acadêmico/profissional. Sou grato por tudo e sempre levarei seus ensinamentos comigo.

Ao Laboratório de Estudos da Flora Regional – LEFLORE, assim como toda a equipe: Maria Amanda Nobre Lisboa, Alana de Oliveira Silva, Sara Cardoso Ferreira da Silva, Mardonio Freitas Rodrigues Ferreira, Luana Aguiar Costa e em especial, Arthur da Silva Nascimento, por facilitar minhas idas a campo, sua ajuda constante, mesmo que com a promessa de uma merecida cerveja após o expediente, fez toda a diferença.

À Universidade Regional do Cariri – URCA, ao Programa de Pós-Graduação em Diversidade Biológica e Recursos Naturais – PPGDR, e à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FUNCAP, pelo apoio e pela concessão da bolsa ao longo de todo o curso.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, com este trabalho, meu mais sincero reconhecimento e gratidão.

Um verdadeiro mestre é um eterno aprendiz.

RESUMO

Desde a Revolução Industrial, as atividades humanas intensificaram as emissões de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o aquecimento global. Estudos recentes indicam que as temperaturas globais ultrapassaram 1,5°C de aquecimento, ameaçando a meta do Acordo de Paris de manter o aumento abaixo de 2°C. Esse fenômeno intensifica as Ilhas de Calor Urbanas (ICU), elevando as temperaturas nas cidades em comparação com regiões adjacentes. A arborização urbana emerge como solução baseada na natureza para mitigar os impactos climáticos, proporcionando múltiplos serviços ecossistêmicos, como redução da temperatura, captação de carbono e melhoria da qualidade do ar. Contudo, a distribuição desigual da vegetação urbana reflete disparidades socioeconômicas, sendo comumente inferior em áreas de menor renda, caracterizando o "efeito luxo". Diante desse contexto, este estudo investigou a relação entre flora lenhosa urbana e serviços ecossistêmicos em bairros com distintas condições socioeconômicas em Juazeiro do Norte, Ceará. O capítulo I analisou a diversidade, fitossociologia e potencial de sequestro de carbono das espécies lenhosas urbanas. O inventário foi realizado entre dezembro de 2023 e junho de 2024, incluindo indivíduos com DAP ≥ 5 cm e altura $\geq 1,5$ m. A quantificação do carbono foi feita por combustão em forno mufla e equações alométricas, considerando diferentes compartimentos vegetais. Os resultados apontaram diferenças na composição florística e no estoque de carbono entre os bairros, evidenciando a influência do status socioeconômico na cobertura arbórea. O estudo analisou 2.235 indivíduos arbóreos. A maioria das espécies (67,3%) são exóticas, com destaque para *Azadirachta indica*. Entre as nativas, *Enterolobium contortisiliquum* apresentou alto potencial de sequestro de CO₂ e contribuição para a biodiversidade. O teor de carbono variou entre 48,1% e 57,4%, e a matéria orgânica entre 82,7% e 98,8%, com maior concentração nos galhos. Diferenças na diversidade e densidade arbórea entre os bairros foram influenciadas por fatores socioeconômicos, evidenciando o efeito luxo. O capítulo II combina as pesquisas subjetivas com medições objetivas para avaliar o conforto térmico em vias urbanas. As variáveis meteorológicas de temperatura e umidade relativa foram monitoradas por meio de termo-higrômetro AKSO, modelo IBUTG - AK887 e no total foram aplicadas 600 entrevistas aos moradores (200 em cada bairro estudado). Os resultados deste estudo revelam que a cobertura arbórea demonstrou reduzir significativamente a temperatura do ar (1,53 °C a 2,35 °C) e aumentar a umidade relativa, especialmente no período da tarde, quando os índices de calor alcançaram níveis de "Cautela Extrema". Além disso, a percepção pública reforça a importância das árvores: 100% dos entrevistados reconheceram seu papel no sombreamento e mais de 90% relataram melhorias no bem-estar associadas à arborização. Observou-se, ainda, que fatores sociodemográficos influenciam essas percepções, com variações de acordo com faixa etária, gênero, escolaridade e classificação socioeconômica. A maioria dos participantes indicou a necessidade de mais árvores e planejamento estratégico, refletindo tanto reconhecimento quanto expectativa sobre os benefícios da arborização urbana. O estudo comprova que a arborização urbana reduz significativamente a temperatura, sendo essencial para mitigar o calor. A população reconhece seus benefícios, mas aponta desigualdades e demanda mais planejamento e equidade na gestão verde.

Palavras-chave: Arborização; Fitossociologia; Microclima urbano; Mudanças climáticas.

ABSTRACT

Since the Industrial Revolution, human activities have intensified greenhouse gas (GHG) emissions, contributing to global warming. Recent studies indicate that global temperatures have exceeded 1.5°C of warming, threatening the Paris Agreement's target. This phenomenon exacerbates Urban Heat Islands (UHIs), raising city temperatures compared to surrounding areas. Urban greening emerges as a nature-based solution to mitigate climate impacts, providing multiple ecosystem services such as temperature reduction, carbon sequestration, and air quality improvement. However, the unequal distribution of urban vegetation reflects socioeconomic disparities, often being lower in low-income areas, characterizing the "luxury effect". In this context, this study investigated the relationship between urban woody flora and ecosystem services in neighborhoods with different socioeconomic conditions in Juazeiro do Norte, Ceará. Chapter I analyzed the diversity, phytosociology, and carbon sequestration potential of urban woody species. The inventory was conducted between December 2023 and June 2024, including individuals with DBH ≥ 5 cm and height ≥ 1.5 m. Carbon quantification was performed through muffle furnace combustion and allometric equations, considering different plant compartments. The results revealed differences in floristic composition and carbon stock among neighborhoods, highlighting the influence of socioeconomic status on tree cover. The study analyzed 2,235 tree individuals. Most species (67.3%) were exotic, with *Azadirachta indica* being the most prevalent. Among native species, *Enterolobium contortisiliquum* showed a high CO₂ sequestration potential and contributed to biodiversity. Carbon content ranged from 48.1% to 57.4%, and organic matter from 82.7% to 98.8%, with higher concentrations in branches. Differences in tree diversity and density across neighborhoods were influenced by socioeconomic factors, reinforcing the luxury effect. Chapter II combines subjective surveys with objective measurements to assess thermal comfort in urban streetscapes. Meteorological variables—air temperature and relative humidity—were monitored using an AKSO thermo-hygrometer (model IBUTG - AK887), and a total of 600 interviews were conducted with residents (200 in each of the three studied neighborhoods). The results of this study reveal that tree canopy cover significantly reduced air temperature (by 1.53 °C to 2.35 °C) and increased relative humidity, particularly in the afternoon when heat index levels reached the "Extreme Caution" category. Furthermore, public perception reinforces the importance of trees: 100% of respondents acknowledged their role in providing shade, and over 90% reported improvements in well-being associated with urban vegetation. Sociodemographic factors were found to influence these perceptions, with variations observed across age groups, gender, educational levels, and socioeconomic classifications. Most participants indicated the need for more trees and strategic planning, reflecting both recognition of and expectations for the benefits of urban greening. This study demonstrates that urban arborization significantly reduces air temperature and is essential for mitigating urban heat. The population recognizes its benefits but also highlights inequalities and expresses a demand for more equitable and strategic green infrastructure management.

Keywords: Climate change; Phytosociology; Urban greening; Urban microclimate.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	13
METODOLOGIA	14
REFERÊNCIAS	22
RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
Artigo I: Estrutura e estoque de carbono de árvores de rua em bairros com disparidades socioeconômicas: um estudo de caso no semiárido do Nordeste do Brasil.....	24
Artigo II: Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana em cidade do semiárido brasileiro.....	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudo na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, onde examinamos a estrutura da vegetação lenhosa de três bairros.....	15
Figura 2. Formulário aplicado durante as entrevistas nos bairros estudados de Juazeiro do Norte, Ceará.....	21

Artigo I: Estrutura e estoque de carbono de árvores de rua em bairros com disparidades socioeconômicas: um estudo de caso no semiárido do Nordeste do Brasil.

Figura 1. Área de estudo na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, onde examinamos a estrutura da vegetação lenhosa de três bairros.....	27
Figura 2. Caracterização das vias urbanas em Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil. (A, B) Trechos próximos à estátua do Padre Cícero no Horto; (C, D) Condições das ruas no bairro Franciscanos; (E, F) Vias no bairro Lagoa Seca.....	28
Figura 3. Diagrama de Venn apresentando a distribuição de espécies lenhosas entre os bairros Horto, Franciscanos e Lagoa Seca, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.....	36
Figura 4. Relação entre altura e o diâmetro à altura do peito (DAP) nos três bairros analisados: Horto, Franciscanos e Lagoa Seca.....	41
Figura 5. Valores de matéria orgânica e teor de carbono nos compartimentos das espécies, analisados através de ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey.....	43
Figura 6. Valores de biomassa total (TPB), carbono total (CTPB) e sequestro de carbono (SC) captados pelos indivíduos arbóreos nos bairros estudados.....	44

Artigo II: Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana em cidade do semiárido brasileiro

Figura 1. Localização espacial e caracterização visual das áreas de estudo em Juazeiro do Norte, Ceará. As imagens 1 e 2 pertencem ao bairro Franciscanos, as imagens 3 e 4 ao Horto e 5 e 6 ao Lagoa Seca.....	54
Figura 2. Variação de temperatura, umidade e valores do índice de calor ao longo dos meses de estudo.....	58
Figura 3. Comparação da temperatura média do ar (°C) e umidade relativa (%) entre ruas não vegetadas (NVS) e vegetadas (VS) nos bairros Franciscanos, Horto e Lagoa Seca. As barras representam a média e as barras de erro indicam o desvio padrão (DP) dos dados coletados. O asterisco (*) denota uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre as condições NVS e VS dentro de cada local, determinada pelo teste post-hoc de Tukey após uma ANOVA de dois fatores.....	60
Figura 4. Gráfico de dispersão mostrando a relação entre temperatura e umidade, comparando ruas vegetadas (VS) e ruas não vegetadas (NVS) em cada ponto de amostragem.....	62
Figura 5. Distribuição da Densidade do Nível de Satisfação com a Arborização Urbana por Bairro em Juazeiro do Norte, Ceará.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Área total e a área das vias nos locais de estudo, em hectares e percentuais.....	16
Tabela 2. Níveis de alerta e suas consequências à saúde humana do índice de calor (IC).	20

Artigo I: Estrutura e estoque de carbono de árvores de rua em bairros com disparidades socioeconômicas: um estudo de caso no semiárido do Nordeste do Brasil.

Tabela 1. Área total e a área das vias nos locais de estudo, em hectares e percentuais.....	28
Tabela 2. Espécies registradas em bairros do sul do Ceará, Brasil. E = Exótica; N = Nativa; CS = Status de conservação das espécies; DD = Dados deficientes; NE = Não avaliada; LC = Pouco preocupante; VU = Vulnerável; NT = Quase ameaçada; H = Horto; F = Franciscanos; LS = Lagoa Seca.....	31
Tabela 3. Parâmetros fitossociológicos das 10 espécies presentes com os maiores IVI nos bairros estudados em Juazeiro do Norte, sul do Ceará, Brasil. Onde: DR = densidade relativa (%); FR = Frequência relativa (%); AB = Área Basal; DoR = Dominância Relativa (%) e IVI = Índice de Valor de Importância.....	38
Tabela 4. Médias dos valores de Matéria Orgânica (MO) e Teor de Carbono (TC) obtidos em cada espécie e compartimentos analisados.....	41

Artigo II: Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana em cidade do semiárido brasileiro

Tabela 1. Níveis de alerta e suas consequências à saúde humana do índice de calor (IC).	55
Tabela 2. ANCOVA para a relação entre temperatura e umidade dentro de cada ponto amostral. Indicando a variação entre as áreas com cobertura vegetal (VS) e sem cobertura vegetal (NVS). Df – Degrees of freedom; SSq – Sum of squares; MSq – Mean of squares; F – F-Statistics; P – Significance.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS E SIGLAS

AB – Área basal

ANCOVA – Análise de Covariância

ANOVA – Análise de Variância

BA – Biomassa arbórea

BVT – Biomassa vegetal total

C – Carbono

CBV – Carbono na biomassa

CS – Carbono sequestrado

DAP – Diâmetro a altura do peito

DD – Dados insuficiente

DoR – Dominância relativa

DR – Densidade relativa

E – Exótica

F – Franciscanos

FR - Frequência relativa

GEE – Gases de efeito estufa

H – Horto

HCDAL - Herbário Caririense Dárdano de Andrade Lima

IC – Índice de calor

ICU – Ilha de calor urbano

IVI – Índice de valor de importância

LC – Pouco preocupante

LS – Lagoa Seca.

MO – Matéria orgânica

N – Nativa

NE – Não avaliado

NT – Quase ameaçado

NVS – Ruas sem cobertura vegetal

TC – Teor de carbono

VS – Ruas com cobertura vegetal

VU – Vulnerável

INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, as atividades humanas têm intensificado as emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global (Park et al., 2024). A rápida urbanização agrava esse cenário ao alterar a cobertura do solo e comprometer a sustentabilidade ambiental (Santos et al., 2012; Castro; Alvin, 2024). McCulloch et al. (2024) indicam que as temperaturas globais já ultrapassaram 1,5°C de aquecimento, ameaçando a meta do Acordo de Paris de manter o aumento abaixo de 2°C. Esse aquecimento intensifica as Ilhas de Calor Urbanas (ICU), onde as temperaturas são significativamente mais elevadas do que nas áreas vizinhas (Park et al., 2021).

Com a expansão das populações urbanas e o agravamento da crise climática, a arborização urbana ganha destaque na pesquisa e nas políticas públicas, sendo considerada essencial para a sustentabilidade das cidades (Eisenman et al., 2024; Powning et al., 2024). O plantio de árvores nas vias urbanas é uma estratégia amplamente adotada para mitigar os impactos das mudanças climáticas, funcionando como infraestrutura viva que oferece múltiplos benefícios ambientais e sociais (Zhang; Brack, 2021).

Os serviços disponíveis dos ecossistemas são benefícios diretos e indiretos para o bem-estar humano tais como habitats, alimentos, água potável, qualidade do ar, regulação do clima e controle biológico de doenças (Mea, 2005; Souza et al., 2024). Esses serviços estão envolvidos em muitos processos diferentes que contribuem para manter a biodiversidade do ecossistema.

As árvores urbanas proporcionam uma gama diversificada de serviços ecossistêmicos que melhoram significativamente a qualidade de vida da população, incluindo a filtração de poluentes, a mitigação do efeito de ilha de calor e a captura e armazenamento de carbono, reduzindo os gases emitidos que causam o efeito estufa (Dean et al., 2024; Kim et al., 2024; Maleknia; Salehi, 2024; Ardoin; Bowers, 2025). Dada sua relevância, a gestão desses espaços recebe crescente atenção de formuladores de políticas e da sociedade, consolidando-se como uma solução baseada na natureza para os desafios urbanos contemporâneos (Laforteza et al., 2018; Day et al., 2022).

Entretanto, a distribuição, densidade, qualidade e diversidade das árvores urbanas não são equitativas nas cidades. Estudos apontam que o status socioeconômico influencia significativamente as disparidades na cobertura arbórea urbana, sendo comum que áreas de baixa renda apresentem menos árvores e de menor qualidade em comparação com

bairros mais abastados, caracterizando o fenômeno conhecido como "efeito luxo" (Hope et al., 2003; Galenieks, 2017; Anderson et al., 2023; Fang et al., 2023; Pena et al., 2024).

No Brasil, onde mais de 85% da população vive em áreas urbanas, a alta taxa de urbanização ressalta a necessidade de estratégias eficazes para mitigar seus impactos ambientais (IBGE, 2022). O crescimento acelerado das cidades gera desafios para a saúde, qualidade de vida e conservação da biodiversidade urbana, tornando essencial a adoção de soluções sustentáveis (Pinheiro et al., 2022; Crane; Kinzig, 2005; Zhao, 2023). Esse cenário é agravado pelo aumento das temperaturas. O ano de 2024 foi o mais quente no Brasil desde 1961, com uma temperatura média de 25°C (INMET, 2025). Os impactos desse aquecimento, como ilhas de calor urbanas que se formam através remoção da vegetação, que desencadeia uma série de processos ambientais e eventos climáticos extremos, reforçam a necessidade de soluções que tornem as cidades mais resilientes. Assim, a redução das emissões de carbono e o aumento do sequestro de carbono emergem como estratégias fundamentais para mitigar os efeitos do aquecimento global (Jiang et al., 2023). Nesse contexto, a ampliação da cobertura arbórea urbana pode desempenhar um papel essencial na melhoria das condições ambientais e na promoção do bem-estar das populações urbanas.

O primeiro artigo, intitulado “A relação da flora urbana com serviços ecossistêmicos em bairros com disparidades socioeconômicas: um modelo no Nordeste do Brasil”, buscou responder: qual o potencial de sequestro de carbono das espécies utilizadas na arborização urbana? Quais espécies são mais adequadas para a região e quais estratégias podem ser implementadas para equilibrar seus benefícios e mitigar o efeito luxo? Diante desse cenário, este estudo analisou a arborização urbana no interior do Ceará como elemento fundamental para a mitigação das mudanças climáticas, destacando a importância dessas áreas e seu potencial de sequestro de carbono.

O segundo artigo, intitulado “Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana em cidade do semiárido brasileiro”, teve como objetivo investigar o microclima nos bairros estudados e avaliar a percepção da população sobre o conforto térmico proporcionado pela arborização. A pesquisa busca compreender o impacto da vegetação sobre as condições climáticas locais e sua influência no bem-estar dos habitantes, fornecendo subsídios para otimização das características ambientais e promoção de cidades mais sustentáveis e adaptadas aos desafios climáticos atuais.

METODOLOGIA

Área de estudo

O estudo foi conduzido em três bairros na cidade de Juazeiro do Norte, localizado ao sul do estado do Ceará, no Nordeste do Brasil, sendo uma área metropolitana de grande importância na região semiárida brasileira. A cidade possui uma população de 286.120 habitantes em uma área de 258,788 km², com 51,44 km² de área urbanizada (IBGE, 2022). De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é caracterizado como BSh (Alvares et al., 2013). A área apresenta características de clima tropical quente, com a estação chuvosa de janeiro a abril e a estação seca de maio a dezembro, tendo precipitação média anual varia entre 900 e 1000 mm, tendo uma média de 925,1 mm (IPECE, 2017).

Para o estudo foram determinados os bairros Horto (coordenadas: 7°10'46.89"S 39°19'46.07"W), Franciscanos (7°12'46.44"S 39°18'47.26"W) e Lagoa Seca (7°14'39.87"S 39°19'19.58"W) (Figura 1).

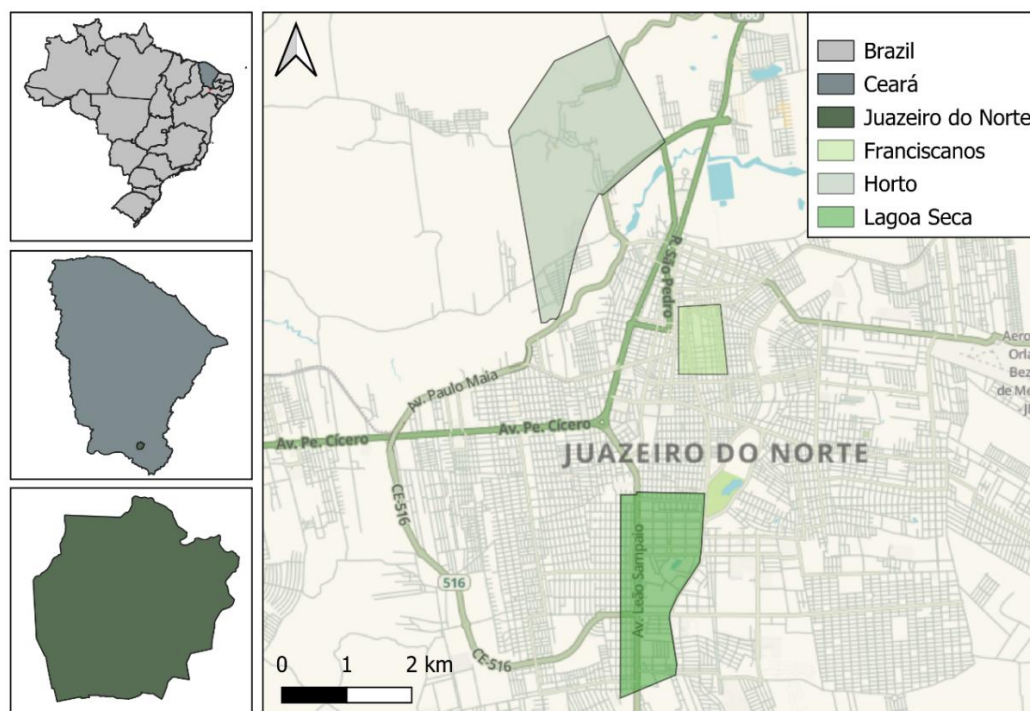


Figura 1. Área de estudo na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, onde examinamos a estrutura da vegetação lenhosa de três bairros.

Entretanto, a pesquisa está restrita às vias públicas, excluindo áreas como terrenos particulares, praças e demais espaços urbanos. Essa delimitação permite uma análise específica do contexto arbóreo e dos serviços ecossistêmicos associados às vias. A área correspondente às vias públicas foi calculada utilizando imagens de satélite e ferramentas de geoprocessamento (Tabela 1). Essa abordagem proporciona uma visão mais detalhada

da arborização urbana nos espaços viários, contribuindo para a avaliação dos serviços ecossistêmicos associados.

Tabela 1. Área total e a área das vias nos locais de estudo, em hectares e percentuais.

	Área total (ha)	Área das vias (ha)	Área das vias (%)
Horto	523,70	6,27	1,19%
Franciscanos	74,16	3,87	5,21%
Lagoa Seca	303,19	24,29	8,01%
Total	901,05	34,43	14,41

Os bairros desempenham um papel fundamental como espaços de convivência e sociabilidade, além de servirem como importantes pontos turísticos. O Horto se destaca por sua grande relevância cultural e religiosa. Apesar de sua importância simbólica, sua população é predominantemente de baixa renda. O bairro Franciscanos, um dos mais antigos e densamente povoados de Juazeiro do Norte, possui uma população majoritariamente de classe média, refletindo sua história e desenvolvimento urbano consolidado. Lagoa Seca é considerado um dos mais valorizados e modernos da cidade, com infraestrutura bem desenvolvida, atrai moradores das classes média e alta, consolidando-se como uma área de destaque no crescimento urbano de Juazeiro do Norte. A escolha desses bairros levou em consideração sua localização estratégica e suas características socioeconômicas.

Artigo I: Estrutura e estoque de carbono de árvores de rua em bairros com disparidades socioeconômicas: um estudo de caso no semiárido do Nordeste do Brasil.

Coleta de dados e análise

Foi realizado um inventário do tipo censo de dezembro de 2023 a junho de 2024, abrangendo indivíduos lenhosos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 5 cm e altura $\geq 1,5$ m. A identificação das espécies foi feita por consultas em literaturas especializadas, especialistas em taxonomia, comparação com material em herbários e com exsicatas do Herbário Caririense Dárdano de Andrade-Lima (HCDAL). As espécies foram classificadas conforme o sistema de classificação taxonômica do Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV, 2016), e a grafia e autoria dos binômios específicos e sinônimos foram confirmadas com base no banco de dados da Flora e Funga do Brasil (Flora e Funga do Brasil, 2024).

O status de conservação das espécies amostradas foi determinado pela lista vermelha de espécies ameaçadas da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN,

2024). Quanto às origens das espécies inventariadas assim como a classificação em nativas (N) aquelas provenientes das formações vegetacionais do local de estudo e exóticas (E) quando originárias de outras formações, incluindo as naturalizadas e cultivadas. Essa classificação segue a literatura científica especializada.

Fitossociologia

Para a análise fitossociológica da arborização urbana, este estudo considerou os 34,43 hectares de vias públicas distribuídos por todos os bairros como unidades amostrais integrais. Adotando essa abordagem, foram calculados tanto os parâmetros gerais da comunidade - incluindo densidade total, área basal (AB) e médias de altura e diâmetro - quanto os parâmetros específicos por espécie: densidade relativa (DR), frequência relativa (FR) e dominância relativa (DoR). A integração desses três últimos parâmetros permitiu o cálculo do Índice de Valor de Importância (IVI) para cada espécie, seguindo a metodologia clássica de Lamprecht (1964), com as devidas adaptações para o contexto urbano. Todo o processamento e análise dos dados foram realizados no RStudio.

O cálculo da abundância por unidade de área foi realizado para compreender a distribuição da vegetação lenhosa nos bairros estudados. Os valores de abundância (ind/ha) foram utilizados para comparar a arborização entre os bairros. Além disso, para analisar a ocorrência das espécies nos diferentes bairros, foi elaborado um diagrama de Venn no RStudio.

Quantificação de carbono por combustão direta em forno mufla

A seleção das espécies foi fundamentada no Índice de Valor de Importância (IVI), as 10 espécies com maior IVI foram selecionadas para estimar o teor de carbono, foram utilizadas amostras de folhas, galhos finos e caule, a coleta do caule foi realizada com uma furadeira equipada com serra copo a 1,50 metros de altura. Galhos finos e folhas foram coletados aleatoriamente no indivíduo, assegurando a representatividade das diferentes partes da planta. Essa abordagem permite uma análise mais precisa da variabilidade biológica das espécies. Todo o material coletado foi secado na estufa a 105 °C por 24 horas, após a secagem, triturado em liquidificador industrial.

A análise realizada seguindo o método estabelecido por Goldin (1987), cada amostra foi submetida ao forno mufla a uma temperatura de 550 °C até calcinação. Em seguida, as amostras foram resfriadas em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente e pesadas (Carmo; Silva, 2012). O método da mufla consiste na determinação gravimétrica

do CO₂ evoluído e na perda de massa de resíduo submetido à alta temperatura por certo intervalo de tempo; na determinação da matéria orgânica (MO), considera-se, assim, a diferença de peso inicial (amostras secas a 105 °C) e de peso computado após a incineração da amostra a 550-600 °C. Estimou-se o teor de MO, multiplicando teor de carbono (TC) pelo fator de van Bemmelem 1,72 (100/58), partindo do princípio de que, em média, a MO contém 58% de carbono, conforme descrito por Yeomans; Bremner (1988), Sato et al. (2014) e Aregahegn (2020).

A quantificação da matéria orgânica (MO) foi realizada utilizando a seguinte fórmula:

$$MO (\%) = (P - (T - C) \times 100) / P$$

Equação 1. P = peso da amostra (g) depois de seca; C = tara do cadinho (g); e T = peso da cinza + cadinho (g).

A determinação do carbono (C) foi obtida pela relação entre a matéria orgânica e o fator de conversão 1,72, conforme apresentado na equação:

$$C = MO / 1,72$$

Equação 2. C: corresponde à porcentagem de carbono presente na amostra (%); 1,72: é o fator de conversão utilizado, que reflete a proporção estimada de carbono em relação à matéria orgânica. Esse fator se baseia na premissa de que, em média, 58% da matéria orgânica é composta por carbono (100/58=1,72).

Para avaliar as variações no teor de carbono entre folhas, galhos e caules, utilizou-se um modelo de regressão não linear e análise de variância (ANOVA), com o teste de Tukey para verificar o impacto das variáveis na captação de carbono nos diferentes compartimentos vegetais. As correlações foram consideradas significativas quando $p < 0,01$.

Captura de Carbono e Estimativa de Biomassa utilizando Equações Alométricas

Seguindo a metodologia de Arevalo et al. (2002) a seguinte equação alométrica foi utilizada para calcular a biomassa das árvores para indivíduos vivos (kg/árvore):

$$BA = 0.1184 * DAP^{2.53}$$

Equação 3. BA = biomassa de árvores vivas (kg/árvore); 0,1184 = constante; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); 2,53 = constante.

O carbono na biomassa de árvores vivas (estoque de carbono) foi calculado conforme descrito por Arevalo et al. (2002) usando a equação:

$$CBV = BVT * 0,45$$

Equação 4. $CBV(t)$ = carbono na biomassa de plantas; BVT = biomassa total da planta; 0,45 = constante.

A determinação do estoque total de carbono da parte aérea das árvores foi realizada por meio do cálculo do carbono médio armazenado.

Para converter esses valores em CO_2 , foi assumido que uma tonelada de carbono corresponde a 3,67 toneladas de CO_2 . Dessa forma, a fórmula empregada para estimar o CO_2 sequestrado da atmosfera foi baseada na seguinte equação:

$$CS = CTBV * 3,67$$

Equação 5. $CS(t)$ = carbono sequestrado; $CTBV$ = carbono total na biomassa aérea vegetal; 3,67 = constante.

Artigo II: Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana em cidade do semiárido brasileiro

Conforto térmico nos bairros

O conforto térmico foi avaliado através do índice de calor (IC). As variáveis meteorológicas medidas incluíram a temperatura do ar ($^{\circ}C$) e a umidade relativa do ar (%). Essas medições foram realizadas utilizando um termo-higrômetro a uma altura de 1,5 m da superfície do solo, tanto em áreas com cobertura vegetal quanto em áreas sem cobertura. O monitoramento ocorreu de janeiro a dezembro 2024, abrangendo os períodos chuvosos e secos da região. Os dados foram registrados em cada mês e em todos os bairros selecionados.

O aumento da temperatura ocorre do período da manhã até a tarde, apresentando os maiores valores depois das 12 h, próximo as 14 h (Ferreira; Herrman, 2016; Martini et al., 2016). Sendo coletado os dados nos horários: 7:30h, 9:30h, 11:30h, 13:30h, 15:30h e 17:30, perfazendo o estudo da relação em questão com o IC.

Índice de calor

Segundo Nóbrega e Lemos (2011), o índice de calor (IC) combina a temperatura e a umidade relativa do ar para determinar uma temperatura aparente que representa o calor que se sente realmente. O Índice de Calor é elaborado a partir de medidas subjetivas de quanto calor se sente para dados valores de temperatura e umidade relativa do ar, nas situações em que as temperaturas estão elevadas, estando a pessoa à sombra em condições de vento fraco.

Foi utilizada a metodologia de Steadman (1979) para o cálculo do índice de IC. Através da seguinte equação:

$$IC = -42,379 + 2,04901523 * T + 10,14333127 * UR - 0,22475541 * T * UR - 6,83783 * 10^{-3} * (T)^2 - 5,481717 * 10^{-2} * (UR)^2 + 1,22874 * 10^{-3} * (T)^2 * UR + 8,5282 * 10^{-4} * T * (UR)^2 - 1,99 * 10 * (T)^2 * (UR)^2$$

Onde: IC - índice de calor; T - temperatura (°C); UR - umidade relativa do ar (%)

Com os resultados obtidos do IC serão indicados os níveis de alerta e as consequências para o ser humano, conforme consta na tabela 3.

Tabela 2. Níveis de alerta e suas consequências à saúde humana do índice de calor (IC)

Nível de alerta	Índice de calor	Síndrome de calor (sintomas)
Perigo extremo	54° C ou mais	Insolação ou ação e risco de Acidente Vascular Cerebral (AVC) iminente.
Perigo	41,1 – 54° C	Câimbras, insolação e provável esgotamento. Possibilidade de dano cerebral (AVC) para exposições prolongadas com atividades físicas.
Cautela extrema	32,1° - 41° C	Possibilidade de câimbras, esgotamento e insolação para exposições prolongadas e atividade física.
Cautela	27,1 – 32° C	Possível fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física.
Não há alerta	Menor que 27° C	Não há problemas.

Fonte: Nóbrega e Lemos (2011)

Percepção da população quanto ao conforto térmico

Para avaliar o ponto de vista da população sobre o nível de conforto térmico proporcionado pela presença da arborização nos bairros, paralelamente à coleta de dados meteorológicos, foram realizadas 200 entrevistas aos moradores de cada bairro selecionado, com auxílio de questionário pré-estruturado com perguntas abertas e fechadas. Conforme exigido pelas diretrizes da Resolução CNS 466/12 do Conselho Nacional de Saúde, essa pesquisa foi submetida à Plataforma Brasil, recebendo o CAAE 78113124.0.0000.5055 como identificação. Essa etapa é fundamental para assegurar a avaliação ética por parte de um Comitê de Ética em Pesquisa, garantindo assim a proteção dos direitos e do bem-estar dos participantes.

Questionário Socioeconômico:

Idade: _____ Gênero: () M () F

E escolaridade: () Ensino Fundamental () Ensino Médio () Ensino Técnico () Graduação () Pós-graduação

Questionário etnobotânico e percepção sobre conforto térmico na arborização viária:

1. Como as árvores afetam a temperatura durante o verão?
() Aumentam a temperatura ao bloquear o vento
() Proporcionam sombra, mas sem alterar a temperatura
() Reduzem significativamente a temperatura, criando um ambiente mais fresco
() Não fazem diferença na temperatura
() Não sei
2. Você acredita que a presença de árvores influencia o conforto térmico no seu bairro?
() Sim
() Não
() Não tenho certeza
3. Como você descreveria a sensação térmica na sua rua durante dias quentes?
() Quente, mas suportável
() Fresco devido a presença de árvores
() Neutra
() Extremamente quente, difícil de ficar na rua
4. Quais benefícios relacionados ao conforto térmico você atribuiria às árvores? (marque todas que se aplicam)
() Proporcionam sombra
() Reduzem a temperatura ambiente
() Melhoram a qualidade do ar
() Protege contra ventos fortes
() Oferecem um espaço agradável
() Outro (especifique): _____
5. Você percebe alguma melhoria na sua saúde ou bem-estar devido à presença de árvores no seu entorno?
() Não
() Não tenho certeza
() Sim, percebo melhorias
6. Você acredita que a arborização está relacionada à classe socioeconômica do bairro?
() Sim, acredito que há uma relação significativa
() Não, não vejo relação
() Não sei ou não tenho opinião formada
7. Você acredita que a arborização no seu bairro foi planejada?
() Sim, acredito que foi bem planejada
() Não tenho certeza ou não tenho informação suficiente
() Não, parece ter sido espontânea
8. Você tem alguma sugestão para melhorar a arborização viária no seu bairro? Se sim, quais seriam
9. Em uma escala de 1 a 10, qual é o seu nível de satisfação com a arborização viária no seu bairro? (1 sendo muito insatisfeito, 10 sendo muito satisfeito)

Figura 2. Formulário aplicado durante as entrevistas nos bairros estudados de Juazeiro do Norte, Ceará.

REFERÊNCIAS

- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Anderson, E. C., Locke, D. H., Pickett, S. T. A., et al. (2023). Just street trees? Street trees increase local biodiversity and biomass in higher income, denser neighborhoods. *Ecosphere*, 14(2), e4389. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4389>
- Ardoín, N. M., Bowers, A. W. (2025). Collective action impacts on climate change mitigation. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 63, 101503. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2025.101503>
- Aregahegn, Z. (2020). Optimization of the analytical method for the determination of organic matter. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 11(1), 1–5. <https://doi.org/10.5897/JSESEM2019.0784>
- Arevalo, L. A., Alegre, J. C., & Montoya Vilcahuaman, L. J. (2002). *Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra* (Documento No. 73). Embrapa Florestas.
- Carmo, D. L., & Silva, C. A. (2012). Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(4). <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400015>
- Castro, A. C. V. de, & Alvim, A. T. B. (2024). Sustainable urbanization in valley-bottom areas in urban settings: The case of the Jaguaré Stream Basin, São Paulo, Brazil. *Sustainability*, 16(7), 3018. <https://doi.org/10.3390/su16073018>
- Crane, P., & Kinzig, A. (2005). Nature in the metropolis. *Science*, 308, 1225-1225. <https://doi.org/10.1126/science.1114165>
- Day, S. D., Ries, P., Bassett, C. G., Wiseman, P. E., & O'Herrin, K. (2022). Support for a new credential in urban forestry: Results from a survey of urban forest professionals. *Urban Forestry & Urban Greening*, 73, 127588. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127588>
- Dean, D., Garber, M. D., Anderson, G. B., & Rojas-Rueda, D. (2024). Health implications of urban tree canopy policy scenarios in Denver and Phoenix: A quantitative health impact assessment. *Environmental Research*, 241, 117610. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117610>
- Eisenman, T. S., Flanders, T., Harper, R. W., Hauer, R. J., & Lieberknecht, K. (2021). Traits of a bloom: A nationwide survey of U.S. urban tree planting initiatives (TPIs). *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127006. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127006>
- Fang, F., Greenlee, A. J., He, Y., et al. (2023). Evaluating the quality of street trees in Washington, D.C.: Implications for environmental justice. *Urban Forestry & Urban Greening*, 85, 127947. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.127947>
- Ferreira, R. de C., & Herrmann, C. R. A. (2016). Influência de espécies arbóreas no microclima e conforto térmico de seu entorno imediato sob condições climáticas do cerrado goiano. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 11(1), 14–33.
- Flora e Funga do Brasil. (2024). *Consulta pública*.
- Galenieks, A. (2017). Importance of urban street tree policies: A comparison of neighbouring Southern California cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 22, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.02.007>
- Goldin, A. (1987). Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in non-calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18, 1111-1116. <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>
- Hope, D., Gries, C., Zhu, W., et al. (2003). Socioeconomics drive urban plant diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(15), 8788-8792. <https://doi.org/10.1073/pnas.1537557100>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2022). *Censo Demográfico 2022*. Recuperado em 5 de fevereiro de 2025, de <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). (2025). 2024 é o ano mais quente da série histórica no Brasil. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/2024-%C3%A9-o-ano-mais-quente-da-s%C3%A9rie-hist%C3%B3rica-no-brasil>. Acesso em: 6 de fevereiro de 2025.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). (2017). *Perfil básico municipal: Juazeiro do Norte 2017*. Fortaleza.
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). (2024). *IUCN Red List of Threatened Species*. <https://www.iucnredlist.org/>
- Jiang, Y., Sun, Y., Liu, Y., et al. (2023). Exploring the correlation between waterbodies, green space morphology, and carbon dioxide concentration distributions in an urban waterfront green space: A simulation study based on the carbon cycle. *Sustainable Cities and Society*, 98, 104831. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104831>
- Kim, J., Ewing, R., & Rigolon, A. (2024). Does green infrastructure affect housing prices via extreme heat and air pollution mitigation? A focus on green and climate gentrification in Los Angeles County, 2000-2021. *Sustainable Cities and Society*, 102, 105225. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105225>
- Lafortezza, R., Chen, J., Konijnendijk van den Bosch, C., & Randrup, T. B. (2018). Nature-based solutions for resilient landscapes and cities. *Environmental Research*, 165, 431-441. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.038>
- Lamprecht, H. (1964). Ensayo sobre la estructura florística de la parte suroriental del Bosque Universitario: “El caimital”, Estado Barinas. *Revista Forestal Venezolana*, 7, 77-119.
- Maleknia, R., Salehi, T. (2024). Exploring the drivers behind women's intentions towards climate change mitigation through urban forest conservation. *Urban Forestry & Urban Greening*, 97, 128395. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128395>
- Martini, A., Biondi, D., Batista, A. C., & Silva Filho, D. F. (2016). Microclima em diferentes tipologias de floresta

urbana. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 10(4), 12–22.

McCulloch, M. T., Winter, A., Sherman, C. E., et al. (2024). 300 years of sclerosponge thermometry shows global warming has exceeded 1.5 °C. *Nature Climate Change*, 14(2), 171–177. <https://doi.org/10.1038/s41558-023-01919-7>

Millennium Ecosystem Assessment (MEA). (2005). *Ecosystems and human well-being: Desertification synthesis*. Washington, DC: Island Press.

Nóbrega, R. S., & Lemos, T. V. S. (2011). O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade de Recife. *Revista de Geografia*, 28(1), 93–109.

Park, B. J., Lee, D. K., Yun, S. H., et al. (2024). Assessing the impact of green infrastructure on thermal comfort in relation to humidity: A case study in Korea. *Urban Forestry & Urban Greening*, 95, 128305. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128305>

Park, J., Kim, J.-H., Sohn, W., et al. (2021). Urban cooling factors: Do small greenspaces outperform building shade in mitigating urban heat island intensity? *Urban Forestry & Urban Greening*, 64, 127256. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127256>

Pena, J. C., Costa, N. R. da, Martello, F., & Ribeiro, M. C. (2024). The street tree distribution across a streetscape reflects the social inequality of Latin American cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128156. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128156>

Pinheiro, R. T., Marcelino, D. G., Moura, D. R. de. (2022). Riqueza, diversidade e composição arbórea nas praças de Palmas, Tocantins. *Ciência Florestal*, 32(2), Apr-Jun. <https://doi.org/10.5902/1980509861429>

Powning, C. B., Harper, R. W., Bloniarz, D. V., Kahl, K. J., & Markowitz, E. M. (2024). Reviewing the use of research interviews and qualitative inquiry in urban forestry: Understanding human-tree relationships in the built landscape. *Urban Forestry & Urban Greening*, 98, 128387. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128387>

Santos, J. S. dos, Silva, V. P. R. da, Lima, E. R. V., et al. (2012). Campo térmico urbano e a sua relação com o uso e cobertura do solo em cidade tropical úmida (Thermal urban field and its relation to the use and land cover in a humid tropical city). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 5(3), 540–557. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v5i3.232851>

Sato, J. H., Figueiredo, C. C. de, Marchão, R. L., Madari, B. E., Benedito, L. E. C., Busato, J. G., & Souza, D. M. de. (2014). Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 71(4). <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0306>

Souza, C. D. A., Oliveira Junior, E. S., & Hacon, S. S. (2024). Conceito de serviços ecossistêmicos: Desdobramento na ciência e política. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17(6), 4261–4278.

Steadman, R. G. (1979). The assessment of sultriness: Part I: A temperature humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 18, 861–884.

The Angiosperm Phylogeny Group, Chase, M. W., Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Byng, J. W., Judd, W. S., Soltis, D. E., Mabberley, D. J., Sennikov, A. N., Soltis, P. S., & Stevens, P. F. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>

Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. (1988). A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>

Zhang, B., & Brack, C. L. (2021). Urban forest responses to climate change: A case study in Canberra. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 126910. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.126910>

Zhao, J., Chen, J., Chen, C., et al. (2023). Is it sufficient? Assessment of two sampling methods for urban plant species richness investigations. *Urban Forestry & Urban Greening*, 79, 127824. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127824>

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Artigo I: Estrutura e estoque de carbono de árvores de rua em bairros com disparidades socioeconômicas: um estudo de caso no semiárido do Nordeste do Brasil.

Resumo: Para mitigar as mudanças climáticas, muitas cidades têm implementado estratégias voltadas à neutralidade de carbono, com ênfase no papel das árvores no sequestro de carbono e na redução das emissões de gases de efeito estufa. No entanto, a vegetação urbana é distribuída de forma desigual, refletindo disparidades sociais. Este estudo analisou a relação entre cobertura arbórea urbana, serviços ecossistêmicos e desigualdades socioeconômicas em três bairros de Juazeiro do Norte, Ceará, no semiárido brasileiro. Foi realizado um censo completo das árvores de rua, registrando indivíduos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 5 cm. A quantificação de carbono foi feita por meio de combustão em mufla e equações alométricas. Foram registrados 2.235 indivíduos arbóreos, revelando que 67,3% das espécies eram exóticas, sendo *Azadirachta indica* a mais dominante. Entre as espécies nativas, *Enterolobium contortisiliquum* destacou-se pelo alto armazenamento de carbono e potencial de sequestro de CO₂, além de contribuir para o fortalecimento da biodiversidade local. Os 2.235 indivíduos analisados são capazes de sequestrar um total de 1.748,90 toneladas de CO₂. O teor de carbono (TC) variou entre 48,1% e 57,4%, enquanto os valores de matéria orgânica (MO) oscilaram entre 82,7% e 98,8% nas folhas, galhos e troncos, com as maiores concentrações de MO e TC encontradas nos galhos. Foram observadas diferenças significativas na diversidade e densidade arbórea entre os bairros, influenciadas por fatores socioeconômicos que evidenciam a gentrificação verde. Lagoa Seca apresentou a maior diversidade de espécies, Franciscanos destacou-se por sua maior complexidade estrutural e funcional e o Horto apresentou limitações devido à menor densidade arbórea. Essa abordagem é essencial para melhorar a qualidade ambiental, mitigar os impactos das mudanças climáticas e fortalecer a biodiversidade urbana, contribuindo, assim, para cidades mais sustentáveis e resilientes.

Palavras-chave: Biomassa aérea; Estoques de carbono; Gentrificação verde; Ecologia urbana

Introdução

A urbanização está se acelerando em todo o mundo, com projeções indicando que, até 2050, 68% da população global viverá em áreas urbanas (UNFCCC, 2022). No Brasil, esse processo é ainda mais acelerado e consolidado: o país já apresenta uma das maiores taxas de urbanização do mundo, atingindo 87% da população em 2022, com uma projeção de aumento para 90% até 2050 (IBGE, 2022). Embora a urbanização tenha impulsionado o desenvolvimento econômico, também introduziu riscos ecológicos significativos, como a poluição do ar (Liu et al., 2022), as ilhas de calor urbanas (Ren et al., 2022) e a escassez hídrica (Wang et al., 2021). Esses problemas estão diretamente ligados ao aumento da densidade populacional e à expansão de superfícies impermeáveis (Wu et al., 2021), agravando os impactos ambientais e levando à crescente degradação do meio ambiente (Rodriguez et al., 2018; Meyfroidt et al., 2022). Esses desafios ambientais são comumente observados em diversas cidades brasileiras, onde a expansão urbana desordenada e a ocupação de áreas ambientalmente sensíveis intensificam ainda mais esses efeitos (Ipea, 2014).

Nesse contexto, a redução da cobertura arbórea tem se tornado um problema preocupante em muitas cidades ao redor do mundo (Nowak e Greenfield, 2020). As

mudanças climáticas são reconhecidas como uma ameaça significativa a médio e longo prazo, representando um grande desafio para a sociedade humana (Emilsson e Ode Sang, 2017; Ossola e Lin, 2021; Dang et al., 2023). As árvores urbanas desempenham um papel crucial na mitigação desses problemas ambientais ao reduzir as temperaturas da superfície e do ar por meio da transpiração e sombreamento (Peng et al., 2020; Feng et al., 2022). Além disso, elas adsorvem e retêm partículas em suspensão no ar (Chen et al., 2019; Ren et al., 2019), melhoram as condições meteorológicas urbanas ao aumentar a umidade e reduzir a velocidade dos ventos (Huang et al., 2021; Feng et al., 2025), e contribuem para o armazenamento de carbono ao capturar CO₂ por meio da fotossíntese (Yu et al., 2022).

A qualidade e a efetividade desses serviços estão fortemente relacionadas à composição de espécies, diversidade estrutural e interações ecológicas. A simples ampliação da cobertura arbórea não é suficiente — a seleção de espécies apropriadas, preferencialmente nativas e adaptadas às condições locais, é essencial para garantir funcionalidade e resiliência a longo prazo (Rehman et al., 2025). As plantas nativas não apenas se adaptam bem às condições urbanas, mas também oferecem múltiplas funções ecossistêmicas nos espaços verdes urbanos, por meio de uma maior contribuição aos serviços ecossistêmicos (Tartaglia e Aronson, 2024). A biodiversidade desempenha um papel fundamental na manutenção da qualidade do habitat e da estabilidade dos ecossistemas urbanos, além de aumentar a capacidade de recuperação do sistema frente a distúrbios, como eventos climáticos extremos, promovendo sinergias entre diversos serviços ecossistêmicos (Belaire et al., 2022). Assim, a gestão sustentável das árvores urbanas requer um planejamento integrado que considere não apenas a quantidade, mas também a qualidade, diversidade e distribuição da vegetação.

No esforço contínuo para enfrentar as mudanças climáticas, diversas cidades vêm implementando medidas para alcançar a neutralidade de carbono, reconhecendo a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (Gurney et al., 2022). Nesse cenário, o uso extensivo de plantas para sequestrar carbono e reduzir as emissões de gases de efeito estufa é fundamental para atingir essa meta (Das et al., 2022). Estudar o armazenamento e a regulação do carbono nos ambientes urbanos torna-se cada vez mais importante para compreender o ciclo global do carbono e orientar o desenvolvimento sustentável das cidades (Mitchell et al., 2018). As árvores de rua se destacam como elementos fundamentais da sustentabilidade urbana, pois oferecem benefícios diretos ao bem-estar humano e contribuem para a resiliência climática das cidades. Quando inseridas em configurações bem planejadas, estão associadas à redução de interações

por doenças cardiovasculares e respiratórias (Davies e Laforzezza, 2017; Cirino et al., 2022). Esses serviços não são apenas produtos naturais, mas resultam da interação entre pessoas e ecossistemas, evidenciando o papel ativo da sociedade na geração e valorização desses serviços (Sartori et al., 2024).

No entanto, a distribuição da vegetação urbana é desigual e reflete desigualdades sociais mais amplas. Estudos demonstram que bairros com populações de baixa renda ou grupos minoritários têm menos acesso a espaços verdes, sendo fatores como renda, etnia, idade e gênero determinantes dessa disparidade (Ribeiro et al., 2024). O fenômeno conhecido como “gentrificação verde” mostra que bairros mais ricos frequentemente apresentam maior diversidade, abundância e cobertura arbórea (Leong et al., 2018), um padrão observado tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento (Allegretto et al., 2022). Diversos estudos destacam que fatores sociodemográficos são determinantes nas desigualdades na distribuição de árvores urbanas, como observado em cidades dos Estados Unidos (Landry e Chakraborty, 2009; Locke et al., 2016). Pesquisas conduzidas em diversas regiões do mundo, como Brisbane (Austrália) (Shanahan et al., 2014) e Eastern Cape (África do Sul) (Kuruner-Chitepo e Shackleton, 2011), identificaram associações semelhantes entre variáveis sociodemográficas e disparidades na cobertura arbórea urbana. No contexto brasileiro, essa realidade também é evidenciada por diversos estudos, como o de Pedlowski et al. (2002), em Campos dos Goytacazes; o de Arantes et al. (2021), que analisaram a relação entre florestas urbanas e renda per capita na cidade de São Paulo; e o de Pena et al. (2024), que discutem como a distribuição de árvores de rua pode refletir desigualdades sociais em Belo Horizonte. Esses achados reforçam a necessidade de políticas públicas e ações que promovam o verde urbano de forma mais equitativa e acessível a todos os grupos sociais.

Reconhecendo a importância de avaliar a arborização das vias públicas, este estudo adota uma perspectiva de equidade social para investigar a arborização urbana em Juazeiro do Norte, Ceará, uma cidade localizada na região semiárida do Brasil. O objetivo é contribuir para estratégias que promovam o acesso equitativo aos serviços ecossistêmicos prestados pelas árvores urbanas, independentemente do status socioeconômico dos moradores. Especificamente, o estudo busca: quantificar o potencial de sequestro de carbono das espécies arbóreas utilizadas; identificar as espécies mais adequadas à arborização em contextos semiáridos; analisar como as desigualdades socioeconômicas influenciam a distribuição da cobertura arbórea urbana; e investigar a

ocorrência de gentrificação verde na alocação de infraestrutura verde, propondo estratégias para reduzir as disparidades resultantes.

Metodologia

Área de estudo

O estudo foi realizado em três bairros da cidade de Juazeiro do Norte, localizada na região sul do estado do Ceará, no nordeste do Brasil. Essa área metropolitana possui grande importância dentro da região semiárida brasileira e está inserida no bioma Caatinga. A cidade possui uma população de 286.120 habitantes e uma área total de 258,788 km², dos quais 51,44 km² correspondem à área urbanizada (IBGE, 2022). De acordo com a classificação climática de Köppen, o clima da região é do tipo BSh (Alvares et al., 2013), caracterizado como tropical quente, com uma estação chuvosa entre janeiro e abril e uma estação seca de maio a dezembro. A precipitação média anual varia entre 900 e 1.000 mm, com média de 925,1 mm (IPECE, 2017).

O estudo foi conduzido em três bairros: Horto (coordenadas: 7°10'46.89"S, 39°19'46.07"W), Franciscanos (7°12'46.44"S, 39°18'47.26"W) e Lagoa Seca (7°14'39.87"S, 39°19'19.58"W) (Figura 1).

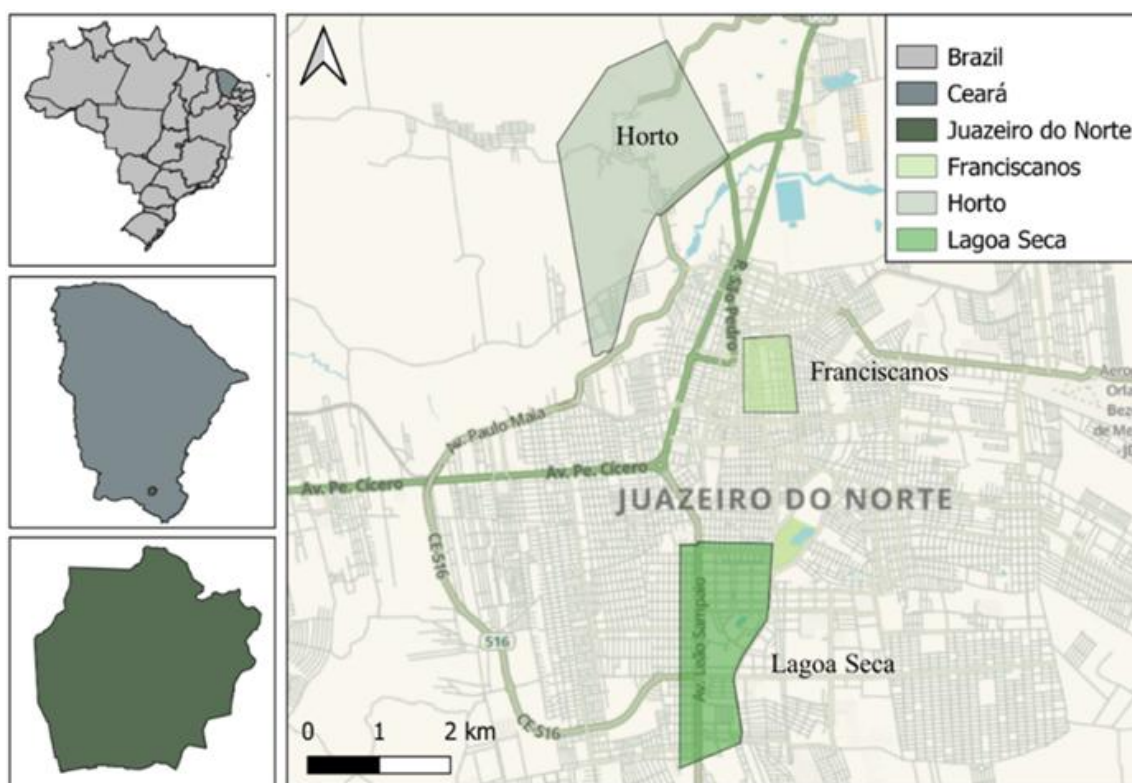


Figura 1. Área de estudo na cidade de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, onde examinamos a estrutura da vegetação lenhosa de três bairros.

No entanto, a análise restringe-se às vias públicas, excluindo áreas como propriedades privadas, praças e outros espaços urbanos. Essa delimitação permite uma avaliação mais precisa do contexto arbóreo e dos serviços ecossistêmicos associados à vegetação das ruas.

Os bairros estudados variam significativamente em tamanho: o Horto possui uma área total de 523,70 hectares, Lagoa Seca 303,19 hectares e Franciscanos apenas 74,16 hectares. A área correspondente às vias públicas também difere: 6,27 ha no Horto, 24,29 ha em Lagoa Seca e 3,87 ha nos Franciscanos (Tabela 1). Essas diferenças espaciais são essenciais para compreender a densidade e a distribuição da arborização urbana nas ruas, já que bairros menores ou com maior proporção de área viária tendem a apresentar condições distintas para cobertura arbórea e oferta de serviços ecossistêmicos.

Tabela 1. Área total e a área das vias nos locais de estudo, em hectares e percentuais

	Área total (ha)	Área das vias (ha)	Área das vias (%)
Horto	523,70	6,27	1,19%
Franciscanos	74,16	3,87	5,21%
Lagoa Seca	303,19	24,29	8,01%
Total	901,05	34,43	14,41

Os bairros analisados desempenham um papel crucial como espaços de convivência comunitária e interação social, além de serem importantes pontos turísticos. O bairro Horto se destaca por sua significativa importância cultural e religiosa. Apesar de sua relevância simbólica, sua população é predominantemente de baixa renda. O bairro Franciscanos, um dos mais antigos e densamente povoados de Juazeiro do Norte, possui uma população majoritariamente de classe média, refletindo sua história e o desenvolvimento urbano consolidado. Já Lagoa Seca é considerado um dos bairros mais valorizados e modernos da cidade, com infraestrutura bem desenvolvida, atraindo moradores das classes média e alta, consolidando-se como uma área-chave no crescimento urbano de Juazeiro do Norte. A escolha desses bairros baseou-se em sua localização estratégica e relevância socioeconômica (Figura 2).



Figura 2. Caracterização das vias urbanas em Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil. (A, B) Trechos próximos à estátua do Padre Cícero no Horto; (C, D) Condições das ruas no bairro Franciscanos; (E, F) Vias no bairro Lagoa Seca.

Coleta de dados e análise

Foi realizado um inventário do tipo censo entre dezembro de 2023 e junho de 2024, abrangendo indivíduos lenhosos com diâmetro à altura do peito (DAP) ≥ 5 cm e altura $\geq 1,5$ m. A identificação das espécies foi realizada por meio de consultas à literatura especializada, especialistas em taxonomia, comparação com materiais de herbário e exsicatas do Herbário Caririense Dárdano de Andrade-Lima (HCDAL). As espécies foram classificadas de acordo com o sistema taxonômico do Angiosperm Phylogeny Group IV (APG IV, 2016).

Quanto à origem das espécies inventariadas, estas foram classificadas como nativas (N) quando originárias das formações vegetais da área de estudo, e exóticas (E) quando provenientes de outras formações, incluindo espécies naturalizadas e cultivadas. Essa classificação segue a literatura científica especializada, com base em artigos científicos e livros técnicos que tratam da origem e distribuição das espécies nos ecossistemas brasileiros. O status de conservação das espécies amostradas foi determinado com base na Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN, 2024).

Fitossociologia

Para a análise fitossociológica da arborização urbana, este estudo considerou os 34,43 hectares de vias públicas dos três bairros como unidades amostrais integrais. Com essa abordagem, foram calculados tanto os parâmetros gerais da comunidade — incluindo

densidade total, área basal (AB) e médias de altura e diâmetro — quanto os parâmetros específicos por espécie: densidade relativa (DR), frequência relativa (FR) e dominância relativa (DoR). Neste caso, a frequência relativa foi calculada considerando cada bairro como uma unidade amostral, com base na presença de cada espécie em cada um deles. A integração desses três parâmetros permitiu o cálculo do Índice de Valor de Importância (IVI) para cada espécie, seguindo a metodologia clássica de Lamprecht (1964), com as devidas adaptações ao contexto urbano.

A similaridade florística entre os bairros foi avaliada por meio do índice de similaridade de Jaccard, que mede a sobreposição de espécies entre comunidades. Todo o processamento e análise dos dados foram realizados no RStudio (RStudio Team, 2023), utilizando o software R (R Core Team, 2023).

O cálculo da abundância por unidade de área foi realizado para compreender a distribuição da vegetação lenhosa nas vias dos bairros estudados. Os valores de abundância (ind/ha) foram utilizados para comparar a cobertura arbórea entre os bairros. Adicionalmente, foi elaborado um diagrama de Venn no RStudio para analisar a ocorrência de espécies entre os diferentes bairros.

Quantificação de carbono por combustão direta em forno mufla

A seleção das espécies foi fundamentada no Índice de Valor de Importância (IVI), as 10 espécies com maior IVI foram selecionadas para estimar o teor de carbono, foram utilizadas amostras de folhas, galhos finos e caule. Todo o material coletado foi secado na estufa a 105 °C por 24 horas, após a secagem, triturado em liquidificador industrial.

A análise realizada seguindo o método estabelecido por Goldin (1987), cada amostra foi submetida ao forno mufla a uma temperatura de 550 °C até calcinação. Em seguida, as amostras foram resfriadas em um dessecador até atingirem a temperatura ambiente e pesadas (Carmo; Silva, 2012). O método da mufla consiste na determinação gravimétrica do CO₂ evoluído e na perda de massa de resíduo submetido à alta temperatura por certo intervalo de tempo; na determinação da matéria orgânica (MO), considera-se, assim, a diferença de peso inicial (amostras secas a 105 °C) e de peso computado após a incineração da amostra a 550-600 °C. Estimou-se o teor de MO, multiplicando teor de carbono (TC) pelo fator de van Bemmelem 1,72 (100/58), partindo do princípio de que, em média, a MO contém 58% de carbono, conforme descrito por Yeomans; Bremner (1988), Sato et al. (2014) e Aregahegn (2020).

A quantificação da matéria orgânica (MO) foi realizada utilizando a seguinte fórmula:

$$MO (\%) = (P - (T - C) \times 100)/P$$

Equação 1. P = peso da amostra (g) depois de seca; C = tara do cadinho (g); e T = peso da cinza + cadinho (g).

A determinação do carbono (C) foi obtida pela relação entre a matéria orgânica e o fator de conversão 1,72, conforme apresentado na equação:

$$C = MO/1,72$$

Equação 2. C: corresponde à porcentagem de carbono presente na amostra (%); 1,72: é o fator de conversão utilizado, que reflete a proporção estimada de carbono em relação à matéria orgânica. Esse fator se baseia na premissa de que, em média, 58% da matéria orgânica é composta por carbono ($100/58=1,72$).

Para avaliar as variações no teor de carbono entre folhas, galhos e caules, utilizou-se um modelo de regressão não linear e análise de variância (ANOVA), com o teste de Tukey para verificar o impacto das variáveis na captação de carbono nos diferentes compartimentos vegetais. As correlações foram consideradas significativas quando $p < 0,01$.

Captura de Carbono e Estimativa de Biomassa utilizando Equações Alométricas

Seguindo a metodologia de Arevalo et al. (2002) a seguinte equação alométrica foi utilizada para calcular a biomassa das árvores para indivíduos vivos (kg/árvore):

$$BA = 0.1184 * DAP^{2.53}$$

Equação 3. BA = biomassa de árvores vivas (kg/árvore); 0,1184 = constante; DAP = diâmetro à altura do peito (cm); 2,53 = constante.

O carbono na biomassa de árvores vivas (estoque de carbono) foi calculado conforme descrito por Arevalo et al. (2002) usando a equação:

$$CBV = BVT * 0,45$$

Equação 4. CBV (t) = carbono na biomassa de plantas; BVT = biomassa total da planta; 0,45 = constante.

A determinação do estoque total de carbono da parte aérea das árvores foi realizada por meio do cálculo do carbono médio armazenado.

Para converter esses valores em CO₂, foi assumido que uma tonelada de carbono corresponde a 3,67 toneladas de CO₂. Dessa forma, a fórmula empregada para estimar o CO₂ sequestrado da atmosfera foi baseada na seguinte equação:

$$CS = CTBV * 3,67$$

Equação 5. CS (t) = carbono sequestrado; CTBV = carbono total na biomassa aérea vegetal; 3,67 = constante.

Resultados e discussão

Composição florística

Um total de 2235 indivíduos pertencentes a 46 espécies distribuídos em 43 gêneros e 17 famílias botânicas foi inventariado (Tabela 2), sendo uma espécie identificada apenas em nível de gênero.

Tabela 2. Espécies registradas em bairros do sul do Ceará, Brasil. E = Exótica; N = Nativa; ST = Status de conservação das espécies; DD = Dados deficientes; NE = Não avaliada; LC = Pouco preocupante; VU = Vulnerável; NT = Quase ameaçada; H = Horto; F = Franciscanos; LS = Lagoa Seca.

Family	Species	Origin	Endemism	CS	H	F	LS	Total
Anacardiaceae	<i>Anacardium occidentale</i> L.	N	Non-endemic	LC	1	0	0	1
	<i>Mangifera indica</i> L.	E	Non-endemic	NE	0	1	2	3
	<i>Schinus terebinthifolius</i> Raddi	E	Non-endemic	NE	0	1	0	1
Apocynaceae	<i>Plumeria pudica</i> Jacq.	E	Non-endemic	LC	13	0	4	17
	<i>Plumeria rubra</i> L.	E	Non-endemic	NE	0	0	1	1
Arecaceae	<i>Acrocomia aculeata</i> (Jacq.) Lodd. ex Mart.	E	Non-endemic	LC	1	0	0	1
	<i>Adonidia merrillii</i> (Becc.) Becc.	E	Non-endemic	VU	0	0	26	26
	<i>Roystonea oleracea</i> (Jacq.) O.F.Cook	E	Non-endemic	NE	0	1	23	24
	<i>Wodyetia bifurcata</i> A.K.Irvine	E	Non-endemic	NE	0	0	8	8
Bignoniaceae	<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	N	Non-endemic	NT	1	3	6	10
	<i>Jacaranda cuspidifolia</i> Mart.	E	Non-endemic	LC	8	0	0	8
	<i>Tabebuia aurea</i> (Silva Manso) Benth. & Hook.f. ex S.Moore	N	Non-endemic	NE	7	0	1	8
	<i>Tabebuia rosea</i> (Bertol.) Bertero ex A.DC.	E	Non-endemic	NE	0	2	9	11
	<i>Tecoma stans</i> (L.) Juss. ex Kunth	E	Non-endemic	LC	0	1	10	11
Caricaceae	<i>Carica papaya</i> L.	E	Non-endemic	DD	3	2	0	5
Chrysobalanaceae	<i>Moquilea tomentosa</i>	E	Endemic	LC	1	80	165	246

	Benth.							
Combretaceae	<i>Terminalia catappa</i> L.	E	Non-endemic	LC	11	14	13	38
Cordiaceae	<i>Cordia myxa</i> L.	E	Non-endemic	LC	1	44	5	50
Fabaceae	<i>Adenanthera pavonina</i> L.	E	Non-endemic	LC	0	10	2	12
	<i>Bauhinia purpurea</i> L.	E	Non-endemic	LC	0	0	1	1
	<i>Caesalpinia pulcherrima</i> (L.) Sw.	E	Non-endemic	NE	2	9	5	16
	<i>Cassia fistula</i> L.	E	Non-endemic	LC	0	1	1	2
	<i>Cenostigma pluviosum</i> (DC.) Gagnon & G.P.Lewis	E	Non-endemic	NE	0	0	2	2
	<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	E	Non-endemic	LC	2	3	3	8
	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	N	Non-endemic	LC	0	0	7	7
	<i>Inga laurina</i> (Sw.) Willd.	E	Non-endemic	LC	0	0	1	1
	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	E	Non-endemic	NE	0	1	0	1
	<i>Parkinsonia aculeata</i> L.	E	Non-endemic	LC	1	0	0	1
	<i>Pithecellobium dulce</i> (Roxb.) Benth.	E	Non-endemic	LC	1	0	1	2
	<i>Prosopis juliflora</i> (Sw.) DC.	E	Non-endemic	LC	8	0	2	10
	<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S.Irwin & Barneby	E	Non-endemic	LC	38	8	7	53
	<i>Tamarindus indica</i> L.	E	Non-endemic	LC	0	16	0	16
	<i>Vatairea macrocarpa</i> (Benth.) Ducke	N	Non-endemic	LC	0	0	3	3
Malvaceae	<i>Ceiba pentandra</i> (L.) Gaertn	E	Non-endemic	LC	0	4	5	9
	<i>Guazuma ulmifolia</i> Lam.	N	Non-endemic	NE	1	0	0	1
	<i>Pachira aquatica</i> Aubl.	E	Non-endemic	LC	1	3	1	5
	<i>Thespesia populnea</i> (L.) Sol. ex Corrêa	E	Non-endemic	LC	0	4	0	4
Meliaceae	<i>Azadirachta indica</i> A.Juss.	E	Non-endemic	NE	188	659	457	1304
Moraceae	<i>Ficus benjamina</i> L.	E	Non-endemic	LC	28	117	98	243
	<i>Ficus retusa</i> L.	E	Non-endemic	LC	1	1	1	3
Moringaceae	<i>Moringa oleifera</i> Lam.	E	Non-endemic	LC	2	1	3	6
Myrtaceae								

	<i>Eucalyptus globulus</i> Labill.	E	Non-endemic	LC	3	0	1	5
	<i>Syzygium cumini</i> (L.) Skeels	E	Non-endemic	LC	1	0	0	1
	<i>Syzygium malaccense</i> (L.) Merr. & L.M.Perry	E	Non-endemic	LC	1	0	7	8
Rhamnaceae								
	<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.) Hauenschild	N	Non-endemic	LC	6	20	8	34
Rutaceae								
	<i>Murraya paniculata</i> (L.) Jack	E	Non-endemic	NE	3	4	0	7
Simaroubaceae								
	<i>Simarouba</i> sp.	–	–	–	0	0	2	2
Total					334	1010	891	2235

Fabaceae foi a família mais representativa com 32,6% do total de espécies, seguido por Bignoniaceae com 10,8%, Arecaceae e Malvaceae ambas com 8,6%, representando 60,6% do total de espécies. Embora Santamour (1990) recomende que a composição da vegetação urbana não ultrapasse 30% de espécies pertencentes a uma única família, visando a promoção de maior diversidade e resiliência em áreas urbanas, Fabaceae excedeu esse limite, sua alta representatividade pode estar associada à adaptação às condições semiáridas (Amorim et al., 2016), por esse motivo, a família é bastante diversa nos Neotrópicos, principalmente na Zona Diagonal Seca da América do Sul (Lima et al., 2015; Baptista et al., 2020).

As famílias mais representativas em termos de número de indivíduos foram Meliaceae (1.304 indivíduos), Chrysobalanaceae, Moraceae (246 indivíduos respectivamente) e Fabaceae (135 indivíduos), juntas representando 86% do total registrado. De forma similar, Dangulla et al. (2020), em um estudo conduzido no noroeste da Nigéria, uma região predominantemente semiárida, identificaram, respectivamente, as famílias Meliaceae, Fabaceae e Moraceae como as mais dominantes. A predominância da família Meliaceae em ambos os contextos destaca sua adaptação às condições climáticas secas, especialmente devido à presença significativa de *Azadirachta indica*, que foi a espécie mais abundante nos dois estudos. Nativa da Índia e regiões adjacentes, *A. indica* adaptou-se de forma eficiente ao clima do nordeste brasileiro (Simão Neto et al., 2023), demonstrando notável capacidade de suportar longos períodos de seca e desenvolver-se em solos de baixa fertilidade, o que contribuiu para sua ampla distribuição no país (Silva et al., 2021). No entanto, *A. indica* representa 58,3% do total de indivíduos e é considerada uma espécie exótica invasora de alto risco, apresentando características como a produção

de substâncias alelopáticas, inibição da muda de insetos (ecdise) e desorganização de colônias de polinizadores (Santos e Fabricante, 2020). Medidas de controle para evitar sua disseminação e mitigar seus impactos incluem a interrupção da distribuição de mudas, especialmente por parte do poder público, a substituição de indivíduos jovens por espécies nativas com características semelhantes e o investimento em ações de educação ambiental (Silva et al., 2022).

Além da predominância de *A. indica*, destacaram-se *Moquilea tomentosa*, com 246 indivíduos (11%), e *Ficus benjamina*, com 243 indivíduos (10,8%). Esses dados evidenciam a significativa presença dessas espécies na arborização urbana, corroborando com os achados de Vidal-Couto et al. (2023), que destacam a ampla ocorrência de *M. tomentosa* e *F. benjamina* nas regiões do Brasil tropical. Santamour (1990) destaca que nenhuma espécie deve representar mais de 10% da vegetação urbana, pois uma maior diversidade é essencial para garantir a proteção contra pragas e doenças, além de promover um ecossistema urbano mais resiliente e equilibrado.

Moquilea tomentosa é uma espécie nativa do Brasil, especialmente do bioma Mata Atlântica, e está entre as espécies mais frequentemente registradas em inventários realizados no país (Sothers e Prance, 2020). No entanto, ela não é considerada nativa da área de estudo e, por isso, é classificada como exótica nesta região. A espécie apresenta importantes benefícios, como auxiliar no monitoramento da poluição do ar, com estudos que confirmam sua capacidade de detectar a presença de mercúrio na atmosfera. Além disso, contribui para a melhoria da qualidade do ar e pode atuar como agente de regeneração ecológica, especialmente em áreas urbanas, sendo uma boa opção para arborização urbana devido à sua resistência e baixa exigência de manutenção (Deecken et al., 2022).

Ficus benjamina, nativa da Índia, é uma árvore tropical frequentemente utilizada na arborização urbana devido à sua aparência rústica, com folhagem verde brilhante e perene, além da facilidade de poda de sua copa em diversos formatos (Vidal-Couto et al., 2023). No entanto, possui um sistema radicular agressivo, causando diversos problemas nos mais variados tipos de pavimentos e em redes de distribuição de água (Albertin et al., 2011; Lundgren et al., 2013; Vidal-Couto et al., 2023). Sendo assim, recomenda-se evitar o plantio de *F. benjamina* e, onde já foi plantada, substituir gradativamente os indivíduos em áreas com pouco espaço, evitando problemas com as calçadas e favorecendo o aumento da biodiversidade urbana (Paula et al., 2015; Silva et al., 2019).

A relação entre a classe socioeconômica e a arborização urbana tem sido

amplamente estudada em diversos países, revelando que bairros de baixa renda geralmente possuem menor quantidade de espécies em comparação aos bairros de maior poder aquisitivo (Guevara et al., 2024). Esse fenômeno pode ser observado na análise da distribuição das espécies lenhosas nos bairros estudados, cujas características socioeconômicas refletem a desigualdade em termos de diversidade de espécies. O diagrama de Venn (Figura 3) apresenta a distribuição de espécies entre os bairros. Lagoa Seca se destaca com a maior riqueza de espécies, com um total de 35, além de apresentar nove espécies exclusivas. O Horto segue com 27, sendo seis exclusivas. Por outro lado, Franciscanos tem a menor riqueza, com apenas 26, das quais quatro são exclusivas. A matriz de similaridade de Jaccard revelou variações significativas entre os bairros, indicando que a maior similaridade ocorre entre Franciscanos e Lagoa Seca (0,49), enquanto a menor similaridade foi observada entre Horto e Franciscanos (0,39). O valor intermediário entre Lagoa Seca e Horto (0,44) destaca que o bairro Horto possui a composição florística mais distinta, com menor sobreposição de espécies em comparação aos demais.

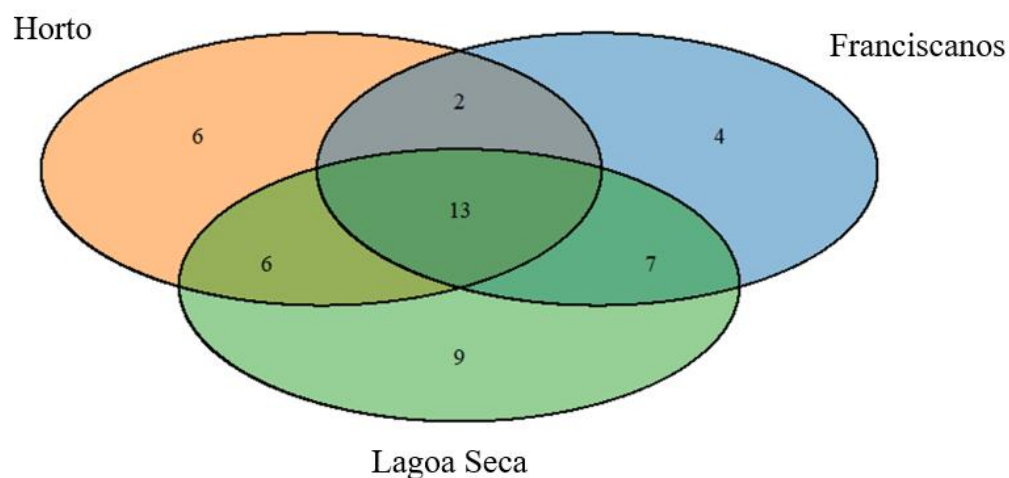


Figura 3. Diagrama de Venn apresentando a distribuição de espécies lenhosas entre os bairros Horto, Franciscanos e Lagoa Seca, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.

A composição florística entre os bairros destaca disparidades significativas na distribuição das espécies arbóreas, influenciadas pelas condições socioeconômicas. Embora *A. indica* e *F. benjamina* estejam presentes em grande número nos três bairros, outras espécies se mostram notavelmente significativas ao longo das ruas estudadas.

No Horto espécies exóticas como *Senna siamea*, *Plumeria pudica* e *Prosopis juliflora* apresentam maior número de indivíduos em comparação aos demais bairros. Além disso, espécies nativas como *Anacardium occidentale*, *Acrocomia aculeata*,

Jacaranda cuspidifolia e *Guazuma ulmifolia* foram encontradas exclusivamente neste bairro.

O Franciscanos destaca-se pela maior abundância em relação aos outros bairros a espécie nativa *Sarcomphalus joazeiro* e as espécies exóticas *Tamarindus indica*, *Adenanthera pavonina* e *Cordia myxa*. Lagoa Seca por sua vez, combina espécies ornamentais de alto valor estético, como as exóticas *Adonidia merrillii*, *Roystonea oleracea* e *Tecoma stans* e com grandes árvores como as nativas *Enterolobium contortisiliquum* e *Vatairea macrocarpa* e exóticas *Moquilea tomentosa* e *Inga laurina*. Essa diversidade reflete a gentrificação verde.

Estudos têm demonstrado uma relação direta entre condições socioeconômicas e a diversidade de espécies em áreas urbanas. Gimenez et al. (2023), ao analisar a arborização viária de dois bairros em Bauru, São Paulo, constataram que o bairro de melhor condição socioeconômica apresentava maior diversidade e distribuição de espécies ao longo das vias públicas. De forma semelhante, Guevara et al. (2024) identificaram que áreas de maior nível socioeconômico em Santiago, Chile, possuíam maior diversidade de espécies em espaços verdes públicos, enquanto regiões mais vulneráveis apresentavam menor diversidade. Schwarz et al. (2015), em um estudo envolvendo sete cidades nos Estados Unidos, reforçaram essa tendência, mostrando que bairros de alta renda são mais propensos a abrigar uma maior diversidade de espécies.

Essa relação evidencia que a classe socioeconômica determina a qualidade da vegetação urbana, influenciando a diversidade e a distribuição das espécies, a manutenção das áreas verdes e o planejamento urbano. As disparidades na distribuição de áreas verdes entre as classes socioeconômicas apresentam um desafio significativo de justiça ambiental, com bairros ricos desfrutando de benefícios desproporcionais em comparação com comunidades minoritárias e de baixa renda (Bressane et al., 2024).

Sobre a origem das espécies, 84,8% são exóticas e 15,2% são nativas, com apenas 2,9% dos 2.235 indivíduos registrados representando a flora nativa do Cariri. A utilização de espécies nativas em áreas urbanas é de grande importância, principalmente no Brasil, que é considerado o país com maior biodiversidade, com cerca de 10-20% de toda a diversidade vegetal do mundo (Lima et al., 2022; Vidal-couto et al., 2023). O predomínio de espécies exóticas na arborização urbana é uma característica recorrente, como evidenciado em diversos estudos no Nordeste do Brasil. Na Paraíba, por exemplo, observou-se uma alta presença de espécies exóticas, indicando a falta de orientação técnica no plantio, com 95,5% das árvores em Santa Helena e uma grande proporção

também em São João do Rio do Peixe (Alencar et al., 2014; Zeá et al., 2015). Da mesma forma, em Teresina, Piauí, Carvalho et al. (2016) encontraram 86% de espécies exóticas ao analisar a arborização urbana de um bairro. Esse padrão não se limita ao Brasil, sendo identificado também em outros locais do mundo, Riley et al. (2018) constatou que árvores exóticas representavam uma porcentagem significativa da diversidade total de espécies em Ohio, Estados Unidos. Schlaepfer et al. (2020) ao analisar o banco de dados de espécies arbóreas presentes em Geneva, Suíça relatou que 90% das espécies são exóticas. Em cidades como Kigali, Lomé, Kumasi, Acra, Maradi, Niamey e em muitas cidades da África do Sul predominam espécies exóticas, com uma composição significativa, variando de 52% a 75% nas espécies lenhosas (Borelli et al., 2023).

A preferência por espécies exóticas pode ser atribuída a fatores como crescimento rápido, características ornamentais, dificuldade de aquisição/produção de mudas de espécies nativas e adaptabilidade a diferentes condições urbanas. No entanto, essa prática pode acarretar impactos ecológicos, como a redução da biodiversidade nativa e a facilitação de invasões biológicas.

Parâmetros fitossociológicos

Parâmetros fitossociológicos, densidade absoluta, área basal e Índice de Valor de Importância (IVI) foram calculados para avaliar a estrutura das árvores urbanas. A densidade correspondeu ao número de indivíduos por hectare; a área basal utilizou o DAP (diâmetro à altura do peito) para medir a seção transversal do tronco; o IVI combinou densidade relativa, frequência e dominância para mensurar a importância das espécies. Na área total do estudo (34,43 hectares) observou-se densidade absoluta total de 64,9 indivíduos e uma área basal de 5,77 m². As espécies que se destacaram com maiores índices de valor de importância (IVI) foram: *Azadirachta indica* (48,4%), *Moquilea tomentosa* (7,8%), *Ficus benjamina* (6,9%) (Tabela 3).

Tabela 3. Parâmetros fitossociológicos das 10 espécies presentes com os maiores IVI nos bairros estudados em Juazeiro do Norte, sul do Ceará, Brasil. Onde: DR = densidade relativa (%); FR = Frequência relativa (%); AB = Área Basal; DoR = Dominância Relativa (%) e IVI = Índice de Valor de Importância.

Species	DR	FR	AB	DoR	IVI	IVI (%)
<i>Azadirachta indica</i> A.Juss.	58,34%	3,41%	48203,36	83,58%	145,33%	48,44%
<i>Moquilea tomentosa</i> Benth.	11,01%	3,41%	5277,22	9,15%	23,57%	7,86%
<i>Ficus benjamina</i> L.	10,87%	3,41%	3741,58	6,49%	20,77%	6,92%
<i>Cordia myxa</i> L.	2,24%	3,41%	149,35	0,26%	5,91%	1,97%
<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S.Irwin & Barneby	2,37%	3,41%	54,46	0,09%	5,88%	1,96%
<i>Terminalia catappa</i> L.	1,70%	3,41%	102,17	0,18%	5,29%	1,76%
<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.)	1,52%	3,41%	43,99	0,08%	5,01%	1,67%

Hauenschild						
<i>Caesalpinia pulcherrima</i> (L.) Sw.	0,72%	3,41%	1,63	0,003%	4,13%	1,38%
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	0,45%	3,41%	2,59	0,004%	3,86%	1,29%
<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	0,36%	3,41%	5,31	0,009%	3,78%	1,26%

Os valores de abundância por hectare nos bairros Horto (53,2 ind/ha), Franciscanos (261 ind/ha) e Lagoa Seca (36,6 ind/ha) sugerem diferenças na densidade arbórea, considerando a área das vias urbanas. Esses valores foram calculados apenas para fins comparativos, dividindo-se o número total de indivíduos arbóreos pela área das ruas em cada bairro.

No Horto, apesar de possuir a maior área total (523,70 ha), a área das vias é proporcionalmente menor (6,27 ha). Isso sugere um bairro com menor densidade de infraestrutura viária e mais espaço para cobertura vegetal em outras áreas além das vias como parques, quintais e áreas de preservação. Isso pode justificar a menor densidade arbórea nas vias, já que o plantio pode estar concentrado em outras áreas.

O Franciscanos é o bairro com a menor área total (74,16 ha) e apresenta a maior densidade de árvores (261 ind/ha). Apesar de possuir uma área viária proporcionalmente maior (3,87 ha), as vias urbanas são densamente arborizadas, isso pode estar relacionado à menor disponibilidade de espaço para vegetação em outras áreas. No entanto, o bairro também apresenta a menor riqueza de espécies, o que pode limitar a resiliência ecológica.

Por outro lado, Lagoa Seca Possui uma área total intermediária (303,19 ha), mas a maior proporção de área dedicada a vias (24,29 ha). Apesar da maior extensão de vias, a densidade de árvores é a menor entre os três bairros. A combinação de ruas mais largas, concentração da vegetação em espaços privados e possíveis desafios urbanos pode justificar a menor densidade de árvores na Lagoa Seca, mesmo com sua alta diversidade e maior renda.

De acordo com Cirino et al. (2022), uma distribuição espacial equilibrada das áreas verdes dentro das cidades apresenta efeitos positivos mais consistentes para a saúde pública do que a simples presença de grandes áreas vegetadas concentradas. Essa perspectiva ressalta a importância do plantio de árvores nas ruas como uma ferramenta estratégica para promover ambientes urbanos mais saudáveis e resilientes.

Esses padrões de densidade arbórea refletem diferenças marcantes nas características físicas, socioeconômicas e históricas de cada bairro, com o tamanho total do bairro exercendo uma influência direta na proporção de área destinada às vias urbanas e na distribuição da arborização. Independentemente dessas diferenças, a alta densidade

arbórea, quando presente, oferece benefícios ambientais significativos, áreas densamente arborizadas contribuem para a mitigação de ilhas de calor, sequestro de carbono e a melhoria da qualidade do ar, promovendo um ambiente mais saudável e sustentável (Feng et al., 2025).

Distribuição diamétrica e de altura

Para todos os bairros analisados, o maior diâmetro registrado foi de 106,3 cm para um indivíduo de *Enterolobium contortisiliquum* localizado na Lagoa Seca. Além disso, foram observados diâmetros de 103,1 e 82,1 cm em indivíduos de *Moquilea tomentosa* e 94,2 cm e 87,5 cm em *Ficus benjamina*, ambos situados no bairro Franciscanos. A variação da estrutura vertical resultou em alturas mínimas e máximas de 1,5 e 15,9 metros, respectivamente. A altura máxima foi registrada para espécies de *Moquilea tomentosa* no Franciscanos.

Em relação à altura a maior quantidade de indivíduos é de 3 a 4 metros, com 47,9%, seguida por indivíduos de 4 a 5 metros (20,4%), indicando que a maioria das árvores está em um estágio intermediário de crescimento. A quantidade de árvores diminui conforme a altura, o que pode ser atribuído à limitação de espaço nesses ambientes urbanos ou à seleção de espécies adaptadas a esses ambientes, indicando que a arborização é composta predominantemente por indivíduos jovens ou de pequeno porte, característica típica de áreas urbanas onde o perfil arbóreo reflete estágios iniciais de crescimento ou o porte médio das espécies mais frequentemente selecionadas para o planejamento urbano (Quigley, 2004).

A baixa ocorrência de árvores com DAP superior a 45 cm evidencia a raridade de árvores de grande porte, provavelmente influenciada por fatores como podas regulares, remoções devido à expansão urbana, e a ausência de espécies que alcançam maiores diâmetros no planejamento arbóreo. De forma semelhante, Adeyemi; Shackleton (2024) analisaram a arborização de vias urbanas em Lagos, Nigéria, e identificaram uma queda acentuada na frequência de árvores com DAP superior a 40 cm, reforçando a ideia de que árvores grandes são incomuns em áreas urbanas, muitas vezes devido ao manejo intensivo e à falta de estratégias de planejamento voltadas para o cultivo de espécies de maior porte.

A análise dos bairros revelou padrões distintos na composição da vegetação em termos de altura e diâmetro. O Franciscanos apresentou a maior dispersão dos pontos, indicando uma vegetação mais diversificada em porte, com uma ampla variação de alturas e diâmetros, característica de diferentes estágios sucessionais. No Horto, o agrupamento

de pontos em faixas mais baixas de altura e diâmetro sugere uma vegetação predominantemente jovem ou composta por espécies de menor porte, possivelmente devido a práticas de manejo específicas, como reflorestamento recente, cortes seletivos ou substituição de vegetação. Já na Lagoa Seca, embora a dispersão seja semelhante à observada no Franciscanos, a concentração em faixas intermediárias sugere condições ambientais ou de manejo que favorecem o desenvolvimento de espécies de porte médio. Contudo, a menor densidade geral indica que, apesar de abrigar árvores maiores, o bairro pode não possuir uma cobertura arbórea tão ampla quanto o esperado (Figura 04).

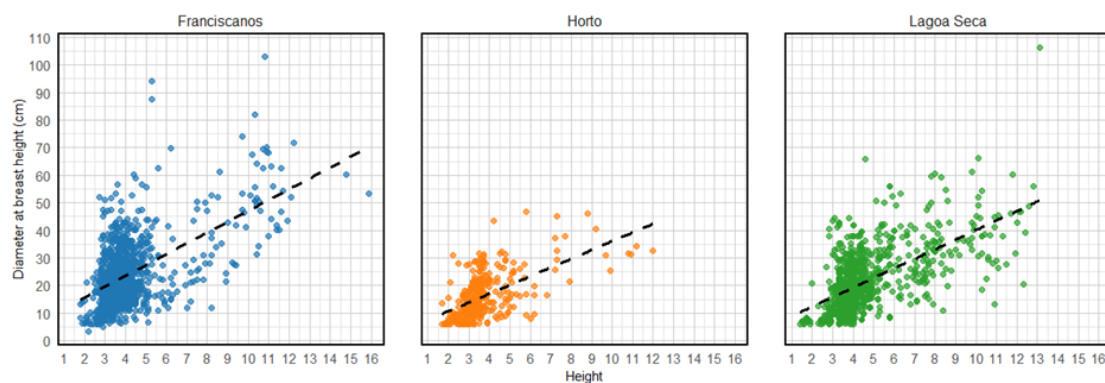


Figura 4. Relação entre altura e o diâmetro à altura do peito (DAP) nos três bairros analisados: Horto, Franciscanos e Lagoa Seca.

Essas diferenças no tamanho e na estrutura das árvores têm importantes implicações para a oferta de serviços ecossistêmicos. Árvores maiores e que representam múltiplos estágios sucessionais, como observado em Franciscanos, proporcionam maior diversidade estrutural, potencializando benefícios como biodiversidade, regulação do microclima, sequestro de carbono e regulação hídrica. No entanto, exigem uma poda mais cuidadosa para garantir a segurança e preservar sua integridade estrutural. Áreas com árvores mais jovens ou menores apresentam menor capacidade de fornecer alguns desses serviços, mas permitem podas mais simples e frequentes, que promovem o crescimento saudável. A seleção adequada de espécies, considerando o tamanho das árvores e sua resiliência ao ambiente urbano, é essencial para maximizar os benefícios associados à arborização urbana.

Quantificação do teor de carbono pelo método de combustão seca - Gravimetria por incineração em forno mufla

Os teores médios de carbono, avaliados nos compartimentos das árvores (folhas, galhos e caule) demonstraram uma faixa variável entre 48,1% e 57,4% (Tabela 4). Em relação à matéria orgânica (MO), os valores médios variaram de 82,7% a 98,8%.

Tabela 4. Médias dos valores de Matéria Orgânica (MO) e Teor de Carbono (TC) obtidos em cada espécie e compartimentos analisados.

Espécies	MO (%)			TC (%)		
	Folha	Galho	Caule	Folha	Galho	Caule
<i>Azadirachta indica</i> A.Juss.	90,4	96,8	92,2	52,5	56,3	53,6
<i>Moquilea tomentosa</i> Benth.	95,0	97,0	95,0	55,2	56,4	55,2
<i>Ficus benjamina</i> L.	88,6	92,5	82,7	51,5	53,8	48,1
<i>Cordia myxa</i> L.	89,6	96,7	86,4	52,1	56,2	50,2
<i>Senna siamea</i> (Lam.) H.S.Irwin & Barneby	89,6	95,6	89,4	52,1	55,6	52,0
<i>Terminalia catappa</i> L.	91,7	95,6	93,8	52,9	55,6	54,5
<i>Sarcomphalus joazeiro</i> (Mart.) Hauenschild	82,7	95,9	97,1	48,1	55,8	56,4
<i>Caesalpinia pulcherrima</i> (L.) Sw.	87,9	96,8	97,9	51,1	56,3	56,9
<i>Handroanthus impetiginosus</i> (Mart. ex DC.) Mattos	93,9	92,8	94,7	54,6	53,9	55,0
<i>Delonix regia</i> (Bojer ex Hook.) Raf.	94,9	94,3	98,8	55,2	54,8	57,4

Os resultados indicaram que a distribuição de matéria orgânica (MO) e teor de carbono (TC) apresentam maior concentração nos galhos em 60% das espécies, enquanto em 40% das espécies os valores mais elevados foram encontrados no caule.

A variação no teor de carbono pode ocorrer entre espécies diferentes, entre indivíduos da mesma espécie sob condições ambientais distintas e até mesmo entre diferentes componentes de uma única planta (Watzlawick et al., 2003; Santos et al., 2023). Estudos realizados no nordeste do Brasil por Santos (2022) e Lisboa et al. (2024) corroboram essa variabilidade, identificando que os galhos se destacam como os principais compartimentos de acúmulo de biomassa, apresentando os maiores teores de carbono.

Por outro lado, Schwerz et al. (2020) ao analisar três espécies no sul do Brasil, verificou que o caule é o principal reservatório de carbono em todas as espécies estudadas. No caso das folhas, não foi observada uma predominância em relação a MO e TC, no entanto, estudos de Watzlawick (2011) e Santos et al. (2023) indicaram valores mais elevados de teor de carbono nesse compartimento.

Esses resultados ressaltam a importância de se considerar as características específicas das espécies e dos ambientes em estudos sobre alocação de biomassa e carbono, o que permite uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas ecológicas e dos serviços ecossistêmicos fornecidos pela vegetação. Compreender a capacidade das árvores urbanas de armazenar carbono é fundamental, uma vez que árvores em áreas urbanas de países em desenvolvimento estão sujeitas a condições adversas, como temperaturas mais elevadas, maiores concentrações de carbono e maior deposição de nitrogênio, quando comparadas às árvores que crescem em ambientes não urbanos (Imam; Banerjee, 2016).

Dentre as espécies que se destacaram, *Moquilea tomentosa* apresentou desempenho notável em folhas e galhos, com valores significativos de MO e TC, sendo 95% e 55,2%,

respectivamente, nas folhas, e 97% e 56,4% nos galhos. Embora os estudos focados no TC dessa espécie ainda sejam limitados, *M. tomentosa* se destaca como uma planta que merece mais atenção científica, especialmente por ser amplamente utilizada na arborização urbana de diversos estados brasileiros.

Em relação ao caule, *Delonix regia* apresentou os maiores valores de 98,8% MO e 57,4% para TC. No estudo de Shadman et al. (2022) realizado em Dhaka, Bangladesh, *D. regia* destacou-se como a espécie com os maiores estoques de carbono. Por outro lado, Nero et al. (2024), ao analisar o armazenamento de carbono em espécies arbóreas de parques urbanos em Kumasi, Gana, registrou *D. regia* entre as espécies dominantes, mas com os menores estoques de carbono. Essa discrepância entre os estudos reflete a influência de fatores ambientais e condições locais, que podem impactar significativamente o acúmulo de carbono, mesmo dentro da mesma espécie, demonstrando que o potencial de sequestro de carbono das árvores está diretamente relacionado a altura, idade e DAP dos indivíduos.

A espécie *Ficus benjamina* apresentou os menores valores de teor de carbono (TC) no galho e caule, com 53,8% e 48,1%, respectivamente. Esses resultados são semelhantes aos encontrados em outros estudos no semiárido brasileiro com espécies do gênero *Ficus*. Lisboa et al. (2024), ao estudar a arborização em praças no Ceará, observaram que *Ficus retusa* teve o menor valor de carbono no caule. Nunes (2018) encontrou resultados parecidos para uma espécie de *Ficus* na Paraíba, indicando uma tendência de menores valores de carbono nas espécies desse gênero nessas regiões. *Sarcomphalus joazeiro* apresentou o menor valor de TC em folhas, com 48,1%. No entanto estudos sobre o TC nesta espécie são ainda escassos, o que limita a compreensão mais aprofundada de seu potencial de sequestro de carbono e de seu comportamento em diferentes ambientes.

Os resultados da análise de variância (ANOVA), seguida pelo teste de Tukey, indicaram diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) entre MO e TC das folhas, galhos e caule. Esses valores correspondem à média de dados obtidos das 10 espécies estudadas (Figura 5).

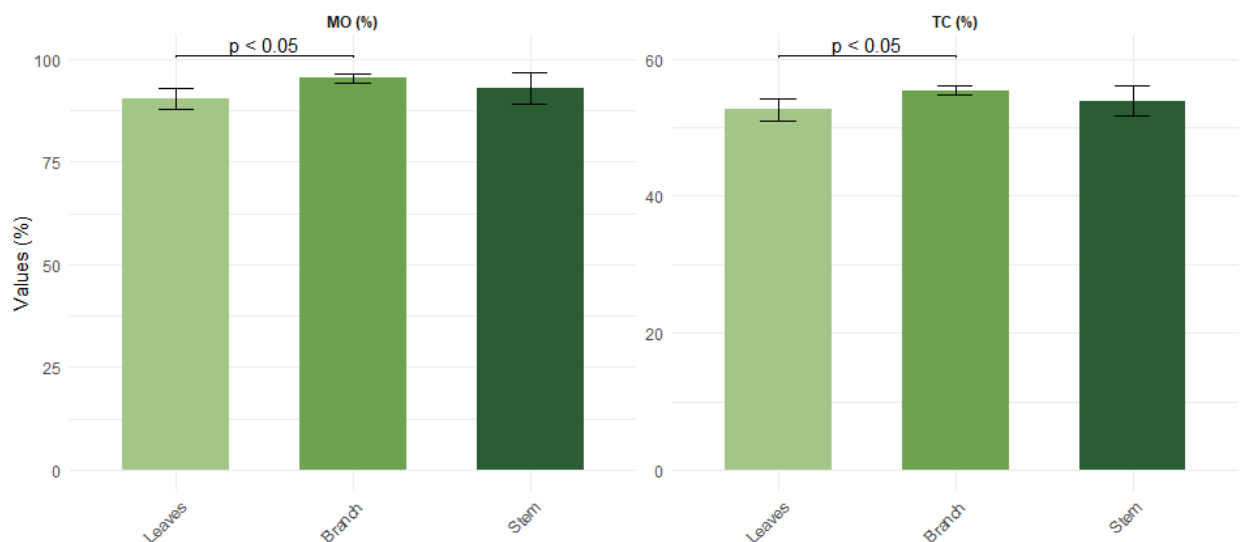


Figura 5. Valores de matéria orgânica e teor de carbono nos compartimentos das espécies, analisados através de ANOVA e do teste de comparações múltiplas de Tukey.

Os galhos apresentaram valores superiores em comparação às folhas ($p < 0,05$), enquanto os valores observados no caule permaneceram estatisticamente semelhantes aos dos galhos. Esses resultados podem ser atribuídos às diferenças estruturais entre os componentes analisados, visto que os galhos e o caule possuem maior densidade de tecidos lignificados e concentração de compostos estruturais, o que aumenta os teores de carbono e matéria orgânica. Por outro lado, as folhas apresentam maior proporção de tecidos fotossintéticos, menos densos, e maior conteúdo de água, o que explica os valores inferiores observados nesses parâmetros.

Captura de carbono e estimativa de biomassa por meio de equações alométricas

Os dados coletados sobre biomassa vegetal, estoque de carbono na biomassa e carbono sequestrado (Figura 6) revelaram variações expressivas entre as áreas de estudo, refletindo a heterogeneidade na densidade de árvores presente em cada bairro.

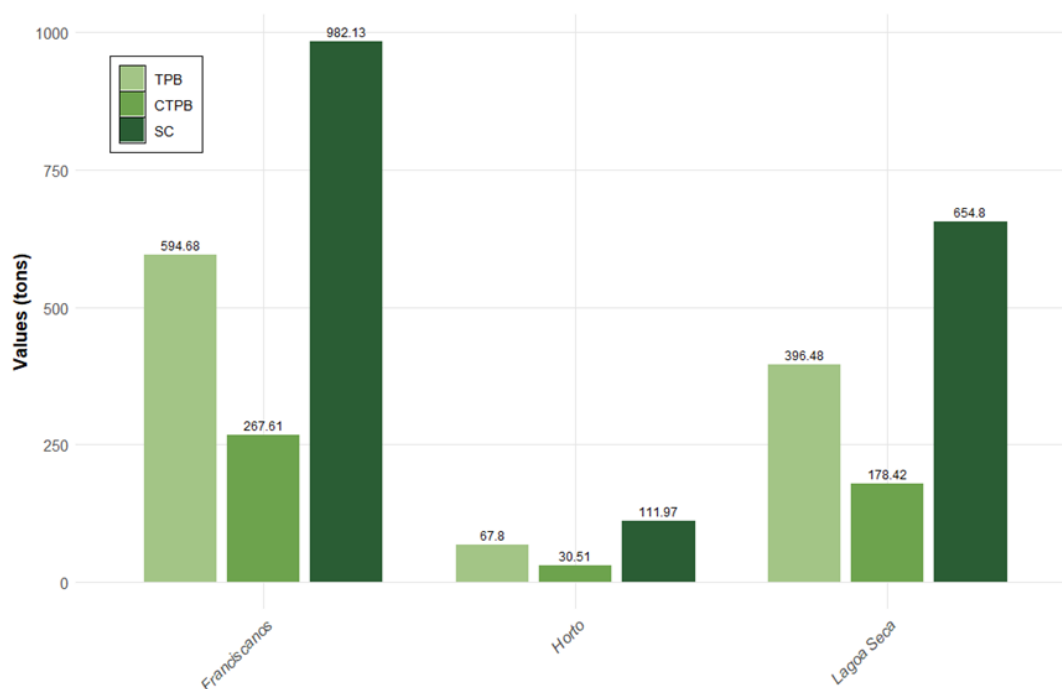


Figura 6. Valores de biomassa total (TPB), carbono total (CTPB) e sequestro de carbono (SC) captados pelos indivíduos arbóreos nos bairros estudados.

O maior destaque foi para o Franciscanos, apresentou uma BVT muito superior com 594,68 toneladas, resultando em um CBV de 267,61 toneladas. Este estoque de carbono reflete em um sequestro de 982,13 t de CO₂, apesar de uma área menor em relação as vias (3,87 ha) comparado ao Horto e Lagoa Seca, as árvores desempenham um papel desproporcionalmente significativo no sequestro de carbono, estando fortemente relacionado a quantidade de indivíduos presente no bairro.

Por outro lado, Horto apresentou valores menores em todos os parâmetros, BVT foi de apenas 67,8 toneladas, com um CBV de 30,51 toneladas, refletindo diretamente sobre a menor quantidade de árvores presente nas vias do bairro, apesar do baixo estoque de carbono, as árvores ainda são importantes para sequestrar 111,97 t de CO₂.

Por sua vez, em Lagoa Seca, a concentração de árvores em faixas intermediárias de altura e diâmetro, associada à dispersão semelhante à do Franciscanos, está de acordo com os valores do BVT que foi de 396,48 toneladas, CBV de 178,42 t quantidade de CO₂ sequestrado atingiu 654,80 toneladas. A menor quantidade de indivíduos pode explicar os valores mais baixos em comparação ao Franciscanos, embora o porte médio das árvores contribua para uma maior eficiência no sequestro de carbono em relação ao Horto.

De modo geral, os 2.235 indivíduos deste estudo são capazes de gerar uma BVT de 1.058,96 toneladas, um CBV de 476,54 toneladas e sequestrar um total de 1748,90 toneladas de CO₂. Quanto à área das vias arborizadas, o total foi de 34,43 hectares. Apesar

da relevância desses achados, ainda há uma notável carência de estudos que avaliem o potencial de sequestro de carbono nas áreas urbanas do interior do Nordeste brasileiro, uma lacuna especialmente preocupante diante do ritmo acelerado de urbanização e dos impactos climáticos associados à expansão urbana desordenada. Juazeiro do Norte, por exemplo, representa um caso emblemático: localizado na região semiárida, o município figura entre os dez maiores emissores de gases de efeito estufa do estado do Ceará, totalizando 396,0 kt CO₂e em 2023 (SEEG, 2024). Esse cenário é agravado pela sua importância regional como polo religioso e turístico, atraindo aproximadamente 2,5 milhões de visitantes anualmente (Oliveira, 2023), o que aumenta consideravelmente a pressão sobre os recursos naturais e a infraestrutura urbana.

As equações alométricas são amplamente utilizadas em diversos estudos para estimar parâmetros como biomassa, estoque de carbono e sequestro de CO₂ na vegetação. Felseburgh et al. (2024) ao analisar 336 indivíduos arbóreos em uma avenida da cidade de Santarém, no Pará, estimaram um estoque de carbono de 5,1 toneladas, esse valor pode ser considerado baixo quando comparado a resultados de outros estudos realizados em fragmentos urbanos. Viana et al. (2023) estimaram um total de 586,4 toneladas de carbono armazenadas em 273 indivíduos arbóreos localizados em praças no município de Cáceres, Mato Grosso.

Devi et al. (2021) em seu estudo observou que as árvores urbanas alocam mais carbono na vegetação do que no solo e, portanto, pode ser empregada para a redução do calor urbano das cidades, capturando CO₂ da atmosfera. A gestão da arborização deve, portanto, incentivar o plantio e a manutenção de espécies que possam atingir maiores alturas e diâmetros, respeitando as condições espaciais e de solo de cada local. Além disso, é essencial priorizar o uso de espécies nativas, que oferecem benefícios ecológicos, sociais e econômicos indispensáveis para a sustentabilidade das cidades.

As espécies nativas que se destacaram no armazenamento de carbono e sequestro de CO₂, foram: *Enterolobium contortisiliquum* apresentou 3,2 toneladas de carbono armazenado por indivíduo, correspondendo a 11,7 toneladas de CO₂ sequestradas, seguido por *Tabebuia aurea* (0,8 t de C/ind e 3,1 t de CO₂/ind) e *Sarcomphalus joazeiro* (0,5 t de C/ind e 1,7 t de CO₂/ind). Esses dados evidenciam a importância das espécies nativas em estratégias de mitigação das mudanças climáticas, além de contribuírem para a conservação da biodiversidade, a resiliência ecológica e a valorização dos ecossistemas locais.

Conclusão

Os padrões observados neste estudo evidenciam a relação entre altura das árvores, diâmetro, densidade populacional e indicadores ecológicos, demonstrando como esses fatores estão interligados. A análise também confirma que as condições socioeconômicas desempenham papel decisivo na diversidade de espécies arbóreas, com bairros de maior poder aquisitivo, como Lagoa Seca, apresentando maior diversidade. Essa disparidade revela um desafio de justiça ambiental.

A alta representatividade de *A. indica* e *F. benjamina*, ambas excedendo o limite recomendado de 10% por espécie em ambientes urbanos, indica baixa diversidade e reduzida resiliência da vegetação local. Embora o potencial geral de sequestro de carbono seja considerável, o predomínio de espécies exóticas e de pequeno porte pode limitar a eficácia a longo prazo desse serviço ecossistêmico. A constatação de que espécies nativas como *E. contortisiliquum*, *T. aurea* e *S. joazeiro* são boas sequestradoras de carbono ressalta o valor subutilizado da flora local.

Esses resultados fornecem importantes subsídios para o manejo e planejamento da arborização urbana em Juazeiro do Norte e em outras cidades do semiárido. O reconhecimento dos benefícios oferecidos pelos serviços ecossistêmicos pode orientar estratégias que promovam maior diversidade de espécies, priorizem o plantio de grandes árvores nativas e assegurem uma distribuição mais equitativa da cobertura arbórea entre os bairros. Tais ações são essenciais não apenas para mitigar os impactos das mudanças climáticas, mas também para fomentar ambientes urbanos mais resilientes, saudáveis e ambientalmente justos.

Referências

- Adeyemi, O., & Shackleton, C. M. The abundance and distributional (in)equalities of forageable street tree resources in Lagos metropolis, Nigeria. *Ecosphere*, 15(9), e70002. 2024. <https://doi.org/10.1002/ecs2.70002>
- Albertin, R. M., Angelis, R. de, Angelis Neto, G. de, & Angelis, B. L. D. de. Diagnóstico quali-quantitativo da arborização viária de Nova Esperança, Paraná, Brasil. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 6(3), 128–148. 2011. <https://doi.org/10.5380/revsbau.v6i3.66477>
- Alencar, L. dos S., Souto, P. C., Moreira, F. T. de A., Souto, J. S., & Borges, C. H. A. Inventário quali-quantitativo da arborização urbana em São João do Rio do Peixe – PB. *Agropecuária Científica no Semiárido (ACSA)*, 10(2). 2014. <https://doi.org/10.30969/acsa.v10i2.554>
- Allegretto, G., Kendal, D., & Flies, E. J. A systematic review of the relationship between urban forest quality and socioeconomic status or race. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127664. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127664>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., de Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- Amorim, L. D. M. de, Sousa, L. de O. F. de, Oliveira, F. F. M., Camacho, R. G. V., & Melo, J. I. M. de. Fabaceae na Floresta Nacional (FLONA) de Assú, semiárido potiguar, nordeste do Brasil. *Rodriguésia*, 67(1). 2016. <https://doi.org/10.1590/2175-7860201667108>
- Arantes, B. L., Castro, N. R., Gilio, L., Polizel, J. L., & Silva Filho, D. F. da. (2021). Urban forest and per capita income in the mega-city of São Paulo, Brazil: A spatial pattern analysis. *Cities*, 111, 103099. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.103099>
- Aregahegn, Z. Optimization of the analytical method for the determination of organic matter. *Journal of Soil Science and Environmental Management*, 11(1), 1–5. 2020. <https://doi.org/10.5897/JSSEM2019.0784>
- Arevalo, L. A., Alegre, J. C., & Montoya Vilcahuaman, L. J. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra (Documento No. 73). Embrapa Florestas. 2002.
- Baptista, M. S. P., Assunção, V. A., Bueno, M. L., Casagrande, J. C., & Sartori, Â. L. B. Representatividade de espécies de Fabaceae em solos restritivos explica a diferença na estrutura de dois tipos de vegetação do Chaco. *Acta Botanica Brasilica*, 34(3), 427–438. 2020. <https://doi.org/10.1590/0102-33062020abb0064>
- Belaire, J. A., Higgins, C., Zoll, D., Lieberknecht, K., Bixler, R. P., Neff, J. L., Keitt, T. H., & Jha, S. (2022). Fine-scale monitoring and mapping of biodiversity and ecosystem services reveals multiple synergies and few tradeoffs in urban green space management. *Science of The Total Environment*, 806(Pt 3), 157801. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157801>
- Borelli, S., Conigliaro, M., & Di Cagno, F. Urban forests: A global perspective. Rome. 2023. <https://doi.org/10.4060/cc8216en>
- Bressane, A., Pinto, J. P. C., & Medeiros, L. C. de C. Urban green space disparities: Implications of environmental injustice for public health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 99, 128441. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128441>
- Carmo, D. L., & Silva, C. A. Métodos de quantificação de carbono e matéria orgânica em resíduos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36(4). 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000400015>
- 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. *Revista da Casa da Geografia de Sobral (RCGS)*, 18(1), 100–117. 2016.
- Chen, M., Dai, F., Yang, B., & Zhu, S. Effects of urban green space morphological pattern on variation of PM2.5 concentration in the neighborhoods of five Chinese megacities. *Building and Environment*, 158, 1–15. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.058>
- Cirino, D. W., Tambosi, L. R., Mauad, T., Freitas, S. R. de, & Metzger, J. P. (2022). Balanced spatial distribution of green areas creates healthier urban landscapes. *Journal of Applied Ecology*, 59(7), 1781–1793. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.14195>
- Dangulla, M., Abd Manaf, L., Firuz Ramli, M., & Rusli Yacob, M. Urban tree composition, diversity and structural characteristics in North-western Nigeria. *Urban Forestry & Urban Greening*, 48, 126512. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126512>
- Das, M., Das, A., & Momin, S. Quantifying the cooling effect of urban green space: A case from urban parks in a tropical mega metropolitan area (India). *Sustainable Cities and Society*, 87, 104062. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104062>
- Davies, C., & Laforteza, R. Urban green infrastructure in Europe: Is greenspace planning and policy compliant? *Land Use Policy*, 69, 93–101. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2017.08.018>
- Deecken, B. P., Andrade, E., Costa, C. A., Andrade, R. L. T., & Battistola, L. D. Urban afforestation as a bioindicator of atmospheric mercury pollution: A case study with *Moquilea tomentosa* Benth. (Chrysobalanaceae) in the southern region of the Amazon. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, 11(14), 36557. 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36557>
- Devi, N. B., Lepcha, N. T., Mahalik, S. S., Dutta, D., & Tsanglao, B. L. Urban sacred grove forests are potential carbon stores: A case study from Sikkim Himalaya. *Environmental Challenges*, 4, 100072. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100072>
- Dong, Z., Wu, Y., & Xu, Y. The increasing climate inequalities of urban carbon emissions: The distributional effect of low-carbon city pilot policy. *Urban Climate*, 52, 101718. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101718>
- Emilsson, T., & Sang, Å. O. Impacts of climate change on urban areas and nature-based solutions for adaptation.

- In N. Kabisch, H. Korn, J. Stadler, & A. Bonn (Eds.), *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas* (pp. 21-34). Springer. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56091-5_2
- Felsemburgh, C. A., Fonseca Júnior, É. M., Rocha, D. M., Santos, R. A. A., Souza, A. J. V., & Peleja, V. L. Estimativa de biomassa e carbono de espécies arbóreas e palmeiras em uma via pública no município de Santarém – PA. *Cuadernos De Educación Y Desarrollo*, 16(11), e6272. 2024. <https://doi.org/10.55905/cuadv16n11-039>
- Feng, R., Wang, F., Liu, S., Qi, W., Zhengchen, R., & Wang, D. Synergistic effects of urban forest on urban heat island-air pollution-carbon stock in mega-urban agglomeration. *Urban Forestry & Urban Greening*, 103, 128590. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128590>
- Feng, R., Wang, F., Zhou, M., Liu, S., Qi, W., & Li, L. Spatiotemporal effects of urban ecological land transitions to thermal environment change in mega-urban agglomeration. *Science of The Total Environment*, 838, 156158. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156158>
- Flora e Funga do Brasil. Consulta pública. 2024.
- Gimenez, P. L. A., Siqueira, M. V. B. M., Guerreiro, S. F., & Sartori, A. A. C. Análise quali-quantitativa da arborização viária de dois bairros do município de Bauru, São Paulo. *Revista do Instituto Florestal*, 35(2), 175–187. 2023. <https://doi.org/10.24278/2178-5031.202335202>
- Goldin, A. Reassessing the use of loss-on-ignition for estimating organic matter content in non-calcareous soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 18, 1111-1116. 1987. <https://doi.org/10.1080/00103628709367886>
- Guevara, B. R., Uribe, S. V., de la Maza, C. L., & Villaseñor, N. R. Socioeconomic disparities in urban forest diversity and structure in green areas of Santiago de Chile. *Plants (Basel)*, 13(13), 1841. 2024. <https://doi.org/10.3390/plants13131841>
- Gurney, K. R., Kılış, Ş., Seto, K. C., Lwasa, S., Moran, D., Riahi, K., Keller, M., Rayner, P., & Luqman, M. Greenhouse gas emissions from global cities under SSP/RCP scenarios, 1990 to 2100. *Global Environmental Change*, 73, 102478. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102478>
- Huang, Q., Xu, C., Jiang, W., Yue, W., Rong, Q., Gu, Z., & Su, M. Urban compactness and patch complexity influence PM2.5 concentrations in contrasting ways: Evidence from the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area of China. *Ecological Indicators*, 133, 108407. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108407>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Juazeiro do Norte - Ceará: Dados geográficos e populacionais. 2022. https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5567/1/BRU_n05_urbanizacao.pdf
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2014). *Urbanização brasileira: características, diagnósticos e perspectivas* (Boletim Regional, Urbano e Ambiental nº 5).
- International Union for Conservation of Nature and Natural Resources (IUCN). IUCN Red List of Threatened Species. 2024. <https://www.iucnredlist.org/>
- Imam, A. U. K., & Banerjee, U. K. Urbanisation and greening of Indian cities: Problems, practices, and policies. *Ambio*, 45, 442–457. 2016. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0763-4>
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE). Perfil básico municipal: Juazeiro do Norte 2017. Fortaleza. 2017.
- Kuruner-Chitepo, Chiyedza, and Charlie M. Shackleton. "The Distribution, Abundance and Composition of Street Trees in Selected Towns of the Eastern Cape, South Africa." *Urban Forestry & Urban Greening*, vol. 10, no. 3, pp. 247–254. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.06.001>
- Lamprecht, H. Ensayo sobre la estructura florística de la parte suroriental del Bosque Universitario: "El caimital", Estado Barinas. *Revista Forestal Venezolana*, 7, 77-119. 1964.
- Landry, S., & Chakraborty, J. Street trees and equity: Evaluating the spatial distribution of an urban amenity. *Environment and Planning A*, 41(11), 2651–2670. 2009. <https://doi.org/10.1068/a41236>
- Leong, M., Dunn, R. R., & Trautwein, M. D. Biodiversity and socioeconomics in the city: A review of the luxury effect. *Biology Letters*, 14(5). 2018. 20180082. [10.5380/revsbau.v8i3.66438](https://doi.org/10.5380/revsbau.v8i3.66438)
- Lima, J. R., Tozzi, A. M. G. A., & Mansano, V. F. A checklist of woody Leguminosae in the South American Corridor of Dry Vegetation. *Phytotaxa*, 207(1), 1–38. 2015. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.207.1.1>
- Lima, V. P., Lima, R. A. F., Joner, F., Siddique, I., Raes, N., & ter Steege, H. Climate change threatens native potential agroforestry plant species in Brazil. *Scientific Reports*, 12, 1–14. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06234-3>
- Lisboa, M. A. N., Silva, L. V. A., Nascimento, A. S., Silva, A. O., Teixeira, M. R. A., Ferreira, M. F. R., Ferreira, S. C., Silva, A. C. V., Colares, A. V., & Calixto Júnior, J. T. Diversity, structure, and carbon sequestration potential of the woody flora of urban squares in the Brazilian semiarid region. *Trees, Forests and People*, 13, 100561. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100561>
- Liu, H., Cui, W., & Zhang, M. Exploring the causal relationship between urbanization and air pollution: Evidence from China. *Sustainable Cities and Society*, 80, 103783. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103783>
- Locke, D. H., Landry, S. M., Grove, J. M., & Chowdhury, R. R. What's scale got to do with it? Models for urban tree canopy. *Journal of Urban Ecology*, 2(1). 2016. <https://doi.org/10.1093/jue/juw006>
- Lundgren, W. J. C., Silva, L. F., & Almeida, A. Q. Influência das espécies exóticas arbóreas urbanas na área de cobertura da cidade de Serra Talhada – PE. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, 8(3), 96–107. 2013. <https://doi.org/10.5380/revsbau.v8i3.66438>
- Meyfroidt, P., de Bremond, A., Ryan, C. M., Archer, E., Aspinall, R., Chhabra, A., ... & zu Ermgassen, E. K. H. J. Ten facts about land systems for sustainability. *Sustainability Science*, 119(7), e2109217118. 2022. <https://doi.org/10.1073/pnas.2109217118>
- Nero, B. F., Kuusaana, E. D., Ahmed, A., & Campion, B. B. Carbon storage and tree species diversity of urban parks in Kumasi, Ghana. *City and Environment Interactions*, 24, 100156. 2024.

<https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100156>

Nunes, A. R. V. Conforto térmico e estimativa da captura do carbono pela vegetação em diferentes áreas da cidade de Catolê do Rocha-PB [Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Campina Grande]. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Campus de Patos, Paraíba. 2018.

Nowak, D. J., & Greenfield, E. J. The increase of impervious cover and decrease of tree cover within urban areas globally (2012–2017). *Urban Forestry & Urban Greening*, 49, 126638. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126638>

Oliveira, J. C. A. Juazeiro do padre Cícero: o patrimônio, o turismo e a folk museografia. *Revista Iberoamericana de Turismo*, v. 13, p. 100–113. 2023.

Ossola, A., & Lin, B. B. Making nature-based solutions climate-ready for the 50 °C world. *Environmental Science & Policy*, 123, 151–159. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.05.026>

Paula, L. de, Duarte, M. S. S., Tostes, R. B., Oliveira Júnior, P. R., & Ruback, S. S. Arborização urbana do bairro Centro do município de Cataguases, MG. *Revista Agrogeoambiental*, 7(2), 101–112. 2015. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v7n22015708>

Pedlowski, M. A., Da Silva, V. A. C., Adell, J. J. C., & Heynen, N. C. Urban forest and environmental inequality in Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brazil. *Urban Ecosystems*, 6, 9–20. 2002. <https://doi.org/10.1023/A:1025910528583>

Pena, J. C., Costa, N. R. da, Martello, F., & Ribeiro, M. C. (2024). The street tree distribution across a streetscape reflects the social inequality of Latin American cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, 91, 128156. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128156>

Peng, J., Liu, Q., Xu, Z., Lyu, D., Du, Y., Qiao, R., & Wu, J. How to effectively mitigate urban heat island effect? A perspective of waterbody patch size threshold. *Landscape and Urban Planning*, 202, 103873. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103873>

Quigley, M. F. (2004). Street trees and rural conspecifics: Will long-lived trees reach full size in urban conditions? *Urban Ecosystems*, 7, 29–39. <https://doi.org/10.1023/B:UECO.0000020170.58404.e9>

R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

Rehman, Z., Zubair, M., Dar, B. A., Habib, M. M., Abd-ElGawad, A. M., Yasin, G., Gilani, M. M., Malik, J. A., Rafique, M. T., & Jahanzaib, J. (2025). Urban parks and native trees: A profitable strategy for carbon sequestration and climate resilience. *Land*, 14(4), 903. <https://doi.org/10.3390/land14040903>

Ren, Z., Fu, Y., Dong, Y., Zhang, P., & He, X. Rapid urbanization and climate change significantly contribute to worsening urban human thermal comfort: A national 183-city, 26-year study in China. *Urban Climate*, 43, 101154. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101154>

Ren, Z., Zheng, H., He, X., Zhang, D., Shen, G., & Zhai, C. Changes in spatio-temporal patterns of urban forest and its above-ground carbon storage: Implication for urban CO₂ emissions mitigation under China's rapid urban expansion and greening. *Environment International*, 129, 438–450. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.010>

Ribeiro, F. P., Sartori, R. A., Sales, G. P. d. S., & Rajão, H. (2024). Who has the right to urban green areas? Environmental justice in a Brazilian metropolis. *Historia Ambiental Latinoamericana y Caribeña (HALAC)*, 14, 295–325. <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2024v14i2.p295-325>

Riley, C. B., Herms, D. A., & Gardiner, M. M. Exotic trees contribute to urban forest diversity and ecosystem services in inner-city Cleveland, OH. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29, 367–376. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2017.01.004>

Rodriguez, R. S., Ürge-Vorsatz, D., & Barau, A. S. Sustainable Development Goals and climate change adaptation in cities. *Nature Climate Change*, 8, 181–183. 2018. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0098-9>

RStudio Team. (2023). RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC. <https://posit.co/>

Santamour, F. S. Trees for urban planting: Diversity, uniformity, and common sense. In *Proceedings of the Seventh Conference of the Metropolitan Tree Improvement Alliance (METRIA)* (pp. 57–65). 1990.

Santos, A. C. Carbon stocks in the soil-vegetation system in a fragment of the Atlantic tropical forest in the Northeast of Brazil (Master's thesis). Graduate Program in Forest Sciences, Federal Rural University of Pernambuco. 2022.

Santos, G., & Fabricante, J. R. Potencial de invasão biológica do Nim (*Azadirachta indica* A. Juss.) no Nordeste Brasileiro. *Revista de Ciências Ambientais*, 14. 2020. <https://doi.org/10.18316/rca.v14i3.5093>

Santos, L. E., Martorano, L. G., Silva, A. R., & Gama, J. R. V. Teor de carbono em folhas, galhos e fustes de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl., *Dipteryx odorata* (Aubl.) Willd. e *Khaya grandifoliola* C. DC. em sistemas integrados na Amazônia oriental brasileira. *Revista Delos*, 16(43), 910–923. 2023. <https://doi.org/10.55905/rdelosv16.n43-026>

Sartori, R. A., Balderi, A. P., Conti, C., Carcamo, A. T., Rajão, H., & Pires, J. P. A. (2024). Floristic and structural analysis of urban tree canopy: From its ecology to its social issues. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 12, 1–28. <https://doi.org/10.4236/gep.2024.1211001>

Sato, J. H., Figueiredo, C. C., Marchão, R. L., Madari, B. E., Benedito, L. E. C., Busato, J. G., & Souza, D. M. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, 71(4). 2014. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0306>

Schlaepfer, M. A., Guinaudeau, B. P., Martin, P., & Wyler, N. Quantifying the contributions of native and non-native trees to a city's biodiversity and ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 56, 126861. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126861>

Schwarz, K., Fragkias, M., Boone, C. G., Zhou, W., McHale, M., Grove, J. M., & et al. Trees Grow on Money:

- Urban Tree Canopy Cover and Environmental Justice. *PLoS ONE*, 10(4), e0122051. 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122051>
- Schwerz, F., Neto, D. D., Caron, B. O., & et al. Carbon stocks, partitioning, and wood composition in short-rotation forestry system under reduced planting spacing. *Annals of Forest Science*, 77(67). 2020. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00974-w>
- Shadman, S., Khalid, P. A., Hanafiah, M. M., Koyande, A. K., Islam, M. A., Bhuiyan, S. A., Woon, K. S., & Show, P.-L. The carbon sequestration potential of urban public parks of densely populated cities to improve environmental sustainability. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102064. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102064>
- SEEG. Juazeiro do Norte (CE). Plataforma SEEG. 2024. <https://plataforma.seeg.eco.br/territorio/ce-juazeiro-do-norte>
- Shanahan, D. F., Lin, B. B., Gaston, K. J., Bush, R., & Fuller, R. A. Socio-economic inequalities in access to nature on public and private lands: A case study from Brisbane, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 130, 14–23. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.06.005>
- Silva, J., Lima, P., Pires, E., Baumann, S., Brigida, C., Rabelo, L., Maestri, M., & Aquino, M. Implicações da utilização do *Ficus* spp. na arborização do município de Santarém, Pará. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 10, 325–334. 2019.
- Silva, L. V. A., Araújo, I. F., Benício, R. M. A., Nascimento, A. S., Morais, H. N., Morais, S. C. O., Lisboa, M. A. N., Cruz, G. V., Fabricante, J. R., & Calixto-Júnior, J. T. Plantas exóticas na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil): ocorrência e usos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(3), 1239–1259. 2022. 10.26848/rbgf.v15.3.p1239-1259
- Silva, V. B., Almeida-Bezerra, J. W., Brito, E. S., Ribeiro, P. R. V., Cordeiro, L. S., Calixto Júnior, J. T., Costa, J. G. M., & Silva, M. A. P. Effect of decomposition of leaves of *Azadirachta indica* A. Juss. on germination and growth of *Myracrodruon urundeuva* Allemão. *South African Journal of Botany*, 142, 42–52. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.05.031>
- Simão Neto, F., Melo Neta, M., Sousa, A., et al. Analysis of the fuel properties of the seed shell of the neem plant (*Azadirachta indica*). *Processes*, 11(2442). 2023. <https://doi.org/10.3390/pr11082442>
- Sothers, C. A., & Prance, G. T. *Moquilea* in Flora do Brasil 2020. Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 2020. <https://floradobrasil2020.jbrj.gov.br/FB48214>
- Tartaglia, E. S., & Aronson, M. F. J. (2024). Plant native: Comparing biodiversity benefits, ecosystem services provisioning, and plant performance of native and non-native plants in urban horticulture. *Urban Ecosystems*, 27, 2587–2611. <https://doi.org/10.1007/s11252-024-01434-0>
- The Angiosperm Phylogeny Group, Chase, M. W., Christenhusz, M. J. M., Fay, M. F., Byng, J. W., Judd, W. S., Soltis, D. E., Mabberley, D. J., Sennikov, A. N., Soltis, P. S., & Stevens, P. F. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20. 2016. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (UNFCCC). Climate plans remain insufficient: More ambitious action needed now. Retrieved December 30, 2024. <https://unfccc.int/news/climate-plans-remain-insufficient-more-ambitious-action-needed-now>
- Viana, C. R. S., Pereira, T. F., Bisinoto, G. D. S., Freire, B. M., Rodrigues, L. C., Muniz, C. C., & Oliveira Junior, E. S. Praças urbanas como potenciais ferramentas na neutralização de carbono. *Peer Review*, 5(18), 394–409. 2023.
- Vidal-Couto, D. B., Brito, C. R., Andrade, I. L. M. M., Cerqueira, A. F., Reis, I. P., Tomasini, S. L. V., Dalmolin, Â. C., & Mielke, M. S. Tree species used in urban forestry in Brazil: A scientometric review. *Rodriguésia*, 74. 2023. <https://doi.org/10.1590/2175-7860202374047>
- Watzlavick, L. F., Ebling, Â. A., Rodrigues, A. L., Veres, Q. J. I., & Lima, A. M. de. Variação nos teores de carbono orgânico em espécies arbóreas da Floresta Ombrófila Mista. *FLORAM*, 18(3), 248–258. 2011. <https://doi.org/10.4322/loram.2011.045>
- Watzlavick, L. F., Sanquetta, C. R., & Arce, J. E. Carbono orgânico em povoamento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze no sul do Estado do Paraná, Brasil. *Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais*, 1(2), 63–68. 2003. <https://doi.org/10.7213/cienciaanimal.v1i2.14919>
- Wang, P., Zhou, B., Han, L., & Mei, R. The motivation and factors influencing visits to small urban parks in Shanghai, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127086. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127086>
- Wu, J., Cheng, D., Xu, Y., Huang, Q., & Feng, Z. Spatial-temporal change of ecosystem health across China: Urbanization impact perspective. *Journal of Cleaner Production*, 326, 129393. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129393>
- Yeomans, J. C., & Bremner, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19(13), 1467–1476. 1988. <https://doi.org/10.1080/00103628809368027>
- Yu, Z., Ciaia, P., Piao, S., et al. Forest expansion dominates China's land carbon sink since 1980. *Nature Communications*, 13, 5374. 2022. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32961-2>
- Zea, J. D. C., Barros, R. F., Souto, P. C., & Souto, J. S. Levantamento e diversidade da arborização urbana de Santa Helena, no semiárido da Paraíba. *Agropecuária Científica no Semiárido (ACSA)*, 11(4), 54–62. 2015. <https://doi.org/10.30969/acsa.v11i4.705>
- Zhao, D., Cai, J., Xu, Y., Liu, Y., & Yao, M. Carbon sinks in urban public green spaces under carbon neutrality: A bibliometric analysis and systematic literature review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128037. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128037>

Artigo II: Análise dos efeitos microclimáticos e da percepção pública da arborização urbana: um modelo no semiárido brasileiro

Resumo: A aceleração do aquecimento global e da urbanização levou a mudanças significativas na densidade urbana e na cobertura do solo, resultando em alterações marcantes no clima urbano. A ampliação das áreas verdes nas cidades tem sido apontada como essencial por diversos estudos, devido aos benefícios que proporcionam à qualidade de vida, pelo seu potencial em mitigar o fenômeno das ilhas de calor e promover melhores condições térmicas. Frente a essa situação, este estudo combina as pesquisas subjetivas com medições objetivas para avaliar o conforto térmico em vias urbanas. As variáveis meteorológicas de temperatura do ar e umidade relativa foram monitoradas por meio de termo-higrômetro AKSO, modelo IBUTG - AK887 e no total foram aplicadas 600 entrevistas aos moradores (200 em cada bairro estudado). Os resultados deste estudo revelam que a cobertura arbórea demonstrou reduzir significativamente a temperatura do ar (1,53 °C a 2,35 °C) e aumentar a umidade relativa, especialmente no período da tarde, quando os índices de calor alcançaram níveis de “Cautela Extrema”. A análise estatística confirmou o efeito da vegetação na mitigação térmica, com diferenças significativas entre ruas vegetadas (VS) e não vegetadas (NVS). Além disso, a percepção pública reforça a importância das árvores: 100% dos entrevistados reconheceram seu papel no sombreamento e mais de 90% relataram melhorias no bem-estar associadas à arborização. Observou-se, ainda, que fatores sociodemográficos influenciam essas percepções, com variações de acordo com faixa etária, gênero, escolaridade e classificação socioeconômica. A maioria dos participantes indicou a necessidade de mais árvores e planejamento estratégico, refletindo tanto reconhecimento quanto expectativa sobre os benefícios da arborização urbana. O estudo comprova que a arborização urbana reduz significativamente a temperatura, sendo essencial para mitigar o calor. A população reconhece seus benefícios, mas aponta desigualdades e demanda mais planejamento e equidade na gestão verde. Conclui-se que investir estrategicamente em arborização é vital para a resiliência climática e o bem-estar urbano.

Palavras-chaves: Arborização viária; Ilhas de calor urbano; Microclima urbano; Percepção socioambiental.

Introdução

A aceleração do aquecimento global e da urbanização levou a mudanças significativas na densidade populacional urbana e na cobertura do solo, resultando em alterações marcantes no clima urbano (Luo et al., 2025). A Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022) enfatizou recentemente em seu relatório sobre ambientes urbanos resilientes que os eventos de calor são um dos principais desafios para o planejamento urbano e a formulação de políticas. Nas cidades, a elevada densidade de edificações e a predominância de materiais que absorvem mais calor causam o aumento das temperaturas, dando origem as ilhas de calor urbanas (ICU) (Rodríguez et al., 2025).

A ICU ocasiona diversos problemas financeiros e de saúde, como o aumento de doenças, mortalidade relacionadas ao calor e o comprometimento da qualidade do ar (Shahmohamadi et al., 2011; Heaviside et al., 2017; Piracha; Chaudhary, 2022; Singh et al., 2024). Sendo causada principalmente por mudanças no uso e cobertura do solo, como diferentes tipos de uso, superfície terrestre opaca, vegetação e distribuição de água (Cheela et al., 2021; Tanoori et al., 2024). Modificações no ambiente natural, morfologia urbana e atividades antropogênicas como transporte, alterações, como a proliferação de edifícios e superfícies impermeáveis, resultam em maior capacidade de calor,

aprisionando mais energia e radiação solar (Zhou et al., 2017; Manoli et al., 2019; Anderson et al., 2024).

O aumento da temperatura provocado pela ICU compromete o conforto térmico e pode causar dificuldades respiratórias, insolação, câibras, desidratação e outros problemas de saúde relacionados ao calor, esses efeitos se intensificam durante ondas de calor, incêndios florestais e dias de temperaturas elevadas no verão, aumentando os riscos à saúde da população (U.S. Environmental Protection Agency, 2016; Cheela et al., 2021). Nesse contexto, soluções baseadas na natureza, especialmente por meio da vegetação, têm se destacado como estratégias eficazes para mitigar os efeitos da ICU, reduzir a intensidade térmica e melhorar o conforto térmico nas áreas urbanas (Barghchi et al., 2024).

A ampliação das áreas verdes nas cidades tem sido apontada como essencial por diversos estudos, devido aos benefícios que proporcionam à qualidade de vida, pelo seu potencial em mitigar o fenômeno das ilhas de calor e promover melhores condições térmicas (Lisboa et al., 2024; Kang; Kim, 2025). Árvores de vias foram identificadas como uma oportunidade para fornecer sombra para comunidades severamente impactadas pelos efeitos de ICU (Skelhorn et al., 2014; Eisenman et al., 2021; McNamara et al., 2022). Podendo ser o único tipo de vegetação capaz de fornecer cobertura de copa aos pedestres e melhorar o microclima local que eles vivenciam (Sanusi et al., 2017).

O conforto térmico é uma condição mental que expressa satisfação com o ambiente, avaliada subjetivamente, essa sensação depende de fatores fisiológicos e psicológicos individuais, sendo desafiador criar condições que agradem a todos. Entre os principais elementos ambientais que afetam essa percepção estão a temperatura do ar, calor irradiado por superfícies, vento e a umidade do ambiente são os principais fatores que influenciam como nos sentimos em determinado local (Kim et al., 2021; Terrani et al., 2024). As características topográficas também influenciam consideravelmente as temperaturas urbanas, mas a pesquisa nessa área permanece insuficiente (Li et al., 2025). O conforto térmico externo contribui para reduzir os impactos do estresse térmico na saúde das pessoas, estimula a prática de atividades ao ar livre e favorece o uso mais frequente e agradável dos espaços públicos (Li; Liu, 2020; Davtalab; Heidari, 2021; Vicedo-Cabrera et al., 2021; Huang et al., 2025). As análises de conforto térmico ao ar livre pode ser feita de duas formas: por meio de pesquisas subjetivas ou medições objetivas, estudos de conforto térmico foram realizados usando pesquisa subjetiva e medições objetivas,

tornando esse conjunto uma ferramenta metodológica para a determinação do conforto térmico (Kumar; Sharma, 2020).

Frente a essa situação, este estudo combina as pesquisas subjetivas com medições objetivas para avaliar o conforto térmico (envolvendo temperatura do ar e umidade relativa) em vias urbanas com e sem árvores durante um ano, com os objetivos: I) Avaliar o microclima e o conforto térmico em diferentes locais considerando variáveis ambientais relevantes; II) Avaliar a percepção da população sobre o conforto térmico proporcionado pela arborização urbana. Parte-se da hipótese de que os efeitos da arborização no conforto térmico são mais evidentes nos meses mais quentes e secos do ano (H1), sendo influenciados pela densidade e estrutura da vegetação, como a cobertura do dossel e a altura das árvores (H2). Além disso, considera-se que a percepção da população sobre o conforto térmico varia de acordo com características sociodemográficas (H3). Com base nos resultados, são propostas recomendações para o planejamento e manejo adequado da arborização para a região, oferecendo melhores condições térmicas. Este estudo serve como base para melhorar as condições microclimáticas em várias cidades do semiárido brasileiro e contribuir para o avanço de um modelo de desenvolvimento urbano sustentável e resiliente às mudanças climáticas.

Metodologia

Área de estudo

O estudo foi realizado no município de Juazeiro do Norte, sul do Ceará, Nordeste do Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), Juazeiro do Norte possui uma população de aproximadamente 303 mil habitantes e uma taxa de urbanização de 95,3% (IPECE, 2022). Localizada na Região Metropolitana do Cariri no nordeste brasileiro, a região é classificada como Aw segundo a classificação de Köppen (Silva et al., 2020; Benício et al., 2023), com estação chuvosa concentrada nos primeiros meses do ano. A precipitação média anual é de aproximadamente 640 mm, representando uma redução em relação aos valores anteriormente registrados, que variavam entre 900 e 1000 mm (CLIMATE-DATA, 2024) enquanto as temperaturas oscilam ao longo do ano, com médias mensais entre 24,7 °C e 29 °C, atingindo mínimas de 20,1 °C e máximas de até 34,4 °C (INMET, 2024).

A cidade de Juazeiro do Norte se consolidou, à nível nacional, como um dos três principais centros religiosos do país, atraindo um número equivalente a 2 milhões de romeiros anualmente (Sousa et al., 2021; Tavares; Silva, 2025). Sendo um dos principais

centros urbanos do sul do Ceará, a cidade é caracterizada por uma ocupação urbana densa que vem passando por um rápido processo de expansão urbana (Nascimento et al., 2025). Nesse contexto de crescimento urbano e complexidade socioespacial, foram selecionados, para este estudo, três bairros com distintas classificações socioeconômicas, Horto ($7^{\circ}10'46.89''\text{S}$ $39^{\circ}19'46.07''\text{W}$), Franciscanos ($7^{\circ}12'46.44''\text{S}$ $39^{\circ}18'47.26''\text{W}$) e Lagoa Seca ($7^{\circ}14'39.87''\text{S}$ $39^{\circ}19'19.58''\text{W}$) (Figura 1).



Figura 1. Localização espacial e caracterização visual das áreas de estudo em Juazeiro do Norte, Ceará. As imagens 1 e 2 pertencem ao bairro Franciscanos, as imagens 3 e 4 ao Horto e 5 e 6 ao Lagoa Seca.

Os bairros escolhidos desempenham papéis essenciais como espaços de lazer, cultura e convivência, refletindo a diversidade e a riqueza histórica da região. Considera-se o Horto como um dos principais bairros da cidade, devido ao simbolismo no qual foi construído, apesar de sua importância simbólica, sua população é predominantemente de baixa renda. O bairro Franciscanos, um dos mais habitados apresenta uma população predominantemente de classe média, refletindo seu processo histórico de ocupação e consolidação urbana. Já Lagoa Seca é reconhecido como uma das áreas mais valorizadas, com infraestrutura urbana bem estruturada, atraindo residentes das classes média e alta, o que o posiciona como um dos principais vetores de expansão urbana no município.

Coleta de dados

As variáveis meteorológicas de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (%) foram monitoradas por meio de termo-higrômetro AKSO, modelo IBUTG - AK887, a 1,5

metros de altura em relação ao solo. A precisão da leitura da temperatura é de $\pm 0,6^{\circ}\text{C}$ para a temperatura do ar e de $\pm 3\%$ para a umidade relativa, com aumento para $\pm 5\%$ fora desses limites. Essas especificações asseguram a sensibilidade adequada para detectar variações entre locais sem cobertura vegetal e áreas localizadas sob copas arbóreas.

A coleta de dados foi realizada ao longo de 12 meses, de janeiro a dezembro de 2024, abrangendo todas as variações sazonais ao longo do ano, sendo coletado os dados nos horários: 7:30-8h, 9:30-10h, 11:30-12h, 13:30-14h, 15:30-16h, e 17:30-18h, em seis pontos amostrais, tres ruas com cobertura vegetal (VS) localizada sob a copa de árvores e tres ruas sem cobertura vegetal (NVS), totalmente exposta ao sol. Para fins de análise e comparação, os dados coletados em diferentes horários foram agrupados e consolidados através do cálculo de médias para dois períodos específicos. O período da Manhã foi estabelecido pelos horários de 7:30-8h, 9:30-10h e 11:30-12h e o período da Tarde de 13:30-14h, 15:30-16h e 17:30-18h.

O Índice de Calor (IC) é elaborado a partir de medidas subjetivas de quanto calor se sente para dados valores de temperatura e umidade relativa do ar, nas situações em que as temperaturas estão elevadas, estando a pessoa à sombra em condições de vento fraco. A metodologia de Steadman (1979) para o cálculo do índice de IC fornecendo uma medida eficaz do estresse térmico através da seguinte equação:

$$\text{IC} = -42,379 + 2,04901523 * T + 10,14333127 * \text{UR} - 0,22475541 * T * \text{UR} - 6,83783 * 10^{-3} * (T)^2 - 5,481717 * 10^{-2} * (\text{UR})^2 + 1,22874 * 10^{-3} * (T)^2 * \text{UR} + 8,5282 * 10^{-4} * T * (\text{UR})^2 - 1,99 * 10 * (T)^2 * (\text{UR})^2$$

Onde: IC - índice de calor; T - temperatura ($^{\circ}\text{C}$); UR - umidade relativa do ar (%)

Com os resultados obtidos do IC serão indicados os níveis de alerta e as consequências para o ser humano, conforme adaptado por Nóbrega e Lemos (2011) na tabela 1. Esta abordagem permite avaliar melhor o impacto das condições climáticas na saúde humana e no conforto térmico em ambientes urbanos.

Tabela 1. Níveis de alerta e suas consequências à saúde humana do índice de calor (IC)

Nível de alerta	Índice de calor	Síndrome de calor (sintomas)
Perigo extremo	54° C ou mais	Insolação ou ação e risco de Acidente Vascular Cerebral (AVC) iminente.
Perigo	41,1 – 54° C	Câimbras, insolação e provável esgotamento. Possibilidade de dano cerebral (AVC) para exposições prolongadas com atividades físicas.
Cautela extrema	32,1° - 41° C	Possibilidade de câimbras, esgotamento e insolação para exposições prolongadas e atividade física.

Cautela	27,1 – 32° C	Possível fadiga em casos de exposição prolongada e atividade física.
Não há alerta	Menor que 27° C	Não há problemas.

Fonte: Nóbrega e Lemos (2011)

Percepção da população sobre o conforto térmico e a arborização urbana

Para avaliar o ponto de vista da população sobre o nível de conforto térmico proporcionado pela presença da arborização nos bairros, paralelamente à coleta de dados meteorológicos, no total foram aplicadas 600 entrevistas aos moradores (200 em cada bairro estudado) com auxílio de questionário pré-estruturado com perguntas abertas e fechadas. Alreck e Settle (1995) determinam que, em entrevistas que utiliza-se de instrumentos tipo survey, 100 respondentes são suficientes para compor uma amostra de uma grande população, e define ainda que 300 entrevistas, independente do tamanho da população, apresenta testes estatísticos satisfatórios.

O questionário abordou aspectos sociodemográficos e perceptivos, permitindo a análise da relação entre arborização urbana, sensação térmica e possíveis desigualdades socioambientais e econômicas. O questionário foi dividido em duas seções: I) voltada à caracterização socioeconômica dos respondentes, incluindo variáveis como idade, gênero e nível de escolaridade; II) de caráter etnobotânico, abordou a percepção dos moradores sobre os efeitos da arborização no microclima urbano e na qualidade de vida. As perguntas investigam como os indivíduos percebem o impacto das árvores na temperatura, se atribuem melhorias ao conforto térmico e à saúde em função da presença de árvores, e se consideram que a arborização está associada ao nível socioeconômico do bairro.

Embora as entrevistas tenham sido feitas de forma independente do monitoramento meteorológico, esta é etapa uma complementar essencial da pesquisa, pois possibilita captar as percepções subjetivas dos moradores sobre o conforto térmico em seu ambiente cotidiano — aspectos que não são mensuráveis por instrumentos físicos. As entrevistas foram realizadas de forma aleatória em diferentes pontos dos bairros estudados, abrangendo tanto áreas com cobertura arbórea quanto locais com alta exposição à radiação solar. Essa estratégia buscou incorporar a diversidade de experiências térmicas proporcionadas pelas distintas condições microclimáticas urbanas, permitindo analisar como fatores como sombreamento, ventilação e presença de vegetação influenciam diretamente a percepção térmica da população.

Conforme exigido pelas diretrizes da Resolução CNS 466/12 do Conselho Nacional de Saúde, essa pesquisa foi submetida à Plataforma Brasil, recebendo o CAAE 78113124.0.0000.5055 como identificação. Essa etapa é fundamental para assegurar a avaliação ética por parte de um Comitê de Ética em Pesquisa, garantindo assim a proteção dos direitos e do bem-estar dos participantes.

Análises estatísticas

Inicialmente, foi realizada uma análise descritiva para caracterizar o comportamento geral das variáveis climáticas. Nessa fase, os dados foram comparados tanto em escala sazonal quanto diária para identificar os padrões básicos do microclima local. Em seguida, para investigar a influência de fatores específicos, foi empregada uma Análise de Variância (ANOVA) de dois fatores. Este teste foi utilizado para avaliar os efeitos da cobertura vegetal em ruas com cobertura vegetal (VS) e ruas sem cobertura vegetal (NVS) e do bairro sobre as variáveis de temperatura e umidade. O plano de análise também incluiu o uso do teste post-hoc de Tukey HSD, um procedimento para detalhar as diferenças entre grupos específicos caso a ANOVA principal as detectasse. Por fim, para isolar e entender a relação específica entre a vegetação e a umidade, foi conduzida uma Análise de Covariância (ANCOVA). O objetivo deste modelo era avaliar o efeito da cobertura vegetal sobre a umidade, ao mesmo tempo em que se controlava estatisticamente a influência da temperatura, que foi tratada como uma covariável. Essa abordagem permitiu testar se a vegetação teria um efeito direto na umidade, independente das variações de temperatura que ela provoca.

Resultados e discussão

Análise do efeito microclimático da arborização urbana

A análise dos dados microclimáticos revelou padrões sazonais bem definidos com uma divisão clara entre um período quente/seco (setembro a dezembro) e um período ameno/úmido (maio a julho). As temperaturas mais altas ocorreram entre setembro e dezembro, com um pico de 39.5°C registrado em novembro no bairro Lagoa Seca à tarde. O Índice de Calor (IC) mais alto também foi identificado nesse período, atingindo 40°C, reforçando a intensa carga térmica nessas condições. Esse período quente foi o mais seco, com a umidade relativa caindo para um mínimo de 29.5% no bairro Franciscanos. Por outro lado, os meses de maio a julho apresentaram temperaturas mais

amenas (mínimo de 25.8°C) e maior umidade relativa (máximo de 84.6%), ambos no bairro Franciscanos, demonstrando uma forte correlação negativa entre temperatura e umidade ao longo do ano (Figura 2).

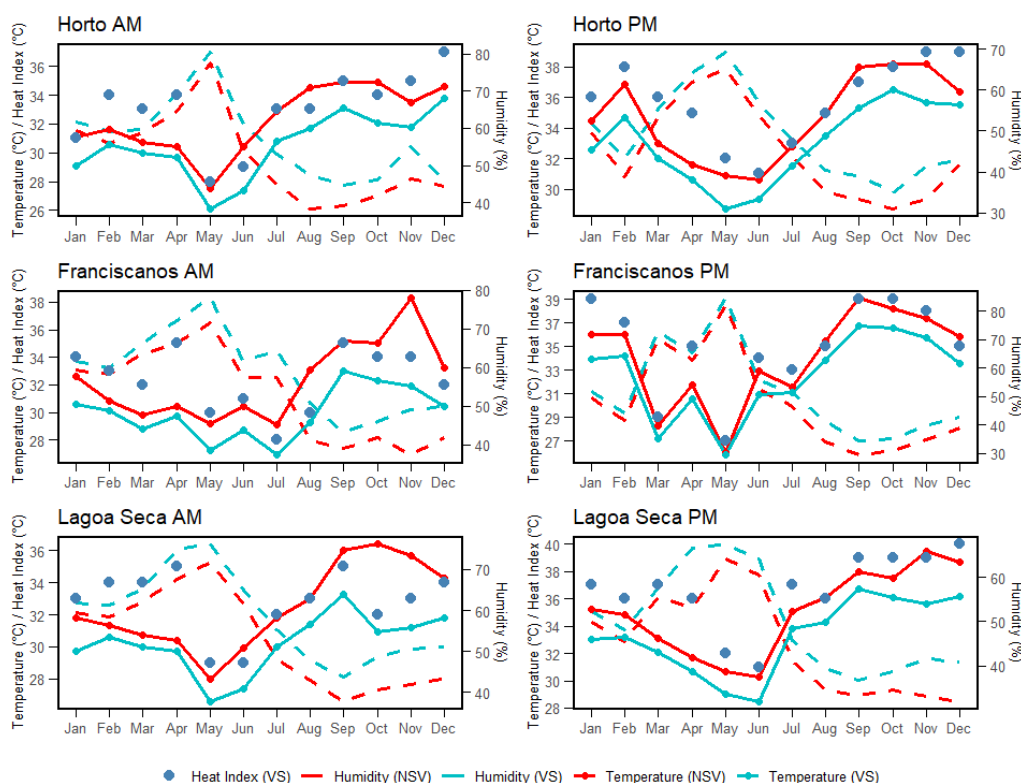


Figura 2. Variação de temperatura, umidade e valores do índice de calor ao longo dos meses de estudo.

A comparação entre os períodos da manhã e da tarde revelou uma variação diurna significativa e esperada para ambas as variáveis em NSV. A temperatura no período da tarde (Média = 34.6°C) foi significativamente mais alta que na manhã (32.3°C), com $t(65.9) = -3.27$, $p = 0.0017$, refletindo o acúmulo progressivo de calor ao longo do dia. A forte radiação solar, combinada com a falta de sombra, faz com que materiais como concreto e asfalto absorvam muita energia térmica, elevando a temperatura das superfícies e do ar, intensificando as ilhas de calor urbanas, especialmente nas horas de maior insolação (Vo & Hu, 2021; Sharmin et al., 2023). Além da alta absorção de calor, esses materiais possuem baixa capacidade de refletância e lento resfriamento, prolongando o desconforto térmico até o início da noite (Acharya et al., 2021; Ziaemehr et al., 2023). Sendo assim, a ausência de cobertura arbórea não apenas agrava o microclima urbano, mas também evidencia a vulnerabilidade térmica, particularmente durante o período vespertino. A umidade relativa, por sua vez, foi significativamente maior no período da manhã (52.7%) em comparação com a tarde (45.9%), com $t(68.8) = 2.34$, $p = 0.023$. Além disso, não foram observados efeitos significativos entre os bairros,

indicando que o efeito de resfriamento promovido pela vegetação foi consistente entre as diferentes localidades.

A maioria dos registros de IC se enquadra nas categorias de "Cautela" e "Cautela Extrema". Apenas uma medição, no Franciscanos durante a tarde no mês de maio, com IC de 27°C, foi classificada como "Não há alerta". Nenhum dos valores atingiu os níveis de "Perigo" ou "Perigo Extremo". Os resultados indicam que, mesmo em áreas com vegetação, os períodos da tarde consistentemente apresentam índices de calor que exigem "Cautela Extrema", com risco de câibras, esgotamento e insolação em casos de exposição prolongada e atividade física. Durante a manhã, a situação é mais variável, alternando entre "Cautela" e "Cautela Extrema".

A partir desses dados, torna-se evidente o papel fundamental das árvores no enfrentamento do desconforto térmico em ambientes urbanos. A sensação térmica real experimentada por pedestres é fortemente influenciada pela radiação solar direta e refletida, sendo significativamente agravada em NVS. Nesse contexto, as árvores desempenham uma função essencial ao fornecerem sombra, bloquearem a radiação solar de ondas curtas e contribuírem para a redução da temperatura do ar e das superfícies ao redor. Estudos recentes reforçam essa dinâmica, Zhao et al. (2025) demonstraram que áreas com cobertura vegetal tendem a apresentar temperaturas mais amenas, enquanto zonas urbanizadas e industriais registram valores mais elevados, em função direta do uso e ocupação do solo. A capacidade das árvores de modificar o microclima imediato em torno do corpo humano as torna elementos estratégicos no enfrentamento das ilhas de calor urbanas. Essa importância se intensifica diante do agravamento do desconforto térmico observado em diferentes regiões do mundo. Em Hong Kong, por exemplo, Jia et al. (2025) relataram que mais da metade da cidade enfrenta episódios recorrentes de calor extremo, submetendo a população a níveis elevados de estresse térmico.

Os serviços ecossistêmicos proporcionados pelas árvores em ruas urbanas ainda são menos estudados em comparação aos oferecidos por parques e grandes áreas verdes, no entanto, os resultados desta pesquisa evidenciam de forma inequívoca o efeito da arborização viária na mitigação do calor urbano. Observou-se uma redução média da temperatura do ar entre 1,53 °C e 2,35 °C nas VS em comparação às NVS, demonstrando o papel crucial das árvores no enfrentamento das ilhas de calor urbanas. Estudos anteriores corroboram esses achados, Ren et al. (2022) verificaram que ruas com alta cobertura arbórea apresentaram temperaturas do ar aproximadamente 5,4 °C mais baixas, enquanto aquelas com cobertura moderada foram cerca de 2,3 °C mais frescas em relação

às ruas com baixa cobertura vegetal. De forma semelhante, Ananyeva e Emanuel (2023), ao analisarem vias urbanas em Glasgow, Escócia, constataram que a presença de vegetação reduziu a temperatura superficial em 75% das ruas avaliadas. Lachapelle et al. (2023) também destacam que a arborização urbana proporciona significativa diminuição da temperatura do ar e aumento do conforto térmico, com reduções de até 10–12 °C em calçadas com 50% de cobertura arbórea, chegando a 20 °C em vias totalmente arborizadas.

Neste estudo, a influência da cobertura vegetal e da localização sobre as variáveis microclimáticas foi avaliada por meio de uma ANOVA de dois fatores (Figura 3), que indicou um impacto significativo da vegetação. Para a temperatura do ar, observou-se um efeito principal estatisticamente significativo da cobertura vegetal ($F(1,426) = 29,95$, $p < 0,001$), com as VS apresentando temperaturas consistentemente inferiores em comparação às NSV. O teste post-hoc de Tukey confirmou que essa diferença foi significativa nos três bairros analisados: Franciscanos ($p = 0,015$), Horto ($p = 0,049$) e Lagoa Seca ($p = 0,010$). De forma semelhante, para a umidade relativa, a ANOVA também identificou um efeito significativo da cobertura vegetal ($F(1,426) = 14,03$, $p < 0,001$), com aumento médio entre 3,82% e 5,65% nas áreas arborizadas. Contudo, o teste de Tukey não detectou significância estatística dentro de cada bairro individualmente ($p > 0,05$), sugerindo que o efeito, embora presente, não foi suficientemente.

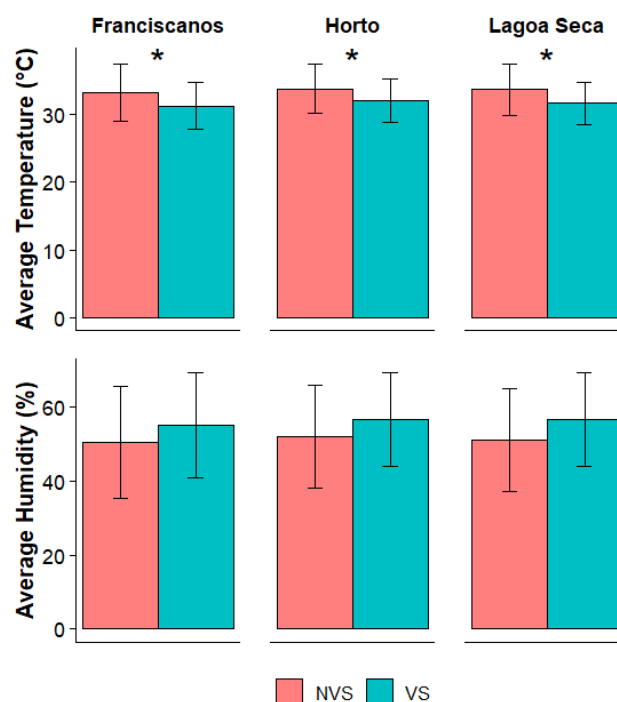


Figura 3. Comparação da temperatura média do ar (°C) e umidade relativa (%) entre ruas não vegetadas (NVS) e vegetadas (VS) nos bairros Franciscanos, Horto e Lagoa Seca. As barras representam a média e as barras de erro indicam o desvio padrão (DP) dos dados coletados. O asterisco (*) denota uma diferença estatisticamente significativa ($p < 0,05$) entre as condições NVS e VS dentro de cada local, determinada pelo teste post-hoc de Tukey após uma ANOVA de dois fatores.

Os resultados da análise ANCOVA foram notavelmente consistentes entre as três localidades, primeiramente, a análise confirmou o papel preponderante da temperatura como um covariado altamente significativo na predição da umidade relativa ($p < 0,001$), estabelecendo-a como a principal força motriz da variação da umidade no microclima local (Tabela 2).

Tabela 2. ANCOVA para a relação entre temperatura e umidade dentro de cada ponto amostral. Indicando a variação entre as áreas com cobertura vegetal (VS) e sem cobertura vegetal (NVS). Df – Degrees of freedom; SSq – Sum of squares; MSq – Mean of squares; F – Statistics; P – Significance.

Horto	Df	SSq	MSq	F	P
Temperatura	1	18.029	18.029	543	<0.01
Cobertura	1	52.0	52.0	1.57	0.213
Temperatura:Cobertura	1	20.4	20.4	0.616	0.434
Residuals	140	4.645	33.2		
Franciscanos	Df	SSq	MSq	F	P
Temperatura	1	24.240	24.240	498	<0.01
Cobertura	1	100	100	2.06	0.153
Temperatura:Cobertura	1	99.0	99.0	2.03	0.156
Residuals	140	6.821	48.7		
Lagoa Seca	Df	SSq	MSq	F	P

Temperatura	1	18.743	18.743	486	<0.01
Cobertura	1	43.1	43.1	1.12	0.292
Temperatura:Cobertura	1	28.0	28.0	0.726	0.396
Residuals	140	5.402	38.6		

O efeito principal da cobertura vegetal sobre a umidade não se mostrou estatisticamente significativo em nenhum dos locais: Horto ($p=0,213$), Franciscanos ($p=0,153$) e Lagoa Seca ($p=0,292$) (Figura 4). Embora áreas arborizadas sejam reconhecidas por aumentar a umidade relativa do ar por meio da evapotranspiração (Martelli et al., 2020), os resultados obtidos com a ANCOVA indicam que, neste estudo, esse aumento está mais fortemente associado à redução da temperatura promovida pela cobertura vegetal do que a um efeito direto da evapotranspiração. Isso sugere que a vegetação influencia a umidade de forma predominantemente indireta, por meio do resfriamento do microclima, enquanto a contribuição estatisticamente independente da evapotranspiração, embora presente, mostrou-se menos expressiva.

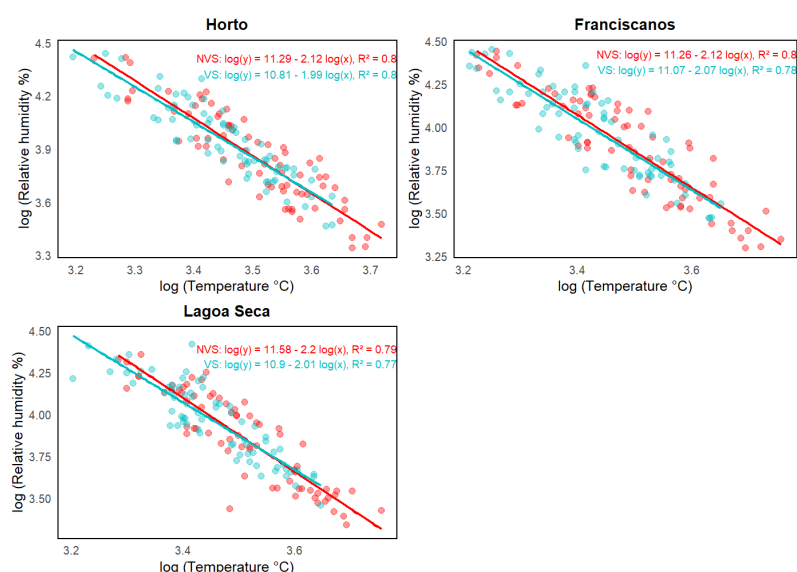


Figura 4. Gráfico de dispersão mostrando a relação entre temperatura e umidade, comparando ruas vegetadas (VS) e ruas não vegetadas (NVS) em cada ponto de amostragem.

Análise comparativa da percepção e caracterização socioeconômica relacionada à arborização urbana

A distribuição da faixa etária apresentou variações entre os bairros, no Horto, entrevistados de 36 a 45 anos e 46 a 59 anos representaram as maiores proporções, com 26.5% e 31.5% respectivamente. Franciscanos mostrou uma distribuição mais concentrada nas faixas de 26 a 35 anos (17.5%) e 46 a 59 anos (25.5%), enquanto Lagoa Seca se destacou pela alta proporção de jovens de 18 a 25 anos e 26 a 35 anos, que

representaram 21% e 37.5%, respectivamente. Quanto ao gênero, o bairro Horto exibiu uma distribuição de 55.5% de homens e 44.5% de mulheres. No Franciscanos, a maioria dos respondentes foi do sexo feminino (54.5%), enquanto em Lagoa Seca, os homens representaram 59.5% dos entrevistados. Um estudo realizado por Navarrete-Hernandez et al. (2024) investigou a relação entre o nível de arborização das ruas e a felicidade percebida, demonstrando que ruas arborizadas aumentam significativamente a felicidade, com efeitos que variam conforme gênero e faixa etária. Para mulheres, a felicidade cresce de forma mais intensa enquanto para homens o aumento é mais linear. Quanto à idade, participantes até 50 anos apresentam um padrão semelhante enquanto pessoas acima de 50 anos também mostram aumento significativo.

Em relação à escolaridade, o Horto apresentou a maior proporção de entrevistados com Ensino Fundamental (43%), seguido por Ensino Médio (36%), Franciscanos mostrou uma distribuição mais equilibrada entre Ensino Fundamental (23.5%) e Ensino Médio (41%), mas com uma proporção considerável de Graduação (19.5%) e a Lagoa Seca teve a menor proporção de Ensino Fundamental (13%) e a maior de Ensino Médio (48.5%) e Pós-graduação (8.5%), sugerindo um nível educacional geral mais elevado.

A percepção sobre como as árvores afetam a temperatura durante o verão foi positiva em todos os bairros. A opção "Reduzem significativamente a temperatura, criando um ambiente mais fresco" foi a mais relatada, com 72.5% em Horto, 64% em Franciscanos e 61% em Lagoa Seca. "Proporcionam sombra, mas sem alterar a temperatura" também obteve proporções relevantes: 23% em Horto, 31.5% em Franciscanos e 35% em Lagoa Seca. A percepção de que árvores "Aumentam a temperatura ao bloquear o vento" foi nula (0%) em todos os bairros, indicando um consenso dos entrevistados sobre os efeitos benéficos da arborização.

Ao perguntar se a presença de árvores influencia o conforto térmico no bairro revelou um alto grau de concordância entre os entrevistados com Horto, Franciscanos e Lagoa Seca, respectivamente, 90.5%, 84.5% e 91.5% afirmando que sim. As respostas de "Não" e "Não tenho certeza" foram baixas em todos os bairros. Em relação à sensação térmica na rua em dias quentes, uma maioria significativa em Horto (62%) a classificou como "Fresco devido à presença de árvores". Em Franciscanos e Lagoa Seca, embora esta opção fosse relevante (31.5% e 26% respectivamente), a percepção de "quente, mas suportável" foi mais elevada (43% em Franciscanos e 35% em Lagoa Seca), indicando que, apesar das árvores, uma parcela considerável da população nesses bairros ainda sofre com o calor intenso.

Na pergunta de múltipla escolha sobre serviços ecossistêmicos que as árvores tem sobre o conforto térmico, a resposta mais frequente em todos os bairros foi "Proporcionam sombra", selecionada por 100% dos entrevistados. "Reduzem a temperatura do ambiente" também foi bastante comentada, com 98,5% em Horto, 98% em Franciscanos e 95,5% em Lagoa Seca. "Melhoram a qualidade do ar" foi amplamente reconhecido em Horto (87,5%), Franciscanos (81%) e Lagoa Seca (82,5%). "Oferecem um espaço agradável" foi citada por 79,5% em Horto, 83,5% em Franciscanos e apenas 48% em Lagoa Seca. "Protegem contra ventos fortes" foi percebida por 43% em Horto, 54% em Franciscanos e 84% em Lagoa Seca, sendo este um benefício menos consensual, mas ainda relevante. De forma semelhante, Rodgman et al. (2024) analisaram as percepções sobre os serviços e desserviços ecossistêmicos em bairros em processo de gentrificação e mostram que os moradores são capazes de identificar de forma mais clara tanto os benefícios quanto os impactos negativos associados às intervenções ambientais. Os entrevistados relataram não apenas serviços ecossistêmicos, como melhoria do microclima e embelezamento urbano, mas também desserviços. A proximidade e a vivência cotidiana com os espaços verdes capacitam os moradores a desenvolverem uma percepção mais crítica e refinada sobre os impactos da arborização urbana, indo além dos benefícios diretos e reconhecendo também limitações e desigualdades na distribuição desses serviços ambientais. Essa valorização dos serviços ecossistêmicos relacionados ao conforto térmico se reflete também na percepção do bem-estar. A grande maioria dos entrevistados relatou perceber melhorias na saúde ou no bem-estar associadas à presença de árvores em seus bairros, 96,5% no Horto, 92,5% nos Franciscanos e 91,5% em Lagoa Seca.

Sobre a relação entre arborização e classe socioeconômica, 54% dos respondentes em Franciscanos e 56,5% em Lagoa Seca acreditam em uma relação significativa, contraste, no Horto apenas 28% acreditam nessa relação e 41% não têm opinião formada, indicando uma percepção diversa sobre a igualdade na distribuição da arborização. A maioria dos respondentes em Horto (46,5%) e Franciscanos (53%) acredita que a arborização em seus bairros foi planejada. Em Lagoa Seca, contudo, a proporção de quem acredita em planejamento é menor (22%), com 52% indicando que a arborização parece ter sido espontânea. Quanto às sugestões para aprimorar a arborização, "Aumento da quantidade de árvores" foi a principal resposta nos três bairros, 64% no Horto, 36,5% Franciscanos e 39% Lagoa Seca. "Planejamento e Gestão Estratégica" foi citada por 11% em Horto, 21,5% em Franciscanos e 26,5% em Lagoa Seca, mostrando uma demanda por estratégias de arborização urbana para esses bairros. A resposta "Sem Sugestão ou

Neutra", com 16%, 9,5% e 20,5% em Horto, Franciscanos e Lagoa Seca respectivamente, indicam uma menor proatividade ou satisfação atual. Shah et al. (2021) destacam que a classificação socioeconômica é um fator determinante nas percepções públicas sobre os espaços verdes urbanos. O estudo aponta que pessoas de diferentes níveis socioeconômicos têm prioridades e experiências distintas em relação a esses espaços: indivíduos de classes mais altas geralmente apresentam maior conhecimento sobre os benefícios ambientais indiretos e estão mais dispostos a investir na manutenção e conservação das áreas verdes. Já comunidades de baixa renda tendem a valorizar principalmente os aspectos recreativos e sociais dos espaços verdes, considerando-os essenciais para o lazer e o convívio comunitário.

Ao consolidar os dados dos três bairros (600 respostas), observou-se uma distribuição heterogênea do nível de satisfação com a arborização viária. As categorias de satisfação mais elevadas (8, 9 e 10) reuniram a maior parte das respostas combinadas. A pontuação 8 foi a mais frequente, com 131 respondentes, seguida pela 7 (103 respondentes) e 10 (70 respondentes). As categorias de menor satisfação (1, 2, 3 e 4) apresentaram um número significativamente menor de respostas (28, 14, 10 e 27, respectivamente). A pontuação 5 foi atribuída por 84 respondentes (Figura 5).

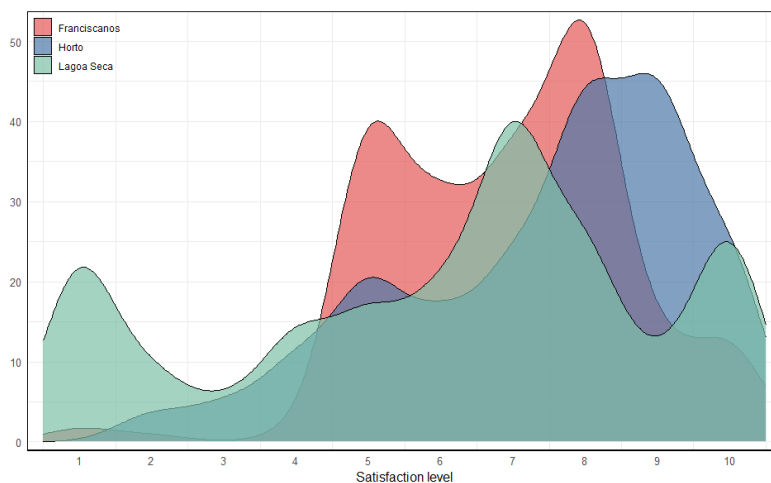


Figura 5. Distribuição da Densidade do Nível de Satisfação com a Arborização Urbana por Bairro em Juazeiro do Norte, Ceará.

A análise combinada sugere que, embora haja uma parcela da população com níveis de insatisfação, a maioria dos respondentes expressa satisfação de moderada a alta com a arborização viária, refletindo um reconhecimento geral de sua importância para a qualidade de vida. As sugestões dos entrevistados para aumento da quantidade de árvores e para um melhor planejamento e gestão estratégica da arborização fornecem indícios

relevantes para futuras intervenções. Nesse sentido, estratégias de educação ambiental podem desempenhar papel crucial para aprimorar a percepção pública, utilizando comparativos visuais, resultados de medições microclimáticas locais e projetos participativos de plantio que evidenciem os ganhos em conforto térmico e qualidade de vida. Ao alinhar essas ações com políticas públicas de planejamento e gestão, é possível fortalecer o engajamento comunitário e consolidar a arborização urbana como estratégia eficaz de mitigação do calor nas cidades do semiárido.

Conclusão

Este trabalho contribui para a crescente literatura voltada a arborização ambientes urbanos, comprovando que a arborização se mostrou com uma estratégia essencial e eficaz na mitigação do calor. O estudo demonstrou que áreas com vegetação apresentam temperaturas mais baixas, com uma redução média notável de 1.53°C a 2.35°C. Embora a umidade relativa também se eleve em locais arborizados, neste estudo a análise confirmou que esse efeito é uma consequência indireta da redução da temperatura. Isso ressalta que o principal benefício microclimático da arborização é a sua capacidade de resfriamento, um efeito encontrado em todos os bairros estudados e crucial para enfrentar as condições de "Cautela Extrema" do Índice de Calor na cidade.

Os entrevistados demonstraram um alto grau de consciência e valorização dos benefícios da arborização, reconhecendo seu papel na redução da temperatura, na provisão de sombra e na melhoria do conforto térmico e do bem-estar geral. No entanto, o estudo também expôs diferenças significativas na percepção e nas características demográficas entre os bairros, como a visão sobre a relação entre arborização e classe socioeconômica e no planejamento da infraestrutura verde. Essas diferenças são fundamentais e indicam que, apesar de uma satisfação geral de moderada a alta com a arborização existente, há um desejo por mais árvores e por uma gestão mais estratégica e equitativa.

Diante disto, podemos concluir que a arborização urbana é um investimento estratégico, mas que exige uma abordagem mais cautelosa, a demanda da população por "aumento da quantidade de árvores" e por "planejamento e gestão estratégica" é um claro indicativo do caminho a seguir. Ao reforçar sobre os diversos benefícios das árvores, Juazeiro do Norte pode não apenas fortalecer sua resiliência climática, mas também aprimorar significativamente a qualidade de vida e o bem-estar dos cidadãos, tornando-se um modelo de desenvolvimento urbano sustentável.

Referências

- Acharya, T., Riehl, B., & Fuchs, A. (2021). Effects of albedo and thermal inertia on pavement surface temperatures with convective boundary conditions—A CFD study. *Processes*, 9(11), 2078. <https://doi.org/10.3390/pr9112078>
- Alreck, P., & Settle, R. B. (1995). *The survey research handbook: Guidelines and strategies for conducting a survey* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Ananyeva, O., & Emmanuel, R. (2023). Street trees and Urban Heat Island in Glasgow: Mitigation through the ‘Avenues Programme’. *Urban Forestry & Urban Greening*, 86, 128041. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128041>
- Anderson, C. C., Uhr, J. S., & Schmidt, S. (2024). Visitor motivations and design feature use for thermal comfort on hot days in Bochum City Park, Germany. *Urban Forestry & Urban Greening*, 102, 128564. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128564>
- Barghchi, M., Grace, B., Edwards, N., Bolleter, J., & Hooper, P. (2024). Park thermal comfort and cooling mechanisms in present and future climate scenarios. *Urban Forestry & Urban Greening*, 101, 128533. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128533>
- Benício, R. M. A., Linhares, K. V., Lisboa, M. A. N., Cruz, G. V., Silva, L. V. A., Nascimento, A. S., Silva, M. A. P., Rocha, L. S. G., Drumond, M. A., Tonucci, R. G., & Calixto Júnior, J. T. (2023). Carbon stock and sequestration as a form of payment for environmental services in a sedimentary basin humid forest refuge in Brazilian semiarid. *Environmental Development*, 45, 100796. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2022.100796>
- Cheela, V. R. S., John, M., Biswas, W., & Sarker, P. (2021). Combating Urban Heat Island effect—A review of reflective pavements and tree shading strategies. *Buildings*, 11(3), 93. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- Climate-Data.org. (2024). Clima: Juazeiro do Norte. <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/ceara/juazeiro-do-norte-4447/>
- Davtalab, J., & Heidari, A. (2021). The effect of kharkhona on outdoor thermal comfort in hot and dry climate: A case study of Sistan Region in Iran. *Sustainable Cities and Society*, 65, 102607. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102607>
- Eisenman, T. S., Flanders, T., Harper, R. W., Hauer, R. J., & Lieberknecht, K. (2021). Traits of a bloom: A nationwide survey of U.S. urban tree planting initiatives (TPIs). *Urban Forestry & Urban Greening*, 61, 127006. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127006>
- Heaviside, C., Macintyre, H., & Vardoulakis, S. (2017). The urban heat island: Implications for health in a changing environment. *Current Environmental Health Reports*, 4(3), 296–305. <https://doi.org/10.1007/s40572-017-0150-3>
- Huang, J., Huang, Z., & Liu, W. (2025). Combining the WRF model and LCZ scheme to assess spatiotemporal variations of thermal comfort in Shenzhen's built-up areas. *Sustainable Cities and Society*, 122, 106252. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106252>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2024). *Juazeiro do Norte – CE: Panorama*.
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. (2022). *Perfil Municipal: Juazeiro do Norte – CE*. Fortaleza: IPECE.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). (2024). *Gráficos climatológicos – Juazeiro do Norte (Estação: 82686)*. <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/CE/82686>
- Jia, S., Wang, Y., Wong, N. H., & Weng, Q. (2025). A hybrid framework for assessing outdoor thermal comfort in large-scale urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 256, 105281. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105281>
- Kang, G., & Kim, J.-J. (2025). How to plant trees on an elevated road to improve thermal comfort in a street canyon. *Sustainable Cities and Society*, 121, 106207. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106207>
- Kim, Y., Shin, Y., & Cho, H. (2021). Influencing factors on thermal comfort and biosignals of occupant: A review. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35, 4201–4224. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0821-6>
- Kumar, P., & Sharma, A. (2020). Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort – A review. *Sustainable Cities and Society*, 61, 102297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297>
- Lachapelle, J. A., Krayenhoff, E. S., Middel, A., Coseo, P., & Warland, J. (2023). Maximizing the pedestrian radiative cooling benefit per street tree. *Landscape and Urban Planning*, 230, 104608. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2022.104608>
- Li, H., Liu, Y., Zhang, H., Xue, B., & Li, W. (2021). Urban morphology in China: Dataset development and spatial pattern characterization. *Sustainable Cities and Society*, 71, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102981>
- Li, J., Zhao, Z., Chen, H., & Fu, Z. (2025). Study on the microclimate and thermal comfort of urban parks under arid climate conditions: A case study of Shihezi City. *Case Studies in Thermal Engineering*, 71, 106196. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.106196>
- Lisboa, M. A. N., Silva, L. V. A. da, Nascimento, A. da S., Silva, A. de O., Teixeira, M. R. A., Ferreira, M. F. R., Ferreira, S. C., Silva, A. C. V. da, Colares, A. V., & Calixto Júnior, J. T. (2024). Diversity, structure, and carbon sequestration potential of the woody flora of urban squares in the Brazilian semiarid region. *Trees, Forests and People*, 16, 100561. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100561>
- Luo, M., Guo, F., Tang, H., Ming, R., Huang, L., & Zhao, H. (2025). A systematic review of the influence of physiological factors on outdoor thermal comfort. *Human Settlements and Sustainability*, 1(1), 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.hssust.2025.02.001>
- Manoli, G., Fatichi, S., Schlöpfer, M., et al. (2019). Magnitude of urban heat islands largely explained by climate and population. *Nature*, 573, 55–60. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1512-9>
- Martelli, A., Oliveira, L. R., & Delbim, L. R. (2020). Influência ambiental de um fragmento arbóreo localizado

numa área urbana na qualidade de vida dos seus moradores. *Indonesian Center for Animal Research and Development*, 8(12). <https://doi.org/10.21270/archi.v8i12.3912>

McNamara, K. A., Kostelny, M., Kim, G., Keating, D. M., Estiandan, J., & Armbruster, J. (2022). A novel resident outreach program improves street tree planting outcomes in Los Angeles. *Environmental Challenges*, 9, 100596. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100596>

Nascimento, A. da S., Silva, L. V. A., Lisboa, M. A. N., Silva, A. de O., Ferreira, M. F. R., Silva, S. C. F. da, Melo, M. J. V. de, Silva, A. C. V. da, & Calixto Júnior, J. T. (2025). How do visitors perceive the urban greenery microclimate in the city's only green space? A case study in Brazilian semi-arid. *Environmental Development*, 101244. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2025.101244>

Navarrete-Hernandez, P., Kiarostami, N., Yang, D., & Ozcair, A. (2024). Green enough? A dose-response curve of the impact of street greenery levels and types on perceived happiness. *Landscape and Urban Planning*, 251, 105130. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2024.105130>

Piracha, A., & Chaudhary, M. T. (2022). Urban air pollution, urban heat island and human health: A review of the literature. *Sustainability*, 14(15), 9234. <https://doi.org/10.3390/su14159234>

Ren, Z., Zhao, H., Fu, Y., Xiao, L., & Dong, Y. (2022). Effects of urban street trees on human thermal comfort and physiological indices: A case study in Changchun city, China. *Journal of Forestry Research*, 33, 911–922. <https://doi.org/10.1007/s11676-021-01393-8>

Rodgman, M. K., Anguelovski, I., Pérez-del-Pulgar, C., Shokry, G., Garcia-Lamarca, M., Connolly, J. J. T., Baró, F., & Triguero-Mas, M. (2024). Perceived urban ecosystem services and disservices in gentrifying neighborhoods: Contrasting views between community members and state informants. *Ecosystem Services*, 65, 101571. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2023.101571>

Rodriguez, A., Wood, S., Carmeliet, J., Kubilay, A., & Derome, D. (2025). Local impact of trees on thermal comfort of pedestrians in streets. *Urban Climate*, 61, 102417. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2025.102417>

Sanusi, R., Johnstone, D., May, P., & Livesley, S. J. (2017). Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, 157, 502–511. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>

Shah, M. A. H., Islam, M. N., Siddhanta, A., Ahmed, K. J., & Ahmed, C. M. T. (2021). Public perceptions of urban green spaces: Convergences and divergences. *Frontiers in Sustainable Cities*, 3. <https://doi.org/10.3389/frsc.2021.755313>

Shahmohamadi, P., Che-Ani, A. I., Ettessam, I., Maulud, K. N. A., & Tawil, N. M. (2011). Healthy environment: The need to mitigate urban heat island effects on human health. *Procedia Engineering*, 20, 61–70. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.139>

Sharmin, M., Tjoelker, M. G., Pfautsch, S., Esperón-Rodríguez, M., Rymer, P. D., & Power, S. A. (2023). Tree traits and microclimatic conditions determine cooling benefits of urban trees. *Atmosphere*, 14(3), 606. <https://doi.org/10.3390/atmos14030606>

Silva, L. V. A., Araújo, I. F., Benício, R. M. A., Morais, S. C. de O., Lisboa, M. A. N., Cruz, G. V., Fabricante, J. R., & Calixto Júnior, J. T. (2020). Plantas exóticas na Chapada do Araripe (Nordeste do Brasil): Ocorrência e usos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 15(3), 1239–1259. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.3.p1239-1259>

Singh, M., Sharston, R., & Murtha, T. (2024). Critical evaluation of the spatiotemporal behavior of UHI, through correlation analyses based on multi-city heterogeneous dataset. *Sustainable Cities and Society*, 98, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105576>

Skelhorn, C., Lindley, S., & Levermore, G. (2014). The impact of vegetation types on air and surface temperatures in a temperate city: A fine scale assessment in Manchester, UK. *Landscape and Urban Planning*, 121, 129–140. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.09.012>

Sousa, E. A. P., Mendonça, A. C. A. M., Garcia, I. R., Lisboa, M. A. N., Kamdem, J. P., Cruz, G. V., Silva, M. A. P., Pimentel, G. F., & Calixto-Junior, J. T. (2021). *Ethnoknowledge of medicinal and mystical plants used by healers in Juazeiro do Norte, Ceará, Northeast Brazil*. *Indian Journal of Traditional Knowledge*, 20, 154–166. <https://doi.org/10.56042/ijtk.v20i1.28563>

Tanoori, G., Soltani, A., & Modiri, A. (2024). Machine learning for Urban Heat Island (UHI) analysis: Predicting land surface temperature (LST) in urban environments. *Urban Climate*, 55, 101962. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101962>

Tavares, C. A. J. da S., & Silva, N. R. da. (2025). Expansão urbana e espaço sagrado: A influência de Padre Cícero na formação do bairro do Horto, Juazeiro do Norte/CE. *Caderno Prudentino de Geografia*, 1(47), 53–73.

Terrani, E., Picción, A., Bentancur, O., & Cruz, G. (2024). Effect of street trees shade on perceived thermal comfort in a south temperate climate: The sidewalks of Montevideo (Uruguay). *Heliyon*, 10(12), e32762. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32762>

U.S. Environmental Protection Agency. (2016). *Climate change and heat islands*. <https://www.epa.gov/heatislands/climate-change-and-heat-islands>

Vicedo-Cabrera, A. M., Scovronick, N., Sera, F., et al. (2021). The burden of heat-related mortality attributable to recent human-induced climate change. *Nature Climate Change*, 11, 492–500. <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01058-x>

Vo, T. T., & Hu, L. (2021). Diurnal evolution of urban tree temperature at a city scale. *Scientific Reports*, 11, 10491. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89972-0>

World Health Organization (WHO). (2022). *Urban planning, design and management approaches to building resilience – an evidence review: first report on protecting environments and health by building urban resilience*. WHO Regional Office for Europe.

Zhao, J., Hu, C., Li, Z., Zhang, M., Fan, H., Li, K., & Yuan, R. (2025). Investigating the quantitative impact of

the vegetation indices on the urban thermal comfort based on machine learning: A case study of the Qinhuai River Basin, China. *Sustainable Cities and Society*, 125, 106357. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106357>

Zhou, B., Rybski, D., & Kropp, J. P. (2017). The role of city size and urban form in the surface urban heat island. *Scientific Reports*, 7, 4791. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04242-2>

Ziaemehr, B., Jandaghians, Z., Ge, H., Lacasse, M., & Moore, T. (2023). Increasing solar reflectivity of building envelope materials to mitigate urban heat islands: State-of-the-art review. *Buildings*, 13(11), 2868. <https://doi.org/10.3390/buildings13112868>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou, de maneira integrada, a importância da arborização urbana como estratégia fundamental para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, especialmente em regiões semiáridas. A análise de dados ecológicos, microclimáticos e perceptivos revelou que a presença de vegetação arbórea nas vias urbanas é capaz de reduzir significativamente a temperatura do ar, aumentar a umidade relativa e promover melhorias no conforto térmico, aspectos cruciais diante do agravamento das ilhas de calor urbano.

Além dos benefícios ambientais, os resultados apontam uma forte valorização pública da arborização, com reconhecimento amplo por parte dos moradores quanto ao sombreamento, bem-estar e qualidade de vida proporcionados pelas árvores. No entanto, as percepções variam conforme fatores sociodemográficos, revelando desigualdades no acesso aos serviços ecossistêmicos em diferentes bairros. Essa desigualdade é reforçada pelos dados sobre diversidade e densidade arbórea, que mostram concentração de espécies exóticas, baixa diversidade funcional em alguns setores da cidade e predominância de bairros com maior poder aquisitivo na distribuição da vegetação urbana.

As espécies nativas mostraram elevado potencial de sequestro de carbono e contribuições significativas à biodiversidade local, o que reforça a necessidade de sua priorização em futuros projetos de arborização. A combinação de abordagens qualitativas e quantitativas permitiu compreender como a vegetação urbana atua não apenas como infraestrutura ecológica, mas também como um indicador de justiça ambiental.

Portanto, este trabalho oferece subsídios relevantes para o planejamento urbano sustentável, indicando que é preciso superar a lógica de plantio estético e avançar rumo a políticas públicas que promovam uma arborização urbana funcional, diversificada e equitativamente distribuída. Ao reconhecer o papel estratégico das árvores no enfrentamento das mudanças climáticas e na promoção do bem-estar urbano, gestores e tomadores de decisão poderão transformar a arborização viária em um pilar de resiliência socioambiental no semiárido brasileiro e em outras regiões de clima semelhante.