

Da quantidade de árvores à qualidade climática da sombra: evidências empíricas do coberto arbóreo urbano em Coimbra (Portugal)

From Tree Quantity to the Climatic Quality of Shade: Empirical Evidence from Coimbra (Portugal)

Marina Filipa Maltez Chaves ^{*1}, José Miguel Lameiras ^{**2} e António M. Rochette Cordeiro ^{***3}

¹Faculdade de Letras, Universidade de Coimbra, 3004-504 Coimbra, Portugal, Centro de Estudos Interdisciplinares (CEIS20), 3000-186 Coimbra, Portugal

²Faculty of Sciences, University of Porto, 4169-007 Porto, Portugal, BIOPOLIS/CIBIO-Research Centre in Biodiversity and Genetic Resources, 4485-661 Vairão, Portugal

³Faculty of Arts and Humanities, University of Coimbra, 3004-504 Coimbra, Portugal, Center for Interdisciplinary Studies (CEIS20), 3000-186 Coimbra, Portugal

Resumo

A eficácia climática do coberto arbóreo urbano depende não apenas da presença de árvores, mas da interação entre a arquitetura da copa, a fenologia das espécies e o contexto urbano em que estas se inserem. Neste contexto, o presente estudo apresenta a primeira sistematização conceptual da distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca”, entendidas como categorias analíticas para interpretar o desempenho térmico diferencial da vegetação urbana. A investigação baseia-se em medições *in situ* da temperatura do ar (2022–2024), com dataloggers instalados sob copas de espécies caducifólias e perenifólias, em espaços verdes e áreas mineralizadas, considerando variabilidade sazonal e estratificação térmica vertical (3 m e 6 m). Os resultados mostram que a eficácia climática do coberto arbóreo resulta da interação entre densidade da copa, fenologia, altura de medição e características das superfícies envolventes. Espécies caducifólias com copas densas, como *Quercus robur*, revelam maior capacidade de arrefecimento no verão, embora a perda de folhagem altere o comportamento térmico no inverno. Em contextos fortemente impermeabilizados, a sombra pode não reduzir significativamente a temperatura do ar, devido à acumulação e reemissão de calor pelos materiais urbanos. A distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca”, operacionalizada através de diferenças térmicas relativas (ΔT), constitui uma ferramenta analítica útil para interpretar a variabilidade térmica intraurbana. A triangulação entre dados empíricos, estrutura da vegetação e contexto urbano reforça a robustez interpretativa dos processos microclimáticos. Estes resultados têm implicações diretas para o planeamento urbano, sublinhando a necessidade de integrar critérios bioclimáticos na seleção de espécies e na organização da infraestrutura verde, superando abordagens baseadas exclusivamente na quantidade de árvores.

Cadernos de
Geografia

doi: https://doi.org/10.14195/0871-1623_53_5

Recebido a:
7 de maio de 2025
Aprovado a:
2 de julho de 2026

*Email: marinachaves978@gmail.com

**Email: jmlameiras@fc.up.pt

***Email: rochettecordeiro@fl.uc.pt

Palavras-chave: Microclima urbano. Ilha de calor urbana. Coberto arbóreo. Sombra quente. Sombra fresca. Vegetação urbana. Diferenciação térmica.

Abstract

The climatic effectiveness of urban tree cover depends not only on the presence of trees but also on the interaction between canopy architecture, species phenology and the surrounding urban context. Against this background, this study presents a conceptual framework distinguishing "Hot Shade" and "Cool Shade" as analytical categories for interpreting the differential thermal performance of urban tree cover. The research is based on *in situ* air temperature measurements (2022–2024), using data loggers installed beneath the canopies of deciduous and evergreen species in green spaces and mineralised areas, accounting for seasonal variability and vertical thermal stratification (3 m and 6 m). The results show that the climatic effectiveness of tree cover stems from the interaction between canopy density, phenology, measurement height and the characteristics of surrounding surfaces. Deciduous species with dense canopies, such as *Quercus robur*, demonstrate greater cooling capacity during summer, although leaf loss modifies their thermal behaviour in winter. In heavily impervious urban environments, shade may not significantly reduce air temperature because of the accumulation and re-emission of heat by urban materials. The distinction between "Hot Shade" and "Cool Shade", operationalised through relative thermal differences (ΔT), provides an analytical framework for interpreting intra-urban thermal variability. The integration of empirical observations, vegetation structure and urban context strengthens the interpretation of microclimatic processes. These findings have direct implications for urban planning by highlighting the need to integrate bioclimatic criteria into species selection and urban green infrastructure planning, shifting the focus from tree quantity to the climatic quality of shade.

Keywords: Urban microclimate. Urban heat island. Tree canopy. Hot shade. Cool shade. Urban vegetation. Thermal differentiation.

1. Introdução

A urbanização constitui um dos processos territoriais mais marcantes da contemporaneidade, envolvendo profundas transformações na ocupação do solo, na organização funcional das cidades e nos equilíbrios ambientais à escala local e regional. A concentração populacional, a expansão do edificado, a crescente impermeabilização do solo e a intensificação da atividade antrópica têm contribuído para alterar significativamente o clima urbano, tornando as cidades em espaços particularmente vulneráveis ao aumento das temperaturas, à degradação da qualidade do ar e ao agravamento do desconforto bioclimático. Neste contexto, a climatologia urbana tem demonstrado que as transformações impostas pela urbanização não se limitam à morfologia da cidade, refletindo-se também na modificação do balanço energético à superfície, na circulação atmosférica local e na disponibilidade de humidade, com consequências muito concretas para o quotidiano urbano (Oke, 1987; Voogt & Oke, 2003).

Entre os fenómenos mais estudados neste domínio destaca-se a Ilha de Calor Urbana (ICU), entendida como a diferença térmica entre as áreas urbanas e os espaços rurais ou periurbanos envolventes. Esta diferença resulta, em larga medida, da subs-

tituição de superfícies naturais por materiais artificiais com elevada capacidade de absorção e armazenamento de calor, como o asfalto, o betão ou a pedra, bem como da diminuição da cobertura vegetal e da redução dos processos evaporativos (Oke, 1982; Rizwan et al., 2008). A retenção de calor durante o dia e a sua libertação progressiva durante a noite favorecem a manutenção de temperaturas elevadas no espaço urbano, sobretudo em situações de estabilidade atmosférica, fraca ventilação e forte densidade construtiva. Para além das implicações climáticas, a ICU constitui também um problema social e territorial, uma vez que os seus efeitos tendem a incidir de forma desigual sobre diferentes grupos populacionais e diferentes áreas da cidade.

A literatura tem vindo a salientar que os efeitos térmicos da urbanização devem ser analisados numa perspetiva multiescalar. Se, por um lado, a ICU exprime uma lógica de contraste térmico urbano-rural, por outro, à escala intraurbana observam-se fortes diferenciações associadas à morfologia urbana, à orientação das ruas, à densidade edificada, ao tipo de materiais, à presença de água e, de forma particularmente importante, à vegetação (Stewart & Oke, 2012). Assim, o estudo do microclima urbano torna-se central para compreender os processos de produção espacial do conforto e do desconforto térmico, permitindo identificar nichos microclimáticos diferenciados e zonas de maior vulnerabilidade ambiental.

Neste quadro, a vegetação urbana, e em especial o coberto arbóreo, assume um papel decisivo. As árvores influenciam o ambiente térmico urbano através de vários mecanismos complementares. Em primeiro lugar, reduzem a incidência direta da radiação solar sobre o solo, os edifícios e os utilizadores do espaço, diminuindo o aquecimento das superfícies e, por consequência, a libertação posterior de calor sensível. Em segundo lugar, promovem evapotranspiração, dissipando parte da energia disponível sob a forma de calor latente. Em terceiro lugar, interferem com a circulação do ar, a humidade relativa e o balanço radiativo local, podendo criar microambientes mais estáveis e confortáveis (Bowler et al., 2010; Gill et al., 2007).

Todavia, o efeito da vegetação não deve ser entendido de forma simplista ou homogénea. Nem todas as árvores têm o mesmo comportamento térmico, nem toda a sombra produz os mesmos efeitos ambientais. A eficácia microclimática do arbóreo depende de fatores como a espécie, a densidade foliar, a arquitetura da copa, o carácter caducifólio ou perenifólio, a disponibilidade hídrica, a relação com o contexto envolvente e a sazonalidade (Rahman et al., 2018). Uma árvore localizada num espaço verde amplo, com solo permeável e elevada humidade, poderá produzir um ambiente termicamente muito distinto daquele gerado por uma árvore implantada num espaço fortemente mineralizado, rodeado por asfalto e edifícios, mesmo quando ambas fornecem sombra aparente (Cordeiro et al., 2023). Esta constatação conduz à necessidade de distinguir qualitativamente diferentes tipos de sombra em função do seu desempenho térmico real.

É neste ponto que o presente artigo pretende introduzir a diferenciação entre “sombra quente” e “sombra fresca”. A primeira refere-se a situações em que a presença de sombra não é acompanhada de um arrefecimento efetivo do ambiente, em virtude da forte influência do calor armazenado nas superfícies urbanas, da menor eficácia da copa ou da baixa capacidade evaporativa do local. A segunda designa

contextos em que a sombra, articulada com evapotranspiração e com condições bio-físicas favoráveis, origina uma efetiva redução da temperatura do ar e das superfícies, contribuindo para a formação de microclimas mais amenos.

A cidade de Coimbra oferece um caso de estudo particularmente pertinente para esta análise. Trata-se de uma cidade de média dimensão, com forte heterogeneidade morfológica, marcada pela coexistência de espaços verdes históricos, áreas densamente urbanizadas, avenidas arborizadas e praças mineralizadas. Esta diversidade espacial permite comparar o comportamento microclimático de espécies arbóreas distintas sob diferentes enquadramentos territoriais, contribuindo para uma leitura mais fina da relação entre estrutura ecológica urbana e conforto térmico.

Assim, o objetivo central deste artigo consiste em analisar a influência de diferentes espécies arbóreas no microclima urbano de Coimbra, procurando compreender de que modo a estrutura da copa, a fenologia e o contexto territorial condicionam a produção de sombra térmica diferenciada. Em termos mais específicos, pretende-se: i) comparar o comportamento térmico de espécies caducifólias e perenifólias; ii) identificar diferenças térmicas entre espaços verdes e espaços urbanos mais mineralizados; iii) analisar a estratificação térmica vertical no interior da copa; e iv) discutir a utilidade da distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” para o planeamento urbano e a climatologia aplicada.

O presente artigo constitui uma primeira aproximação conceptual à diferenciação entre “sombra quente” e “sombra fresca”, entendidas não apenas como descrições qualitativas de ambientes sombreados, mas como categorias analíticas destinadas a interpretar o comportamento térmico diferencial do coberto arbóreo em contexto urbano. Mais do que propor uma nova terminologia, pretende-se demonstrar que a eficácia climática da sombra depende da interação entre a arquitetura da copa, a fenologia das espécies e o contexto morfológico no qual estas se inserem. Nesta perspetiva, Coimbra funciona como um laboratório territorial particularmente adequado para explorar esta problemática, permitindo testar empiricamente uma hipótese conceptual que poderá ser posteriormente aprofundada através de abordagens quantitativas mais abrangentes e de diferentes contextos urbanos mediterrânicos. Assim, este trabalho assume-se como o primeiro passo de um programa de investigação mais amplo dedicado à compreensão do papel funcional da vegetação na regulação do microclima urbano e na construção de estratégias de adaptação climática baseadas na infraestrutura verde.

2. Enquadramento teórico

2.1. Clima urbano, urbanização e produção de contrastes térmicos

O estudo do clima urbano consolidou-se como um domínio central da Geografia Física e da climatologia aplicada, demonstrando que a cidade não constitui apenas um suporte construído das atividades humanas, mas também um sistema atmosférico local com dinâmicas próprias (Oke, 1987). A urbanização altera os fluxos de energia, água e massa, interfere com a rugosidade superficial, modifica a refletância e a capacidade térmica dos materiais e condiciona os movimentos do ar. Em consequência,

os parâmetros meteorológicos observados nas cidades apresentam frequentemente comportamentos distintos dos registados em áreas rurais ou pouco artificializadas.

A ICU constitui uma das expressões mais visíveis deste processo. A sua génese está associada à combinação entre a absorção acrescida de radiação solar pelas superfícies urbanas, a redução da evapotranspiração, o aumento do calor antrópico e o bloqueio radiativo induzido pela geometria urbana (Oke, 1982; Voogt & Oke, 2003). Em tecidos urbanos densos, os chamados canhões urbanos dificultam a perda radiativa noturna, favorecendo a manutenção de temperaturas elevadas durante a noite. Por seu turno, durante o dia, a baixa presença de sombra e a acumulação de calor nas superfícies podem acentuar o stress térmico, sobretudo em períodos de onda de calor.

Contudo, a cidade não deve ser entendida como uma unidade térmica homogênea. Pelo contrário, a estrutura urbana gera contrastes intraurbanos muito expressivos. A temperatura do ar e das superfícies varia significativamente entre praças mineralizadas, parques urbanos, ruas arborizadas, taludes, espaços ribeirinhos e áreas residenciais com diferentes densidades de construção. A compreensão destas variações exige uma abordagem microclimática, sensível às especificidades do lugar e às interações entre fatores morfológicos, biofísicos e atmosféricos (Stewart & Oke, 2012).

2.2. Vegetação urbana e regulação bioclimática

Entre os fatores que mais contribuem para a diferenciação microclimática intraurbana, a vegetação assume um lugar central. A sua importância não decorre apenas do valor paisagístico ou ecológico, mas sobretudo da capacidade de alterar diretamente as trocas de energia e água entre a superfície e a atmosfera. O papel da vegetação na mitigação do calor urbano encontra-se amplamente reconhecido em estudos experimentais, observacionais e de modelação, que mostram reduções térmicas significativas em espaços verdes quando comparados com áreas construídas ou fortemente impermeabilizadas (Bowler et al., 2010; Shashua-Bar et al., 2009).

Os principais mecanismos através dos quais a vegetação interfere com o microclima são o sombreamento e a evapotranspiração. O sombreamento reduz a radiação solar direta incidente sobre o solo e sobre os elementos construídos, limitando o aquecimento das superfícies e diminuindo a quantidade de energia disponível para aquecer o ar envolvente. A evapotranspiração, por sua vez, converte parte da energia recebida em calor latente, contribuindo para o arrefecimento do ar local e para o aumento da humidade relativa (Gill et al., 2007).

A vegetação arbórea destaca-se particularmente por combinar estes dois mecanismos com um terceiro elemento: a criação de um volume tridimensional de mediação climática. A copa das árvores regula a penetração da radiação, cria gradientes verticais de temperatura, filtra o vento e produz nichos microclimáticos específicos no seu interior e na sua vizinhança imediata. É por isso que o estudo do arbóreo urbano não deve limitar-se à presença ou ausência de árvores, mas considerar a forma, densidade e estrutura funcional da copa.

2.3. Espécies arbóreas, fenologia e desempenho térmico

O comportamento térmico das árvores varia significativamente entre espécies. As diferenças de arquitetura da copa, densidade foliar, dimensão das folhas, textura, espessura e fenologia produzem efeitos diferenciados sobre a quantidade de radiação bloqueada, a circulação do ar e a capacidade evapotranspirativa (Rahman et al., 2018; Leuzinger et al., 2010). As espécies caducifólias, por exemplo, tendem a oferecer forte proteção solar no verão, quando a copa se encontra plenamente desenvolvida, mas permitem maior entrada de radiação no inverno, quando perdem a folhagem. Este comportamento pode tornar-se extremamente vantajoso em climas de acentuada sazonalidade (Quadro 1).

As espécies perenifólias, por seu turno, mantêm cobertura ao longo de todo o ano, podendo proporcionar uma proteção radiativa mais estável. No entanto, o seu efeito térmico depende fortemente da densidade da copa, da orientação dos ramos, da espessura do coberto e da permeabilidade ao vento. Assim, uma espécie perenifólia de copa estreita ou pouco densa pode ser menos eficaz no verão do que uma caducifólia de copa ampla e densa.

Quadro 1. Características funcionais das principais espécies analisadas e implicações microclimáticas

Espécie	Tipo foliar	Arquitetura da copa	Densidade foliar (LAI*)	Fenologia	Capacidade de sombreamento	Potencial de evapotranspiração	Permeabilidade ao vento	Desempenho térmico esperado	Tipo de sombra dominante
<i>Quercus robur</i>	Caducifólia	Copa ampla, arredondada, expansiva	Elevada	Perda foliar no inverno	Muito elevada no verão	Elevado (alta área foliar)	Média	Forte redução térmica no verão; aquecimento moderado no inverno	Sombra fresca (verão)
<i>Tilia europaea</i>	Caducifólia	Copa densa, estratificada verticalmente	Elevada a muito elevada	Caducifólia	Elevada	Elevado (transpiração ativa)	Baixa a média	Elevada modulação térmica; forte estratificação vertical	Sombra fresca (verão)
<i>Platanus × hispanica</i>	Caducifólia	Copa ampla, irregular, adaptada a meio urbano	Média a elevada	Caducifólia	Elevada	Moderado a elevado	Média	Boa capacidade de sombreamento, dependente do contexto urbano	Sombra intermédia / fresca
<i>Cupressus sempervirens</i>	Perenifólia	Copa estreita, colunar	Baixa a média	Persistente	Reduzida (sombra descontínua)	Baixo a moderado	Elevada	Baixa eficácia de arrefecimento; limitada modulação térmica	Sombra quente

Para além da espécie, importa considerar o contexto de implantação. Uma mesma árvore não produz necessariamente o mesmo efeito térmico em dois lugares distintos. A natureza do solo, a presença de relvado ou pavimento, a proximidade de edifícios, a refletância dos materiais envolventes, a exposição solar e a ventilação local condicionam o microclima gerado.

2.4. Sombra quente e sombra fresca como proposta analítica

A noção de sombra é frequentemente utilizada no discurso urbanístico e ambiental como sinónimo de conforto térmico. Todavia, do ponto de vista microclimático, esta associação não é automática. A simples presença de sombra não garante necessariamente temperaturas do ar mais baixas nem conforto térmico efetivo. Em espaços fortemente mineralizados, com superfícies aquecidas e baixa disponibilidade hídrica, a sombra pode atenuar a radiação direta, mas manter um ambiente relativamente quente devido à reemissão térmica do solo e dos materiais envolventes.

Com base nesta distinção, propõe-se neste artigo o uso das expressões “sombra quente” e “sombra fresca” como categorias analíticas operatórias. A “sombra quente” corresponde a situações em que a redução da radiação solar direta não se traduz plenamente em arrefecimento do ambiente, devido ao predomínio do calor sensível armazenado e reemitido pelas superfícies urbanas, à menor densidade da copa ou à debilidade dos processos evaporativos. A “sombra fresca”, pelo contrário, corresponde a uma situação em que o efeito de bloqueio radiativo é acompanhado por evapotranspiração eficaz, menor aquecimento superficial e maior moderação térmica do ar.

Esta proposta não pretende substituir indicadores biometeorológicos clássicos, como PET ou UTCI, mas antes oferecer uma chave de leitura simples e geograficamente útil para interpretar contrastes térmicos observados sob diferentes árvores.

2.5. Implicações para o planeamento urbano

A crescente frequência de episódios de calor extremo tem tornado evidente que o desenho urbano não pode ignorar a dimensão climática. Neste sentido, a integração estratégica da vegetação arbórea constitui uma medida de adaptação com elevada relevância territorial, mas a sua eficácia depende da qualidade da implantação e da adequação das espécies selecionadas (Quadro 2).

Quadro 2. Implicações do coberto arbóreo no planeamento urbano bioclimático

Dimensão de planeamento	Variável considerada	Estratégia recomendada	Fundamentação microclimática	Impacto térmico esperado
Seleção de espécies	Tipo foliar (caducifólia vs. perenifólia)	Privilegiar espécies caducifólias em zonas de uso intensivo	Permite sombreamento no verão e radiação no inverno	Redução do stress térmico estival e otimização sazonal
	Densidade da copa (LAI)	Selecionar espécies com elevada área foliar	Maior bloqueio da radiação solar e maior evapotranspiração	Diminuição da temperatura do ar e das superfícies
	Arquitetura da copa	Favorecer copas amplas e contínuas	Aumenta área de sombra efetiva ao nível pedonal	Criação de “sombra fresca”
	Taxa de evapotranspiração	Integrar espécies com elevada atividade fisiológica	Dissipação de energia sob forma de calor latente	Arrefecimento do microclima

Continua na página seguinte

Quadro 2 – continuação

Dimensão de planeamento	Variável considerada	Estratégia recomendada	Fundamentação microclimática	Impacto térmico esperado
Implantação espacial	Tipo de superfície envolvente	Integrar árvores em solos permeáveis ou semipermeáveis	Aumenta disponibilidade hídrica e evapotranspiração	Potencia efeito de arrefecimento
	Contexto urbano	Evitar arborização isolada em espaços altamente mineralizados	Reduz efeito de reemissão térmica das superfícies	Minimiza ocorrência de “sombra quente”
	Densidade arbórea	Promover continuidade do coberto arbóreo	Reduz fragmentação térmica e aumenta efeito cumulativo	Arrefecimento mais homogéneo
	Relação com edifícios	Posicionar árvores para sombreamento de fachadas e pavimentos	Reduz ganhos térmicos por radiação	Diminuição da carga térmica urbana
Desenho urbano	Largura das ruas	Ajustar arborização à geometria urbana	Maximiza sombreamento em canhões urbanos	Redução da temperatura do ar e das superfícies
	Orientação das ruas	Priorizar arborização em eixos com maior exposição solar	Aumenta eficácia do sombreamento	Mitigação do aquecimento diurno
	Espaços públicos	Integrar árvores em zonas de permanência (praças, parques)	Melhora conforto térmico ao nível pedonal	Aumento da habitabilidade urbana
Gestão e manutenção	Disponibilidade hídrica	Garantir irrigação adequada em períodos secos	Sustenta evapotranspiração	Mantém eficácia térmica
	Estado fitossanitário	Assegurar manutenção da copa	Evita perda de densidade foliar	Preserva capacidade de sombreamento
	Planeamento a longo prazo	Considerar crescimento da árvore	Ajusta desempenho futuro	Sustentabilidade da infraestrutura verde

A climatologia urbana aplicada ao ordenamento do território tem vindo a defender abordagens mais finas, baseadas no conhecimento empírico do desempenho térmico das espécies e dos contextos espaciais. O presente estudo inscreve-se nesta linha.

2.6. Da quantidade de árvores ao desempenho climático do coberto arbóreo

A literatura internacional tem demonstrado de forma consistente que a presença de vegetação urbana constitui um fator determinante na mitigação das ilhas de calor urbanas. Contudo, a maioria dos estudos continua a privilegiar indicadores quantitativos, como a percentagem de cobertura arbórea, o índice de área foliar ou a dimensão das manchas verdes, assumindo implicitamente que o aumento do coberto vegetal conduz necessariamente a melhores condições microclimáticas. Esta perspetiva, embora fundamental para compreender os processos gerais de arrefecimento urbano, tende a secundarizar a variabilidade funcional existente entre diferentes espécies, diferentes estruturas de copa e diferentes contextos morfológicos.

Neste contexto, torna-se pertinente deslocar parcialmente o foco da investigação da quantidade de vegetação para a qualidade climática da sombra produzida. Esta

mudança de perspectiva permite compreender que duas árvores aparentemente semelhantes podem originar respostas microclimáticas significativamente distintas, em função da interação entre arquitetura da copa, fenologia, disponibilidade hídrica e características térmicas das superfícies envolventes. É precisamente neste enquadramento que se inscreve a proposta conceptual desenvolvida neste artigo.

3. Área de estudo

3.1. Enquadramento geográfico e climático

A cidade de Coimbra localiza-se na região costeira central de Portugal, posicionada numa zona de transição entre a plataforma costeira e os relevos marginais, aproximadamente a 40°12' N e 8°25' W, e inserida no vale do rio Mondego (Figura 1). Do ponto de vista climático, enquadra-se no domínio mediterrânico com influência atlântica (Csa segundo a classificação de Köppen-Geiger), caracterizado por verões quentes e secos e invernos suaves e húmidos (Peel et al., 2007).

A temperatura média anual situa-se entre 15 e 16 °C, sendo frequentes episódios de calor intenso durante o verão, com temperaturas máximas superiores a 35 °C, especialmente em situações de estabilidade atmosférica. Estas condições favorecem o desenvolvimento de contrastes térmicos urbanos e tornam Coimbra um caso relevante para estudos de climatologia urbana (Alcoforado et al., 2008; Ganho, 1998).

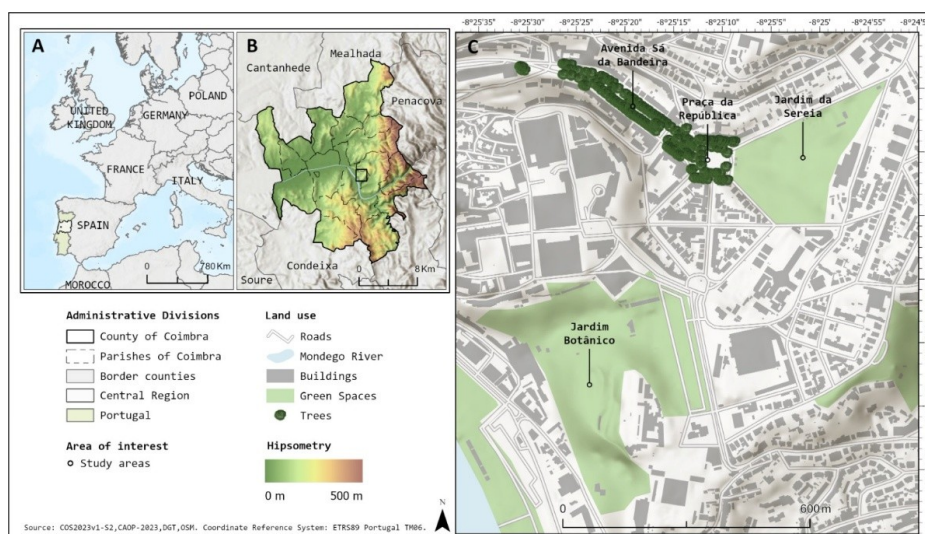


Figura 1. Localização geográfica de Coimbra e enquadramento climático regional.

3.2. Caracterização morfológica e estrutura urbana

A estrutura urbana de Coimbra resulta de um processo histórico de crescimento marcado pela coexistência de diferentes tipologias urbanas, desde o núcleo medieval compacto (Alta e Baixa) até áreas de expansão moderna e espaços verdes estru-

turados (Cordeiro, 2021). Esta diversidade traduz-se numa elevada heterogeneidade morfológica, com implicações diretas no microclima urbano.

As áreas centrais apresentam elevada densidade edificada, ruas estreitas e forte presença de materiais impermeáveis, como o asfalto e o betão, que favorecem a absorção e armazenamento de calor. Este tipo de configuração urbana é frequentemente associado a intensificação do efeito de ilha de calor urbana (Oke, 1987; Stewart & Oke, 2012).

Em contraste, os espaços verdes urbanos, como referem Gill et al. (2007) e Bowler et al. (2010), apresentam maior permeabilidade do solo, presença de vegetação arbórea e condições favoráveis à evapotranspiração, funcionando como áreas de mitigação térmica (Cordeiro et al., 2023).

3.3. Locais de amostragem

Foram selecionados quatro locais representativos da diversidade urbana de Coimbra, permitindo comparar diferentes contextos microclimáticos (Figura 2):

- Jardim da Sereia – espaço verde urbano com elevada densidade arbórea e solos permeáveis, representativo de condições de arrefecimento urbano;
- Jardim Botânico da Universidade de Coimbra – espaço verde estruturado, com elevada diversidade de espécies e presença de árvores de grande porte;
- Praça da República – espaço urbano central, caracterizado por elevada impermeabilização do solo associada a calçada portuguesa e forte exposição solar;
- Avenida Sá da Bandeira – eixo urbano arborizado, com tráfego intenso e forte influência de superfícies artificiais.

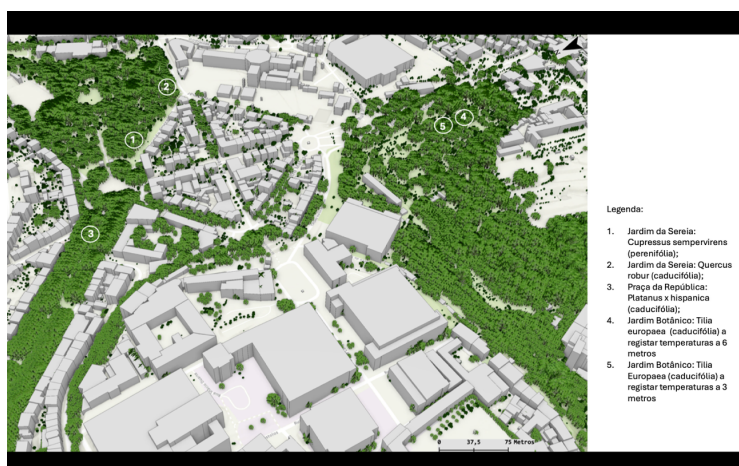


Figura 2. Localização dos pontos de medição nos diferentes contextos urbanos. Representação tridimensional dos tipos de ecossistemas urbanos monitorizados na área central de Coimbra, ilustrando as estruturas de vegetação e a localização dos sensores.

A seleção destes locais segue critérios utilizados em estudos de climatologia urbana, baseados na representatividade dos diferentes *Local Climate Zones* (LCZ) propostos por Stewart e Oke (2012).

3.4. Caracterização das espécies arbóreas

O estudo incidiu sobre espécies representativas do coberto arbóreo urbano de Coimbra, incluindo:

- *Quercus robur* – espécie caducifólia, de copa ampla e densa, com elevada capacidade de sombreamento;
- *Tilia europaea* – espécie caducifólia de grande porte, frequentemente utilizada em espaços verdes urbanos;
- *Platanus × hispanica* – espécie caducifólia comum em ambientes urbanos, adaptada a condições de stress ambiental;
- *Cupressus sempervirens* – espécie perenifólia de copa estreita e vertical.

As diferenças morfológicas e fenológicas entre estas espécies influenciam diretamente o seu desempenho microclimático, nomeadamente ao nível do sombreamento e da evapotranspiração (Rahman et al., 2018; Leuzinger et al., 2010).

As espécies arbóreas desempenham funções microclimáticas fundamentais através do sombreamento, da evapotranspiração e da modulação do vento. Estes mecanismos contribuem para a redução da temperatura do ar e das superfícies envolventes, bem como para a regulação sazonal da radiação solar, particularmente em espécies caducifólias, promovendo assim a melhoria do conforto térmico em meio urbano.

3.5. Justificação da área de estudo

A escolha de Coimbra como área de estudo justifica-se pela combinação de três fatores principais:

1. Diversidade morfológica urbana, permitindo analisar diferentes contextos microclimáticos;
2. Presença significativa de vegetação arbórea, em espaços verdes e em alinhamentos urbanos;
3. Ocorrência de episódios de calor intenso, que tornam relevante o estudo de estratégias de mitigação térmica.

Adicionalmente, Coimbra tem sido objeto de diversos estudos no domínio da climatologia urbana em Portugal, o que permite enquadrar os resultados num contexto científico consolidado.

4. Metodologia

4.1. Desenho de investigação

O presente estudo assenta numa abordagem empírica de natureza observacional, baseada em medições microclimáticas *in situ*, seguindo metodologias amplamente utilizadas na climatologia urbana (Oke, 1987; Stewart & Oke, 2012). Apesar de não integrar todas as variáveis biometeorológicas, a temperatura do ar constitui um indicador robusto para a análise de contrastes térmicos intraurbanos, sendo amplamente utilizada em estudos de climatologia urbana e de ilhas de calor. O desenho de investigação foi estruturado de forma a permitir a comparação entre: (i) diferentes espécies arbóreas (caducifólias e perenifólias); (ii) distintos contextos espaciais (espaço verde vs. espaço urbano mineralizado); e (iii) diferentes níveis verticais no interior da copa.

Este desenho comparativo permite analisar o papel da vegetação na modulação térmica à escala microclimática, em linha com estudos semelhantes (Bowler et al., 2010; Shashua-Bar et al., 2009). Permite, deste modo, isolar o efeito relativo de três dimensões fundamentais: (i) características biofísicas da vegetação; (ii) contexto urbano envolvente; (iii) estrutura tridimensional do coberto arbóreo.

4.2. Instrumentação e variáveis

Foram utilizados *dataloggers* de temperatura do ar com registo automático em intervalos horários, seguindo procedimentos metodológicos comuns em estudos microclimáticos urbanos (Oke, 2004; Voogt & Oke, 2003). Os sensores foram instalados em diferentes locais da cidade, associados a espécies arbóreas representativas (Quadro 3).

Sempre que possível, os sensores foram posicionados sob a copa das árvores, em condições de sombreamento natural, evitando exposição direta à radiação solar. No entanto, foram identificados episódios pontuais de sobreaquecimento dos sensores devido à incidência direta da radiação, fenómeno já descrito na literatura (Nakamura & Oke, 1988).

4.3. Configuração espacial dos sensores

Os sensores foram instalados nos seguintes contextos:

- Jardim Botânico – sensores a 3 m e 6 m numa *Tilia europaea*, permitindo análise da estratificação térmica vertical;
- Jardim da Sereia – sensores sob *Quercus robur* (caducifólia) e *Cupressus sempervirens* (perenifólia);
- Praça da República – sensor associado a *Platanus × hispanica* em contexto urbano mineralizado;

Quadro 3. Caracterização dos pontos de medição (local, espécie, altura, contexto urbano, período de registo)

Local	Espécie	Altura	Contexto Urbano	Período de registo
Jardim Botânico	<i>Tilia europaea</i>	3 metros e 6 metros	Ecossistemas de parque aberto	2022/2023
Jardim da Sereia	<i>Quercus robur</i> (caducifólia)	Subcopa (2 metros)	Ecossistema de parque semiaberto	2022/2024
Jardim da Sereia	<i>Cupressus sempervirens</i> (perenifólia)	Subcopa (2 metros)	Ecossistema de parque semiaberto	2022/2024
Praça da República	<i>Platanus × hispanica</i>	Subcopa (2 metros)	Ecossistema edificado com baixa componente biótica	2023/2024

A instalação a diferentes alturas (3 m e 6 m) permite captar variações térmicas verticais no interior da copa, uma abordagem utilizada em estudos de microclima arbóreo (Rahman et al., 2018).

4.4. Período de recolha de dados

Os dados foram recolhidos entre 2022 e 2024, abrangendo diferentes estações do ano. Foram selecionados, para análise comparativa, períodos representativos de verão (julho e agosto) e inverno (janeiro), permitindo captar extremos térmicos e efeitos fenológicos.

Esta abordagem sazonal é consistente com estudos que analisam a influência da fenologia arbórea no microclima urbano (Gill et al., 2007; Morakinyo et al., 2017).

4.5. Tratamento e validação dos dados

O tratamento dos dados incluiu as etapas de “Controlo de qualidade” – identificação de valores inconsistentes ou anómalos; filtragem de *outliers* – exclusão ou correção de registos associados a exposição direta dos sensores à radiação solar; homogeneização temporal – seleção de períodos comparáveis entre locais.

Nos casos em que se verificou sobreaquecimento pontual dos sensores, foi aplicada uma correção baseada na interpolação temporal (média entre valores adjacentes), assumindo continuidade térmica da série.

Este procedimento, embora simplificado, permite reduzir o impacto de erros instrumentais, sendo uma prática referida em estudos empíricos quando não existem dados redundantes (WMO, 2018).

4.6. Métodos de análise

A análise dos dados foi realizada através de diferentes técnicas complementares:

- *Boxplots* mensais, para caracterização da distribuição térmica (mediana, quartis, extremos);
- Séries temporais diárias, para análise da dinâmica intra-diurna;

- Comparações diferenciais, entre espécies e contextos urbanos.

Foi ainda calculado o gradiente térmico vertical (ΔT), para o Jardim Botânico, definido como: $\Delta T = T(6 \text{ m}) - T(3 \text{ m})$. Para a análise do Jardim da Sereia e da Praça da República, calculou-se a amplitude térmica diária ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) para cada área.

Este tipo de análise permite identificar padrões de estratificação térmica, frequentemente associados à radiação solar e à estrutura da copa (Leuzinger et al., 2010).

4.7. Operacionalização do conceito de sombra térmica

Neste estudo, a distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” é operacionalizada através da diferença térmica entre a temperatura registada sob copa arbórea e uma condição de referência exposta ou menos arborizada. Define-se como sombra fresca a situação em que a copa arbórea produz uma redução efetiva da temperatura do ar, expressa por valores positivos de ΔT , calculado como $\Delta T = T_{\text{ref}} - T_{\text{shade}}$. Esta abordagem baseia-se na tradição da climatologia urbana, que utiliza contrastes térmicos entre diferentes superfícies e contextos como forma de identificar e quantificar padrões microclimáticos (Oke, 1987; Stewart & Oke, 2012). Considera-se sombra fresca moderada quando essa redução se situa entre 1,0°C e 2,0°C, e sombra fresca forte quando ultrapassa 2,0°C, valores consistentes com estudos empíricos sobre o efeito de arrefecimento da vegetação urbana (Shashua-Bar et al., 2009; Bowler et al., 2010). Pelo contrário, considera-se sombra quente quando a presença de sombra não se traduz numa redução térmica significativa, ou quando a temperatura sob copa é igual ou superior à da condição de referência, particularmente em contextos urbanos mineralizados e de elevada inércia térmica.

Sempre que existam dados suficientes, esta classificação poderá ser complementada por índices biometeorológicos, como o *Physiological Equivalent Temperature* (PET) ou o *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), que integram variáveis como temperatura do ar, radiação, humidade e vento, permitindo uma avaliação mais completa do conforto térmico humano (Matzarakis et al., 1999; Bröde et al., 2012). Nestes casos, a sombra fresca corresponderá a reduções significativas de PET ou UTCI face à condição de referência, refletindo uma diminuição efetiva do stress térmico, enquanto a sombra quente corresponderá a situações em que o sombreamento não reduz substancialmente a carga térmica percecionada. Esta abordagem é consistente com estudos recentes que demonstram que a eficácia climática da vegetação urbana depende não apenas da redução da radiação solar direta, mas também da interação com processos evaporativos e com a estrutura térmica do espaço urbano (Gill et al., 2007; Santamouris, 2013).

4.8. Limitações metodológicas

Apesar do rigor do desenho experimental e da consistência dos dados recolhidos, o presente estudo apresenta um conjunto de limitações metodológicas que importa

explicitar, não apenas enquanto constrangimentos, mas também enquanto elementos estruturantes da interpretação dos resultados.

Uma primeira limitação decorre da natureza das variáveis analisadas. O estudo baseia-se exclusivamente em medições da temperatura do ar, não integrando outras variáveis fundamentais para a caracterização completa do microclima urbano, como a radiação solar, a humidade relativa ou a velocidade do vento. Estas variáveis desempenham um papel determinante na definição do conforto térmico humano, nomeadamente através da sua integração em índices biometeorológicos como o PET ou o UTCI. Neste sentido, os resultados apresentados devem ser interpretados como uma análise de diferenciação térmica relativa entre contextos urbanos e tipos de coberto arbóreo, e não como uma avaliação direta do conforto térmico percebido pelos utilizadores do espaço urbano. Ainda assim, a temperatura do ar constitui um indicador robusto e amplamente utilizado na climatologia urbana para a identificação de contrastes térmicos intraurbanos e para a análise do fenómeno de ilha de calor urbana, permitindo uma leitura consistente dos padrões espaciais e temporais observados.

Uma segunda limitação relaciona-se com a ausência de medições diretas de fluxos radiativos e de processos evaporativos. A interpretação do papel da vegetação na modulação térmica, nomeadamente no que se refere aos mecanismos de sombreamento e evapotranspiração, baseia-se em inferências sustentadas na literatura e nos padrões térmicos observados, designadamente na dinâmica intra-diurna e sazonal da temperatura do ar. Embora esta abordagem seja consistente com estudos empíricos em climatologia urbana, implica que os mecanismos físicos subjacentes aos padrões identificados não sejam diretamente quantificados, devendo ser interpretados como processos explicativos plausíveis, e não como relações causalmente demonstradas no contexto específico deste estudo.

Adicionalmente, importa considerar o papel potencial da ventilação local, variável que não foi medida diretamente, mas que poderá influenciar significativamente os padrões térmicos observados. Em particular, diferenças na configuração morfológica dos espaços urbanos — como a abertura do espaço, a presença de obstáculos à circulação do ar ou a geometria urbana — poderão contribuir para variações na dissipação de calor, afetando a comparação entre locais com diferentes características. Neste sentido, a ventilação deve ser entendida como uma variável latente na interpretação dos resultados, cuja influência não pode ser isolada no âmbito do presente desenho experimental.

Outra limitação prende-se com a heterogeneidade espacial e funcional dos locais de amostragem. Embora a seleção dos pontos de medição tenha seguido critérios de representatividade de diferentes contextos urbanos, as diferenças inerentes à morfologia urbana, à natureza das superfícies envolventes e à organização do espaço dificultam a comparação direta entre locais, introduzindo um grau de variabilidade que não pode ser totalmente controlado. Esta condição é, no entanto, intrínseca aos estudos de climatologia urbana *in situ*, onde a complexidade do sistema urbano constitui simultaneamente um desafio metodológico e um elemento central de análise.

No que respeita à qualidade dos dados, registaram-se episódios pontuais de sobre-aquecimento dos sensores, associados à exposição direta à radiação solar, fenómeno amplamente documentado na literatura. Nestes casos, foi aplicada uma correção conservadora baseada na interpolação temporal entre valores adjacentes, procedimento recomendado em situações de ausência de dados redundantes. Embora esta abordagem permita mitigar o impacto de erros instrumentais, introduz um nível adicional de incerteza, que, contudo, não compromete os padrões térmicos globais identificados.

Por fim, importa sublinhar que o presente estudo se inscreve numa abordagem observacional, centrada na análise de padrões empíricos em contexto real, o que implica a impossibilidade de controlo total das variáveis ambientais. Consequentemente, os resultados devem ser interpretados numa perspetiva de diferenciação térmica relativa e de identificação de tendências consistentes, mais do que como quantificações absolutas dos processos microclimáticos. Ainda assim, a coerência dos padrões observados entre diferentes espécies, contextos e períodos sazonais reforça a robustez das conclusões, permitindo sustentar a proposta conceptual de distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” como uma ferramenta interpretativa válida no domínio da climatologia urbana aplicada.

5. Análise dos dados

5.1. Comportamento térmico das espécies arbóreas em contexto de espaço verde

A análise comparativa realizada no Jardim da Sereia evidencia diferenças significativas no comportamento térmico entre a espécie caducifólia *Quercus robur* e a espécie perenifólia *Cupressus sempervirens*, permitindo aprofundar o papel da estrutura da copa e da fenologia na modulação do microclima urbano (Figura 3).

Durante o período estival, os registos térmicos demonstram que *Quercus robur* apresenta, de forma consistente, valores de temperatura do ar inferiores aos observados sob *Cupressus sempervirens*. Este comportamento está diretamente associado à maior densidade foliar e à arquitetura expansiva da copa da espécie caducifólia, que favorece um bloqueio mais eficaz da radiação solar incidente. Consequentemente, verifica-se uma redução mais acentuada do aquecimento das superfícies subjacentes e uma maior capacidade de arrefecimento do ar envolvente.

Por oposição, *Cupressus sempervirens*, caracterizado por uma copa estreita e um formato fastigiado, revela uma menor eficácia no sombreamento, permitindo maior penetração da radiação solar e originando temperaturas mais elevadas ao longo do dia. Esta diferença torna-se particularmente evidente nas horas de maior intensidade radiativa, período em que a divergência térmica entre as duas espécies se acentua.

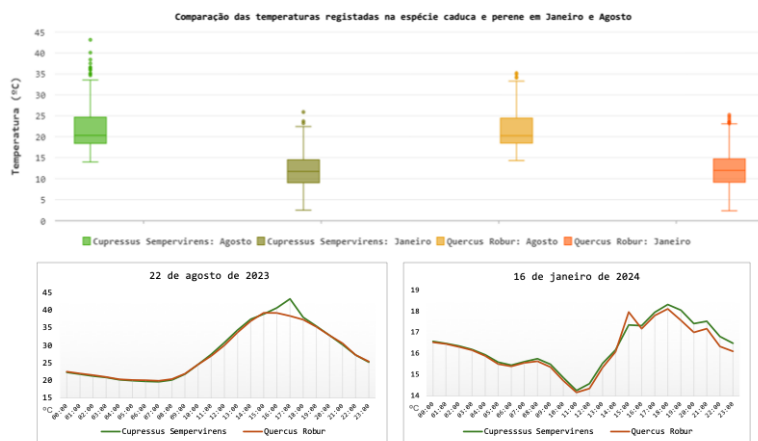


Figura 3. Comparação da distribuição estatística das temperaturas (*boxplot*) e da variação térmica diária registada sob a copa de *Cupressus sempervirens* e *Quercus robur*, em agosto de 2023 e janeiro de 2024, evidenciando diferenças no desempenho microclimático entre a espécie caducifólia e perenifólia.

No período invernal, observa-se uma inversão parcial deste comportamento, associada à fenologia das espécies. A perda de folhagem de *Quercus robur* permite uma maior incidência de radiação solar sobre o solo, traduzindo-se em temperaturas diurnas mais elevadas comparativamente às registadas sob *Cupressus sempervirens*, cujo dossel perene persiste como barreira à radiação. Esta dinâmica evidencia o papel determinante da sazonalidade na regulação microclimática, confirmando que o desempenho térmico das espécies não pode ser interpretado de forma estática, mas antes como um processo contínuo e variável ao longo do ano.

5.2. Estratificação térmica vertical no interior da copa arbórea

A análise dos dados obtidos na *Tilia europaea*, com sensores instalados a 3 e 6 metros de altura, permite evidenciar a existência de uma clara diferenciação térmica vertical no interior da copa, particularmente durante o período de verão (Figura 4).

• Gradiente térmico vertical na *Tilia Europaea* medido a 3 e 6 metros de altura

Medições com dataloggers de temperatura no Jardim Botânico da Universidade de Coimbra

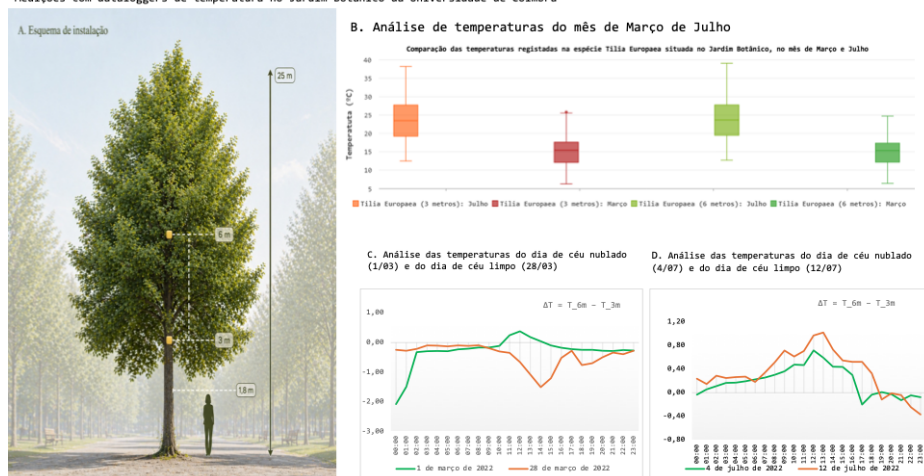


Figura 4. Avaliação do gradiente térmico vertical sob a copa da *Tilia europaea*, demonstrando o papel da densidade e estrutura da copa na modulação térmica ao longo do perfil vertical, com variações sazonais e diurnas em diferentes condições meteorológicas.

No mês de março, correspondente a uma fase inicial do ciclo vegetativo, os valores registados revelam uma fraca diferenciação térmica entre os dois níveis, com gradientes próximos da neutralidade. Este comportamento pode ser explicado pela reduzida densidade foliar, que permite uma maior homogeneização térmica e uma menor capacidade de modulação da radiação solar. Embora a Figura 4B ilustre a distribuição geral das temperaturas nos dois meses, a diferença vertical entre os 3 e os 6 metros é, nesta fase, pouco expressiva, como confirmado pelo perfil diário da Figura 4C, onde o ΔT oscila predominantemente em torno de valores negativos.

Em contraste, no mês de julho, quando a copa se encontra plenamente desenvolvida, a estratificação térmica vertical torna-se mais marcada, sendo esta diferença mais legível nos perfis diários da Figura 4D do que na distribuição mensal da Figura 4B. Durante as horas de maior insolação, o ΔT assume valores predominantemente positivos, confirmando que o topo da copa, à cota dos 6 metros, regista temperaturas superiores às da subcopa, por efeito da maior exposição à radiação solar direta. Em sentido inverso, o nível da sub-copa beneficia de condições de sombreamento mais eficazes, traduzindo-se em temperaturas comparativamente mais moderadas.

Para além da sazonalidade, a análise diária evidencia que a intensidade do gradiente térmico vertical varia ao longo do dia, sendo mais acentuada durante as horas centrais, quando a radiação solar atinge valores máximos. Em períodos de maior nebulosidade, este gradiente tende a atenuar-se, o que confirma o papel central da radiação na organização térmica vertical do microclima arbóreo.

Os resultados revelam que o sinal e a magnitude do gradiente térmico vertical ($\Delta T = T_{6m} - T_{3m}$) são determinados pela interação entre a densidade foliar sazonal da copa e as condições de radiação solar. Em julho, com a copa em plena expansão, o dossel interceta a radiação de onda curta, aquecendo preferencialmente a camada

superior (6m) e protegendo a camada inferior (3m), o que cria um ΔT positivo e persistente durante o período diurno (pico de $+1,0^{\circ}\text{C}$ a $+1,2^{\circ}\text{C}$). Em Março, com a copa ainda pouco densa, esta barreira radiativa é praticamente inexistente: o aquecimento condutivo do solo e a penetração direta da radiação solar até à superfície resultam numa camada de 3m mais quente que a 6m, invertendo o sinal do ΔT . Em ambas as estações o gradiente converge para 0 durante a noite, confirmando que o fenómeno é essencialmente radiativo e não advectivo.

Estes resultados demonstram que o microclima urbano apresenta uma estrutura tridimensional complexa, na qual a vegetação não atua apenas ao nível do solo, mas também na vertical, criando nichos térmicos diferenciados que influenciam diretamente o conforto ao nível pedonal.

5.3. Influência do contexto urbano na modulação térmica

A comparação entre o Jardim da Sereia e a Praça da República permite evidenciar o papel determinante do contexto urbano na eficácia do sombreamento e na regulação térmica. Embora ambas as áreas apresentem espécies arbóreas com capacidade de sombreamento, os resultados demonstram que o ambiente envolvente condiciona fortemente o comportamento térmico observado. A Figura 5 ilustra esta diferenciação: nos *boxplots* mensais, o *Quercus robur* apresenta maior dispersão térmica em agosto, refletindo a variabilidade característica do espaço verde; nos perfis diários, a divergência entre espécies acentua-se nas horas de maior insolação (11h–17h), sendo mais expressiva no dia estival de 22 de agosto do que no dia invernal de 16 de janeiro.

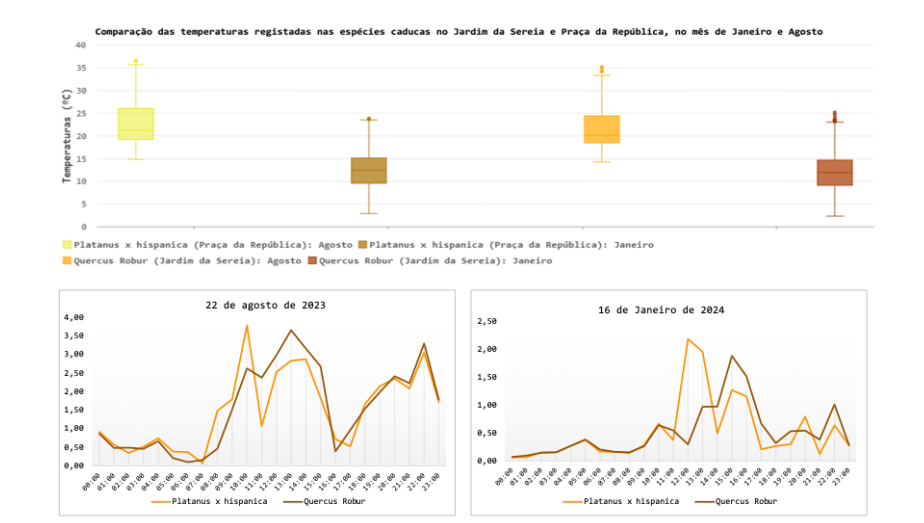


Figura 5. Comparação do desempenho microclimático de *Platanus x hispanica* e *Quercus robur*, com base na distribuição e variação horária da temperatura do ar em períodos estivais e inverniais, evidenciando diferenças no efeito de sombreamento e modulação térmica.

Na Praça da República, caracterizada por uma elevada impermeabilização do solo e pela predominância de materiais como o asfalto e a pedra, os registos térmicos

evidenciam valores mais elevados. Este comportamento está associado à elevada capacidade de absorção e armazenamento de calor destes materiais, que contribuem para o aquecimento do ar circundante e para a manutenção de temperaturas elevadas, mesmo em zonas aparentemente sombreadas.

Em contraste, no Jardim da Sereia, a presença de solo permeável, vegetação densa e maior disponibilidade hídrica favorece os processos de evapotranspiração, resultando numa redução mais eficaz da temperatura do ar. Este efeito traduz-se na formação de microclimas mais amenos e estáveis, com menor amplitude térmica e um aquecimento mais gradual ao longo do dia.

No dia estival (22 de agosto de 2023), ambas as espécies apresentam valores de amplitude térmica baixos e semelhantes durante o período noturno, refletindo a ausência de radiação solar. Contudo, o *Platanus* evidencia valores ligeiramente superiores, sugerindo a influência da reemissão térmica das superfícies impermeáveis da Praça da República. Durante a manhã, ambas as curvas aumentam com a insolação, mas o *Platanus* apresenta uma resposta mais rápida e irregular, em contraste com a subida mais gradual do *Quercus*, explicada pela ação combinada da evapotranspiração, que consome energia sob a forma de calor latente, e pelas condições microclimáticas do jardim.

No período de maior insolação, as diferenças de amplitude térmica diária tornam-se mais evidentes: sob *Quercus* (jardim), registam-se valores mais elevados (3,0–3,5 °C), refletindo a maior variabilidade térmica diária característica de um espaço verde com substrato permeável; sob *Platanus* (praça), os valores são inferiores e mais estáveis (2,0–2,5 °C), o que não traduz necessariamente um ambiente mais fresco, mas antes a capacidade dos materiais impermeáveis de acumular e reemitir calor, amortecendo a variação diária sem reduzir as temperaturas absolutas.

No dia invernal (16 de janeiro de 2024), ambas as espécies apresentam amplitudes térmicas reduzidas e maior irregularidade ao longo do dia. Durante a noite e a manhã, os valores aproximam-se de zero, sem padrão definido. No período diurno, o *Platanus* regista um pico de amplitude superior (2,0 °C) ao do *Quercus* (1,5 °C), embora a diferença entre espécies seja menos acentuada do que no verão, em consequência da ausência de folhagem e da redução da atividade transpirativa.

A comparação entre estes dois contextos demonstra que a simples presença de árvores não é condição suficiente para garantir conforto térmico urbano. A eficácia do sombreamento depende da interação entre a vegetação e o meio envolvente, sendo particularmente influenciada pela natureza das superfícies, pela disponibilidade hídrica e pela configuração morfológica do espaço urbano.

5.4. Dinâmica térmica intra-diurna e padrões de variação

A análise das séries temporais diárias permite identificar padrões consistentes na variação térmica ao longo do dia, comuns aos diferentes contextos e espécies analisadas. De forma geral, observa-se um aumento progressivo da temperatura após o nascer do sol, atingindo valores máximos durante as horas centrais do dia, seguido de uma diminuição gradual ao longo da tarde e noite.

As diferenças entre espécies e contextos tornam-se mais evidentes durante o período de maior intensidade da radiação solar, momento em que o efeito do sombreamento e da evapotranspiração se manifesta de forma mais clara. Durante a noite, por sua vez, as temperaturas tendem a convergir, refletindo a redução da influência da radiação solar e o predomínio de processos de arrefecimento radiativo.

Nos contextos urbanos mais densos, verifica-se uma menor taxa de arrefecimento noturno, associada à libertação progressiva do calor armazenado pelas superfícies durante o dia. Este fenómeno, característico das Ilhas de Calor Urbanas, contribui para a manutenção de temperaturas mais elevadas durante a noite, diferenciando claramente estes espaços dos contextos mais verdes.

No caso da espécie *Quercus robur*, localizada num espaço verde, beneficia da maior disponibilidade hídrica e cobertura vegetal, o que favorece a evapotranspiração e o aquecimento tardio. Por outro lado, o *Platanus × hispanica*, inserido num meio urbano, está sujeito a superfícies impermeáveis e maior acumulação de calor, conduzindo a um aquecimento mais rápido e a picos térmicos precoces.

5.5. Integração dos resultados e validação do conceito de sombra térmica

A análise integrada dos dados permite consolidar a distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” como uma ferramenta interpretativa relevante no domínio da climatologia urbana aplicada. Os resultados demonstram que a sombra associada a espécies com copas densas, inseridas em contextos com elevada disponibilidade hídrica e menor artificialização, tende a produzir uma redução efetiva da temperatura do ar, configurando situações de “sombra fresca”.

Por outro lado, em contextos urbanos fortemente mineralizados, a presença de sombra não se traduz necessariamente em arrefecimento significativo, devido à influência do calor armazenado e reemitido pelas superfícies envolventes. Nestes casos, a “sombra quente” emerge como uma condição em que o sombreamento é insuficiente para contrariar o aquecimento do ambiente.

Esta distinção evidencia que o desempenho térmico da vegetação urbana resulta de uma interação complexa entre fatores biofísicos e urbanos, reforçando a necessidade de abordagens integradas no planeamento e na gestão da infraestrutura verde urbana.

6. Discussão

Para além da interpretação dos resultados obtidos em Coimbra, importa discutir o significado conceptual das evidências apresentadas. O principal contributo deste estudo não reside apenas na demonstração de diferenças térmicas entre espécies arbóreas ou entre distintos contextos urbanos, aspetos já amplamente documentados na literatura internacional, mas sobretudo na proposta de uma nova forma de interpretar essas diferenças através da distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca”.

Esta proposta não pretende substituir os indicadores biometeorológicos clássicos nem os modelos consolidados da climatologia urbana. Pelo contrário, procura funcionar como uma categoria interpretativa intermédia, suficientemente simples para ser operacionalizada em estudos de campo e suficientemente robusta para apoiar decisões de planeamento urbano. Neste sentido, a diferenciação entre sombra quente e sombra fresca constitui uma aproximação funcional ao desempenho climático do coberto arbóreo, permitindo integrar, numa mesma leitura, fatores estruturais da vegetação, características do contexto urbano e comportamento térmico observado.

6.1. O papel diferencial das espécies arbóreas na modulação térmica

Os resultados obtidos confirmam que a vegetação arbórea desempenha um papel relevante na modulação do microclima urbano, mas evidenciam simultaneamente que esse efeito não é uniforme entre espécies. A comparação entre *Quercus robur* e *Cupressus sempervirens* demonstra que a estrutura da copa e a densidade foliar são fatores determinantes na eficácia do sombreamento, corroborando estudos que apontam a arquitetura da copa como variável-chave na regulação térmica (Rahman et al., 2018; Leuzinger et al., 2010).

No caso das espécies caducifólias, a presença de copas amplas e densas durante o verão traduz-se numa redução mais eficaz da radiação solar incidente e, consequentemente, numa diminuição das temperaturas ao nível do solo. Este comportamento é consistente com a literatura, que evidencia o papel destas espécies na mitigação do stress térmico em climas mediterrânicos (Gill et al., 2007; Bowler et al., 2010).

Por outro lado, as espécies perenifólias analisadas, apesar de garantirem cobertura ao longo de todo o ano, apresentam menor eficácia no verão quando a sua copa é menos densa ou menos expansiva. Este resultado reforça a necessidade de considerar não apenas a persistência foliar, mas também a morfologia da copa no planeamento urbano (Quadro 4).

Quadro 4. Relação entre características da copa e desempenho térmico das espécies

Característica da copa	Descrição	Exemplos de características	Efeito térmico predominante	Desempenho térmico (no verão)	Desempenho térmico (no inverno)	Observações / Impactos urbanos
Densidade foliar	Quantidade de folhas por unidade de volume da copa.	• Densa • Intermediária • Rala	Sombreamento e redução da radiação solar	● Excelente (quanto mais densa, maior o resfriamento)	● Moderado a baixo (reduz ganho solar no inverno)	Copas muito densas são ideais para climas quentes; em climas frios, podem reduzir o aquecimento solar desejado.
Amplitude da copa	Extensão horizontal da copa.	• Ampla (> 8 m) • Média (4–8 m) • Pequena (< 4 m)	Aumento da área sombreada	● Excelente (quanto maior a amplitude)	● Moderado (maior amplitude = mais sombreamento)	Copas amplas proporcionam maior sombreamento de superfícies e fachadas, reduzindo ilhas de calor.
Altura da copa	Distância entre o solo e o início da copa.	• Baixa (< 2 m) • Média (2–4 m) • Alta (> 4 m)	Ventilação e circulação do ar	● Bom (copas altas permitem ventilação e resfriamento)	● Bom a excelente (melhor entrada de sol no nível do solo)	Copas muito baixas podem bloquear ventos e reduzir ventilação; copas altas favorecem o conforto térmico pedonal.
Tamanho e espessura das folhas	Dimensão e espessura das folhas que compõem a copa.	• Grandes / espessas • Médias • Pequenas / finas	Evapotranspiração e absorção de calor	● Excelente (folhas grandes e espessas aumentam resfriamento)	● Moderado (folhas grandes reduzem ganho solar)	Folhas grandes e espessas promovem maior evapotranspiração e resfriamento do ar.
Índice de área foliar (IAF)	Relação entre a área total de folhas e a área de solo ocupada.	• Alto (> 3) • Médio (1–3) • Baixo (< 1)	Intercepção da radiação solar	● Excelente (IAF alto = maior sombreamento)	● Baixo (pode reduzir ganho solar)	IAF alto é desejável para mitigar calor no verão; espécies caducifólias ajustam o IAF sazonalmente.
Estrutura da copa	Forma e distribuição dos ramos e folhagem na copa.	• Globosa / arredondada • Oval / colunar • Irregular / aberta	Sombreamento e resistência ao vento	● Bom a excelente (copas fechadas sombream mais)	● Moderado (copas abertas permitem mais sol)	Copas globosas oferecem sombra uniforme; copas abertas permitem maior penetração solar e ventilação.
Profundidade da copa	Extensão vertical do folhagem (espessura da copa).	• Profunda (> 4 m) • Média (2–4 m) • Rala (< 2 m)	Barreira térmica e redução da temperatura radiante	● Excelente (copas profundas maior barreira térmica)	● Moderado (pode reduzir aquecimento solar)	Copas profundas reduzem a temperatura radiante média dos espaços sombreados.
Persistência das folhas	Período em que a copa mantém as folhas.	• Persistente (perenifólia) • Semidecídua • Caducifólia	Sombreamento sazonal ajustável	● Excelente (persistentes mantêm sombra no verão)	● Excelente (caducifólias permitem sol no inverno)	Caducifólias oferecem melhor equilíbrio sazonal; persistentes garantem sombra constante em climas quentes.
Cor e refletância das folhas	Capacidade das folhas de refletir ou absorver a radiação solar.	• Folhas claras / corosas • Folhas médias • Folhas escuras	Refletância e absorção de calor	● Moderado (folhas refletem mais e aquecem menos)	● Bom (folhas escuras absorvem mais e aquecem mais)	Folhas claras (verde claro, prateadas ou corosas) ajudam a reduzir o ganho de calor no verão.
Diversidade de espécies	Composição de espécies com diferentes características de copa.	• Monoespecífica • Diversidade média • Alta diversidade	Regulação microclimática e resiliência térmica	● Excelente (maior diversidade = melhor resiliência térmica)	● Excelente (diversidade sazonal melhora aproveitamento solar)	Combinações de espécies com diferentes copas otimizam o conforto térmico ao longo do ano e em diferentes condições climáticas.

Nota: o desempenho térmico pode variar conforme o clima local, o porte da árvore, o contexto urbano e o manejo da vegetação.

Desempenho térmico: ● Excelente ● Moderado ● Baixo

Fontes: Adaptado de Novak & Crane (2002); Shashua-Bar et al. (2010); Armon et al. (2012); Lüsley et al. (2016).

6.2. Fenologia e sazonalidade: uma leitura dinâmica do microclima

Um dos aspetos mais relevantes evidenciados pelo estudo é a forte influência da sazonalidade no comportamento térmico das espécies. A inversão observada entre verão e inverno no caso das espécies caducifólias confirma que a fenologia constitui um elemento determinante na regulação do microclima urbano.

Durante o verão, a presença de folhagem promove o sombreamento e reduz o aquecimento das superfícies, enquanto no inverno a sua ausência permite maior entrada de radiação solar, contribuindo para o aquecimento passivo do espaço urbano (Figura 6). Este comportamento dual é amplamente reconhecido como vantajoso em estratégias de urbanismo bioclimático (Oke, 1987; Santamouris, 2013).

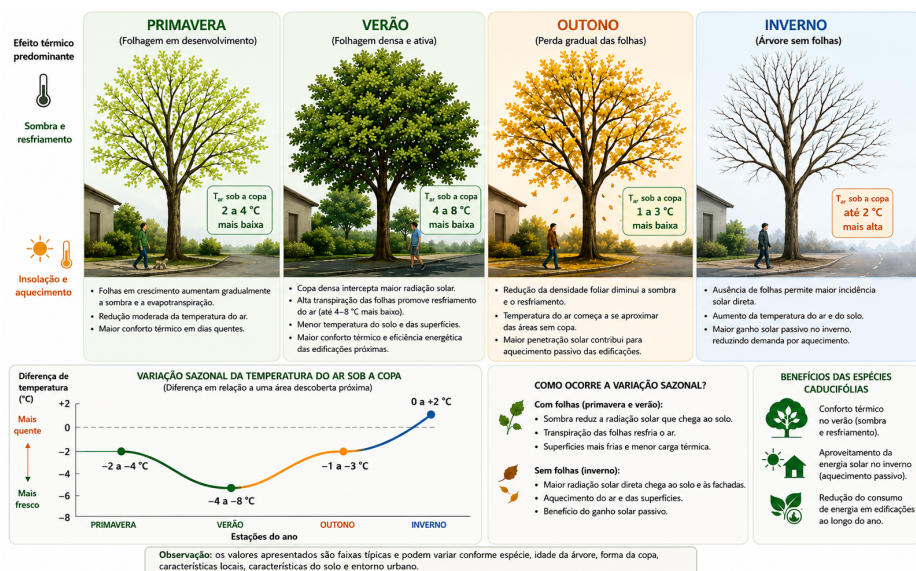


Figura 6. Variação sazonal do efeito térmico das espécies caducifólias: mecanismos de sombreamento e arrefecimento na primavera e verão, atenuação progressiva no outono e inversão do sinal térmico no inverno, com indicação dos valores típicos de diferença de temperatura face a áreas descobertas.

6.3. A importância do contexto urbano: além da espécie

Os resultados demonstram claramente que o efeito térmico das árvores não pode ser analisado isoladamente, sendo fortemente condicionado pelo contexto urbano em que se inserem. A comparação entre o Jardim da Sereia e a Praça da República evidencia que a mesma função de sombreamento pode produzir resultados distintos consoante a natureza das superfícies envolventes.

Em espaços verdes, a combinação de solo permeável, vegetação e maior disponibilidade hídrica potencia os processos de evapotranspiração, resultando em temperaturas mais baixas. Em contraste, em espaços fortemente mineralizados, o calor acumulado nas superfícies urbanas tende a reduzir a eficácia do sombreamento, mantendo temperaturas elevadas mesmo em áreas sombreadas.

Este resultado está em linha com estudos que sublinham a importância da interação entre forma urbana e cobertura vegetal na produção do microclima (Stewart & Oke, 2012; Shashua-Bar et al., 2009).

6.4. Estratificação térmica vertical e complexidade microclimática

A análise da estratificação térmica vertical na *Tilia europaea* revela que o microclima urbano não é apenas heterogêneo no plano horizontal, mas também no plano vertical. A existência de gradientes térmicos no interior da copa confirma a presença de microambientes diferenciados, associados à distribuição da radiação solar e à circulação do ar (Figura 7).

Durante o verão, a maior exposição da parte superior da copa resulta em temperaturas mais elevadas, enquanto a subcopa beneficia de condições mais estáveis e frescas. Este padrão tem sido descrito na literatura como característico de ambientes arbóreos urbanos (Leuzinger et al., 2010).

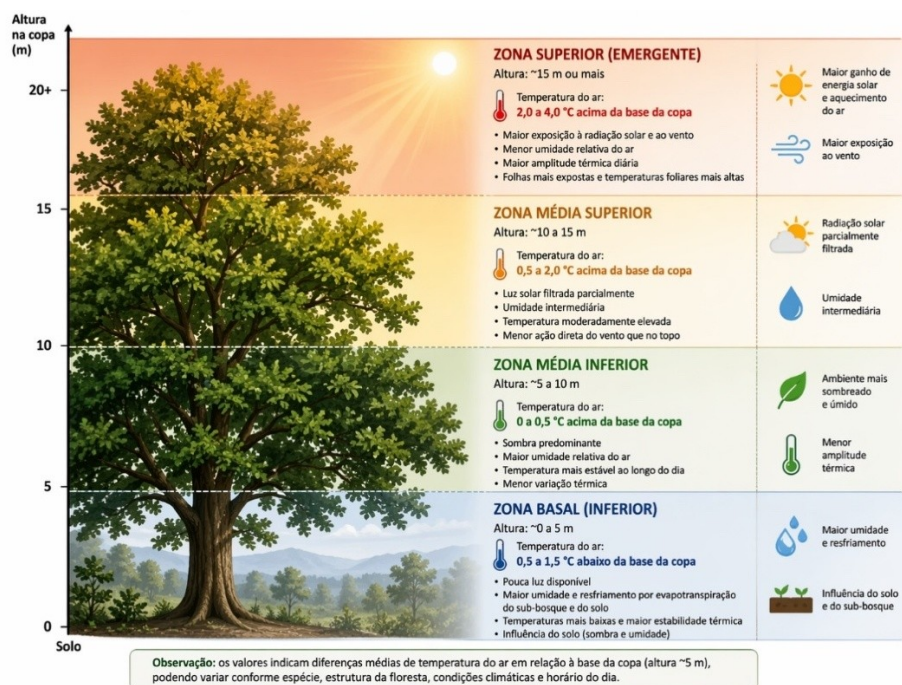


Figura 7. Estratificação térmica vertical na copa arbórea: caracterização das quatro zonas verticais (basal, média inferior, média superior e emergente) em função da temperatura do ar, radiação solar, humidade e amplitude térmica, evidenciando o gradiente crescente de temperatura e exposição radiativa com a altura.

Esta dimensão vertical do microclima tem implicações importantes para o conforto térmico dos utilizadores do espaço urbano, uma vez que a percepção térmica ocorre ao nível pedonal.

6.5. Sombra quente e sombra fresca: validação do conceito

A análise integrada dos resultados permite validar empiricamente a distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca”. Esta distinção revela-se particularmente útil para interpretar situações em que a presença de sombra não se traduz necessariamente em conforto térmico (Figura 8).

A “sombra fresca” ocorre sobretudo em contextos em que o sombreamento é acompanhado por evapotranspiração eficaz e baixa acumulação de calor nas superfícies, como nos espaços verdes estudados. Por oposição, a “sombra quente” verifica-se em ambientes urbanos densamente mineralizados, onde o calor armazenado nas superfícies limita o arrefecimento do ar.

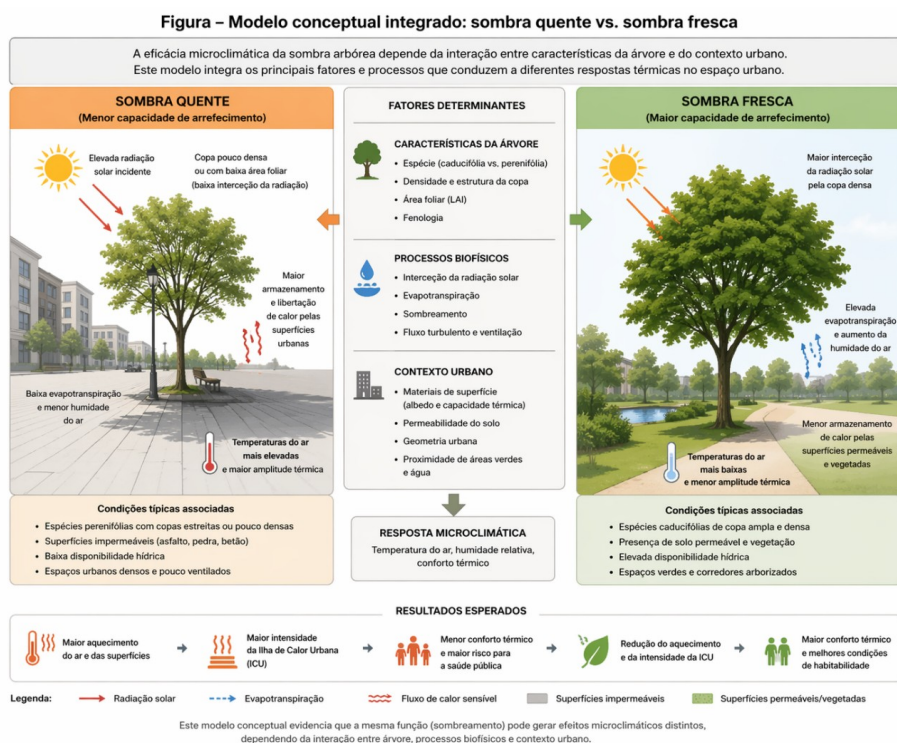


Figura 8. Modelo conceptual integrado: sombra quente vs. sombra fresca.

Este conceito, embora simplificado, permite articular de forma eficaz variáveis biofísicas e urbanas, oferecendo uma ferramenta interpretativa útil para a climatologia urbana aplicada.

6.6. Implicações para o planeamento urbano e políticas públicas

A interpretação dos resultados assenta numa abordagem de triangulação conceptual, que articula três dimensões fundamentais: (i) os padrões térmicos observados, (ii) as características estruturais das espécies arbóreas e (iii) o contexto urbano envolvente. Esta abordagem permite reforçar a consistência das inferências, ao identificar convergências entre diferentes níveis de análise, reduzindo a dependência de uma

única variável e mitigando as limitações associadas à ausência de medições microclimáticas completas. Ao evidenciar a interação entre fatores biofísicos e urbanos, esta leitura integrada ultrapassa uma visão simplificada do sombreamento, demonstrando que o desempenho térmico do coberto arbóreo resulta de processos multivariados e espacialmente diferenciados. Neste sentido, constitui uma base analítica robusta para a tradução dos resultados empíricos em orientações operacionais para o planeamento urbano.

Assim, os resultados do estudo têm implicações diretas para o planeamento urbano, nomeadamente no que diz respeito à seleção de espécies e à organização da estrutura verde urbana. A evidência empírica demonstra que a simples presença de árvores não é suficiente para garantir conforto térmico, sendo necessário considerar a sua eficácia real no contexto específico de implantação. Em particular, a distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” evidencia que o efeito do sombreamento depende da articulação entre a densidade e arquitetura da copa, a disponibilidade hídrica e a natureza das superfícies envolventes, reforçando a necessidade de integrar critérios bioclimáticos e ecológicos na conceção e gestão da infraestrutura verde urbana.

Quadro 5. Recomendações para planeamento urbano baseado em evidência microclimática

Recomendações alinhadas com o planeamento urbano sustentável e com as Soluções Baseadas na Natureza (NBS), tal como são promovidas pela Comissão Europeia:
Integrar infraestruturas verdes como um sistemas contínuo ▪ Criar corredores verdes interligados (parques, ruas arborizadas, linhas de água) ▪ Garantir conectividade ecológica entre zonas urbanas e periurbanas ▪ Tratar a vegetação como uma “infraestrutura”
Redução da ilha de calor Urbana ▪ Aumentar cobertura arbórea em zonas densas e pavimentadas ▪ Substituir superfícies impermeáveis por solos permeáveis e vegetação ▪ Priorizar o sombreamento natural em ruas pedonais e praças
Planeamento urbano baseado em desempenho microclimático ▪ Usar a modelação microclimática (temperatura, vento e radiação) ▪ Definir parâmetro como Sky View Factor e conforto térmico ▪ Avaliar os impacto climáticos antes de aprovar novos projetos
Vegetação estratégica e multifuncional ▪ Árvores de copa larga em zonas pedonais de modo a criar conforto térmico com a sombra fresca ▪ Árvores adaptadas ao clima local e resistentes à seca
Desenho urbano orientado para o conforto térmico ▪ Evitar ruas estreitas sem ventilação natural ▪ Promover alinhamentos que favoreçam ventos dominantes ▪ Modular as alturas dos edifícios para reduzir a retenção de calor
Apoio de medidas adaptativas e baseadas em evidências ▪ Instalar sensores urbanos de temperatura e humidade ▪ Ajustar intervenções com base em dados reais e não apenas em modelos ▪ Envolver as comunidade no desenho e manutenção das soluções

Estas orientações estão alinhadas com abordagens contemporâneas de planeamento urbano sustentável e Soluções Baseadas na Natureza (Nature-Based Solutions), que valorizam a integração da vegetação como infraestrutura climática (Gill et al., 2007; Santamouris, 2013).

6.7. Limitações e perspetivas futuras

Apesar dos contributos do estudo, importa reconhecer algumas limitações. A ausência de variáveis como humidade relativa, velocidade do vento ou radiação limita uma análise mais integrada do conforto térmico. Adicionalmente, a variabilidade temporal dos dados pode introduzir alguma incerteza nas comparações.

Futuros estudos poderão aprofundar esta investigação através da integração de índices biometeorológicos (como PET ou UTCI), da utilização de modelação microclimática e da análise de diferentes tipologias urbanas.

6.8. Alcance conceptual da proposta

A principal originalidade deste trabalho reside na tentativa de sistematizar uma distinção que, embora implicitamente presente em numerosos estudos de climatologia urbana, raramente foi formalizada como conceito operativo. A literatura descreve frequentemente diferenças de desempenho térmico entre espécies, parques urbanos e espaços mineralizados; contudo, essas diferenças são geralmente apresentadas como resultados específicos de cada estudo e não como expressão de categorias funcionais capazes de apoiar a interpretação comparativa entre diferentes cidades e diferentes sistemas arbóreos.

A distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” pretende precisamente preencher essa lacuna. Mais do que uma classificação dicotómica, constitui um quadro conceptual que permite organizar diferentes níveis de desempenho climático da vegetação urbana e estabelecer uma ligação direta entre investigação microclimática, desenho urbano e gestão da infraestrutura verde.

Neste sentido, o conceito deverá ser entendido como uma hipótese científica aberta, suscetível de ser progressivamente refinada através da integração de novas variáveis microclimáticas, índices biometeorológicos, modelação numérica e observações em diferentes contextos climáticos e urbanos.

7. Conclusões

O presente estudo analisou, de forma integrada, a influência do coberto arbóreo no microclima urbano da cidade de Coimbra, evidenciando o papel determinante da vegetação na mitigação dos efeitos das Ilhas de Calor Urbanas e na promoção do conforto térmico em espaço urbano.

Os resultados demonstram que a vegetação arbórea contribui de forma significativa para a redução da temperatura do ar e das superfícies, sobretudo durante o período estival, podendo originar diferenças térmicas relevantes entre áreas sombreadas e áreas expostas. Contudo, esta eficácia não é homogénea, variando em função de um conjunto de fatores interdependentes, entre os quais se destacam a espécie, a estrutura e densidade da copa, a fenologia e o contexto urbano envolvente.

A comparação entre espécies caducifólias e perenifólias revelou comportamentos térmicos distintos, fortemente condicionados pela sazonalidade. As espécies caducifólias, como *Quercus robur*, demonstraram maior eficácia no arrefecimento durante o verão, devido à sua copa densa e ampla, enquanto no inverno a perda de folhagem fa-

vorece maior incidência de radiação solar, contribuindo para um aquecimento relativo do espaço. Este comportamento reforça o papel da fenologia como elemento-chave na regulação microclimática urbana.

Por outro lado, a análise comparativa entre diferentes contextos urbanos evidenciou que o efeito das árvores não pode ser dissociado do ambiente em que se inserem. Os espaços verdes, caracterizados por solos permeáveis e maior disponibilidade hídrica, apresentam condições mais favoráveis à evapotranspiração, resultando em temperaturas significativamente mais baixas. Em contraste, os espaços urbanos fortemente mineralizados tendem a limitar a eficácia do sombreamento, devido à acumulação e reemissão de calor pelas superfícies construídas.

A análise da estratificação térmica vertical demonstrou ainda a existência de gradientes térmicos no interior da copa, evidenciando a complexidade do microclima urbano e a importância de considerar a dimensão tridimensional da vegetação na sua avaliação.

Um dos principais contributos do presente estudo consiste em propor uma primeira sistematização conceptual da distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca”, entendidas como categorias analíticas destinadas a interpretar o desempenho térmico diferencial do coberto arbóreo em contexto urbano. Os resultados obtidos em Coimbra demonstram que a presença de árvores, embora essencial para a mitigação climática, não conduz automaticamente à criação de ambientes termicamente mais confortáveis. Pelo contrário, a eficácia do sombreamento resulta da interação entre a arquitetura da copa, a fenologia das espécies, a disponibilidade hídrica e as características térmicas das superfícies envolventes, evidenciando que a qualidade climática da sombra é tão importante quanto a sua existência.

Esta perspetiva permite ultrapassar uma abordagem centrada exclusivamente na quantidade de cobertura arbórea, propondo uma leitura funcional do papel da vegetação urbana. Mais do que contabilizar árvores ou áreas verdes, torna-se necessário compreender o seu desempenho climático efetivo, condição indispensável para apoiar estratégias de adaptação às alterações climáticas, desenho urbano bioclimático e planeamento da infraestrutura verde. Neste sentido, a distinção entre “sombra quente” e “sombra fresca” constitui uma ferramenta interpretativa simples, mas potencialmente útil para aproximar a investigação microclimática das necessidades concretas do ordenamento do território.

Importa, contudo, reconhecer que esta proposta representa uma primeira etapa de um processo de investigação mais amplo. A operacionalização aqui apresentada deverá ser aprofundada através da integração de variáveis meteorológicas adicionais, como a radiação, a velocidade do vento, a humidade relativa e os fluxos de energia, bem como através da utilização de índices biometeorológicos, designadamente o PET e o UTCI, permitindo avaliar de forma mais completa a relação entre sombra, conforto térmico e desempenho ambiental. Do mesmo modo, a validação do conceito em diferentes espécies arbóreas, contextos urbanos e regiões climáticas permitirá testar a sua robustez e capacidade de generalização.

Nesta perspetiva, o presente artigo assume-se como uma primeira aproximação conceptual a uma problemática que poderá vir a constituir um novo campo de investigação no domínio da climatologia urbana aplicada. Coimbra funciona, neste tra-

balho, como um laboratório territorial onde se identificam processos cuja relevância ultrapassa claramente o caso de estudo, abrindo caminho para futuras investigações orientadas para a modelação do desempenho climático da vegetação urbana, para a avaliação funcional da infraestrutura verde e para o desenvolvimento de instrumentos de apoio ao planeamento urbano resiliente.

Em síntese, este estudo demonstra que compreender o contributo da vegetação urbana para a adaptação climática exige uma mudança de paradigma: mais do que aumentar a quantidade de árvores, importa compreender a qualidade climática da sombra que produzem. É precisamente nesta mudança de enfoque – da cobertura arbórea para o desempenho térmico do coberto arbóreo – que reside o principal contributo científico deste trabalho e o ponto de partida para o desenvolvimento das investigações que lhe darão continuidade.

Bibliografia

- Alcoforado, M. J., Andrade, H., Lopes, A., & Vasconcelos, J. (2008). Application of Climatic Guidelines to Urban Planning. *Landscape and Urban Planning*, 90(1–2), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>
- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban Greening to Cool Towns and Cities: A Systematic Review of the Empirical Evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bröde, P., Fiala, D., Blazejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Cordeiro, A., Ornelas, A., & Lameiras, J. M. (2023). The Thermal Regulator Role of Urban Green Spaces: The Case of Coimbra (Portugal). *Forests*, 14(12), 2351. <https://doi.org/10.3390/f14122351>
- Cordeiro, A. M. R. (2021). Morphological System and Urban Settlements. Coimbra (Portugal): A City from the Roman Times to the Present. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 14, 19. <https://doi.org/10.11144/javeriana.cvu14.msus>
- Ganho, N. (1998). *O Clima Urbano de Coimbra: Estudo de Climatologia Local Aplicada ao Ordenamento Urbano* [Dissertação de Doutoramento]. Universidade de Coimbra, Instituto de Estudos Geográficos.
- Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., & Pauleit, S. (2007). Adapting Cities for Climate Change: The Role of the Green Infrastructure. *Built Environment*, 33(1), 115–133. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.115>
- Leuzinger, S., Vogt, R., & Körner, C. (2010). Tree Surface Temperature in an Urban Environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(1), 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2009.08.006>
- Matzarakis, A., Mayer, H., & Iziomon, M. G. (1999). Applications of a Universal Thermal Index: Physiological Equivalent Temperature. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 76–84. <https://doi.org/10.1007/s004840050119>
- Morakinyo, T. E., Kong, L., Lau, K. K.-L., Yuan, C., & Ng, E. (2017). A Study on the Impact of Shadow-Cast and Tree Species on In-Canyon and Neighborhood's Thermal Comfort. *Building and Environment*, 115, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.01.005>

- Nakamura, Y., & Oke, T. R. (1988). Wind, Temperature and Stability Conditions in an East-West Oriented Urban Canyon. *Atmospheric Environment*, 22(12), 2691–2700. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90437-4](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90437-4)
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2^a ed.). Routledge.
- Oke, T. R. (1982). The Energetic Basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (2004). *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites* (rel. técn. N. IOM Report No. 81, WMO/TD-No. 1250). World Meteorological Organization.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(5), 1633–1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Rahman, M. A., Moser, A., Gold, A., Rötzer, T., & Pauleit, S. (2018). Vertical Air Temperature Gradients Under the Shade of Two Contrasting Urban Tree Species During Different Types of Summer Days. *Science of the Total Environment*, 633, 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.168>
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y. C., & Liu, C. (2008). A Review on the Generation, Determination and Mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120–128. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)60019-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)60019-4)
- Santamouris, M. (2013). Using Cool Pavements as a Mitigation Strategy to Fight Urban Heat Island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2009). The Cooling Efficiency of Urban Landscape Strategies in a Hot Dry Climate. *Landscape and Urban Planning*, 92(3–4), 179–186. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.04.005>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal Remote Sensing of Urban Climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)
-