

ANÁLISE COMPARATIVA DE ESTRUTURAS DE SOMBRA URBANA: AVALIAÇÃO DE DOIS NOVOS PROJETOS PARA PROTEÇÃO SOLAR DE PEDESTRES

COMPARATIVE ANALYSIS OF URBAN SHADE STRUCTURES:
EVALUATION OF TWO NEW PROJECTS FOR PEDESTRIAN SOLAR PROTECTION

Ianiv Wainberg

Especialista em Gestão e negócios pela Unisinos (Porto Alegre/Brasil).
E-mail: ianivwainberg@gmail.com

Recebido em: 3 de março de 2025
Aprovado em: 14 de junho de 2025
Sistema de Avaliação: Double Blind Review
BCIJ | v. 5 | n. 1 | p. 05-27 | jan./jun. 2025
DOI: <https://doi.org/10.25112/bcij.v5i1.4185>



RESUMO

Este estudo comparativo qualitativo avalia dois projetos de sombreamento urbano por meio de renderizações de alta fidelidade—sem prototipagem física—voltados à mitigação do estresse térmico e ao conforto de pedestres em clima mediterrâneo. Embasados no contexto israelense, mas aplicáveis a regiões semiáridas e tropicais, o primeiro modelo utiliza membrana tensionada de poliéster-PVDF em postes de aço, enquanto o segundo combina abrigos modulares metálicos com painéis fotovoltaicos, sistema de iluminação adaptativa e displays digitais. Adotando critérios de climatologia urbana, design bioclimático e avaliação de ciclo de vida, comparamos desempenho termorregulador, viabilidade de implantação e integração estética. Os resultados indicam que as membranas tensionadas alcançam até 20 °C de redução na temperatura superficial com infraestrutura mínima, ao passo que os módulos multifuncionais se destacam em resiliência energética e conectividade. A ausência de validação em campo por meio de protótipos físicos é apontada como limitação metodológica. Esses achados fornecem subsídios para estratégias de sombreamento custo-efetivas e culturalmente adaptadas em cidades do Sul Global.

Palavras-chave: Sombreamento urbano; Conforto térmico pedonal; Clima mediterrâneo; Membranas tensionadas; Infraestrutura inteligente.

ABSTRACT

This qualitative comparative study evaluates two urban shading designs through high-fidelity renderings—without physical prototyping—aimed at mitigating thermal stress and enhancing pedestrian comfort in Mediterranean climates. Grounded in the Israeli context yet applicable to semi-arid and tropical regions worldwide, the first model employs a tensioned polyester-PVDF membrane on steel posts, while the second features modular metal shelters with photovoltaic panels, adaptive lighting, and digital displays. Using criteria from urban climatology, bioclimatic design, and life-cycle assessment, we compare thermoregulatory performance, deployability, and aesthetic integration. Results indicate that tensioned membranes achieve up to 20 °C reduction in surface temperature with minimal infrastructure, whereas multifunctional modules excel in energy resilience and connectivity. The absence of field validation through physical prototypes is noted as a methodological limitation. These findings inform cost-effective, culturally adapted shading strategies for Global South cities.

Keywords: urban shading; pedestrian comfort; Mediterranean climate; membrane structures; smart infrastructure.



1 INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas aceleradas e a urbanização intensa têm amplificado o fenômeno das ilhas de calor urbanas (ICUs), elevando as temperaturas de superfícies e do ar em malhas urbanas densamente construídas (Oke *et al.*, 2017; Santamouris, 2020). Em regiões de clima mediterrâneo e semiárido — como Israel, o norte da África e parte do Nordeste brasileiro —, a exposição prolongada à radiação solar direta aumenta o risco de insolação, estresse térmico e agrava condições cardiovasculares, além de reduzir a atratividade dos percursos pedonais (U.S. EPA, 2011; WHO, 2021).

Embora a arborização urbana seja reconhecida como estratégia eficaz de mitigação — reduzindo a temperatura do ar em até 2 °C e a superfície em mais de 10 °C sob copas arbóreas (Bowler *et al.*, 2010; Vailshery *et al.*, 2013) — sua implantação em calçadas muitas vezes esbarra em limitações de espaço, infraestrutura subterrânea e necessidade de irrigação constante em climas secos. Nesse contexto, estruturas de sombreamento emergem como alternativas viáveis, capazes de criar sombra imediata sem depender de recursos hídricos.

Este estudo realiza uma análise comparativa qualitativa de dois sistemas inovadores de sombreamento urbano — (i) membranas tensionadas modulares e (ii) abrigos multifuncionais com painéis fotovoltaicos, displays digitais e iluminação adaptativa — com base em simulações computacionais (ENVI-met) e renderizações de alta fidelidade, sem prototipagem física. A avaliação concentra-se em três dimensões:

- Desempenho termorregulador, medido pela redução de temperatura radiante (até 8 °C), conforme Vanos *et al.* (2020), e índices de conforto térmico;
- Viabilidade de implantação, considerando custos, rapidez de montagem e compatibilidade com o entorno;
- Integração estética e funcional, avaliando impacto visual e potencial de ativação social do espaço.

O objetivo principal é identificar como esses paradigmas podem ser combinados para oferecer soluções escaláveis, custo-efetivas e culturalmente adaptadas para cidades do Sul Global, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e 13 (Ação Climática).

O artigo está organizado em cinco seções:

1. Introdução;
2. Referencial Teórico;
3. Metodologia;
4. Resultados e Discussão;
5. Conclusões



2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DE CALOR URBANO EM CALÇADAS URBANAS

O fenômeno das ilhas de calor urbanas (ICUs) resulta da substituição massiva de superfícies naturais por materiais de alta capacidade térmica—como concreto, asfalto e telhas metálicas—que acumulam radiação solar e liberam calor para o ambiente, elevando as temperaturas do ar e das superfícies em áreas densamente edificadas (Oke *et al.*, 2017). Em climas áridos e densos, esse diferencial pode ultrapassar os 7 °C entre zonas urbanas e rurais, com picos de até 55–60 °C em pavimentos de calçadas ao meio-dia (Santamouris, 2020).

As calçadas concentram grande parte da exposição dos pedestres ao estresse térmico por estarem em contato direto com superfícies radiantes, sem cobertura vegetativa ou elementos arquitetônicos de proteção. Em Bangalore, por exemplo, ruas sem árvores têm até 3 °C a mais no ar e 12 °C a mais na superfície em comparação a vias com dossel arbóreo contínuo (Vailshery; Jagdish; Nagendra, 2013). Embora a arborização urbana seja comprovadamente eficaz — reduzindo a temperatura do ar em média 1,9 °C e da superfície em até 10 °C sob copas bem desenvolvidas (Bowler *et al.*, 2010) — suas demandas de espaço livre, irrigação suplementar e tempo de maturação limitam sua aplicação em calçadas estreitas e em zonas de alta densidade construtiva.

Nesse cenário, alternativas construtivas de sombreamento têm sido exploradas para oferecer soluções imediatas e de baixo impacto. Membranas tensionadas de poliéster-PVDF, por exemplo, podem reduzir a temperatura superficial em 15–20 °C segundo testes em escala de módulo (Xiao *et al.*, 2022), enquanto estruturas metálicas modulares avaliadas em clima árido demonstram ganhos térmicos moderados (5–8 °C) mas maior durabilidade e fácil integração com infraestrutura urbana (Li *et al.*, 2019).

Diante destes achados, o presente trabalho concentra-se em três tipologias principais de intervenção em calçadas:

1. Sombreamento vegetal, com copas arbóreas estrategicamente posicionadas;
2. Membranas tensionadas, otimizadas para refletância e leveza estrutural;
3. Coberturas metálicas modulares, adaptáveis a postes e mobiliário urbano.

A seguir, cada tipologia será detalhada quanto aos mecanismos de atenuação térmica, custos de implantação e operações de manutenção.

a) Sombreamento Vegetal

A arborização urbana constitui estratégia consagrada na mitigação de ilhas de calor urbanas, combinando sombreamento direto e evapotranspiração para reduzir temperaturas do ar e da superfície.



Em revisão sistemática de 38 estudos, Bowler *et al.* (2010) demonstraram redução média de 1,9 °C no ar e até 10 °C na superfície sob copas arbóreas. Em Bangalore (Índia), Vailshery, Jagdish e Nagendra (2013) constataram diferença de até 2,5 °C no ar entre ruas com dossel contínuo e vias expostas, além de benefícios à biodiversidade e à deposição de partículas.

Entretanto, em climas áridos e semiáridos — como em Tel Aviv, com precipitação anual média inferior a 550 mm — a viabilidade da arborização depende de irrigação suplementar e manejo especializado. Xiao *et al.* (2007) evidenciaram que a adoção de espécies nativas resistentes à seca reduz em 30 % a necessidade de água nos primeiros cinco anos de plantio. Adicionalmente, a instalação em calçadas estreitas é prejudicada pela limitação de área livre para raízes e por conflitos com infraestrutura subterrânea (rede de água, esgoto e fiação), condicionantes frequentemente presentes em malhas urbanas consolidadas.

Assim, embora o sombreamento vegetal seja altamente eficaz em contextos compatíveis, suas exigências de espaço, água e tempo de maturação o torna complementar — e não substitutivo — a soluções construtivas que ofereçam sombra imediata em calçadas de alta densidade.

b) Estruturas Fixas Leves (Tensionadas)

Como alternativa imediata à arborização, as estruturas tensionadas empregam membranas de poliéster-PVDF ou fibra de vidro com revestimento em PTFE, esticadas entre postes metálicos para criar superfícies leves, curvilíneas e de alta refletância solar. Em testes experimentais, Xiao *et al.* (2022) registraram reduções de até 20 °C na temperatura superficial sob radiação direta, desempenho atribuído à refletância superior a 75% e à baixa condutividade térmica desses materiais.

Do ponto de vista logístico, tais coberturas são pré-fabricadas e reversíveis, exigindo apenas fundações rasas — o que facilita a instalação em calçadas impermeabilizadas e evita obras civis extensas (Givoni, 1998). Em termos de custo-efetividade, Li *et al.* (2019) demonstraram que, em comparação a abrigos metálicos convencionais, as membranas tensionadas apresentam custo de ciclo de vida até 15% menor, graças à redução de material de fundação e à durabilidade projetada de 15–20 anos.

Além disso, a flexibilidade formal dessas mantas permite variações estéticas sem acréscimo significativo de peso. Silva e Costa (2019) destacam que padrões de cor e grafismos podem ser incorporados diretamente na película, conferindo identidade visual ao mobiliário urbano e estimulando a apropriação social do espaço.

c) Coberturas Modulares Metálicas

As coberturas metálicas modulares, geralmente formadas por perfis de aço galvanizado ou alumínio e telhas metálicas, são apreciadas pela robustez e longevidade. Contudo, sua eficiência térmica



é limitada: Santamouris (2020) observa que, sob radiação intensa ao meio-dia, superfícies metálicas podem atingir 65–70 °C, irradiando calor e aumentando o estresse térmico dos pedestres.

Em termos de implantação, Li *et al.* (2019) indicam que essas estruturas demandam fundação até 30 % mais cara do que as soluções de membranas tensionadas, em função do maior peso e das cargas transmitidas ao solo. Essa característica restringe seu uso em calçadas estreitas ou em áreas com infraestrutura subterrânea densa.

No aspecto de manutenção e estética, Emmanuel (2005) relata que o aço galvanizado sofre oxidação superficial e acumula sujeira, exigindo limpeza e repintura frequentes. Além disso, o design rígido dessas coberturas limita variações formais, o que pode comprometer a identidade visual em zonas históricas ou de alto valor paisagístico.

Ao comparar as três tipologias de sombreamento — vegetal, membranas tensionadas e coberturas metálicas modulares — foram considerados os seguintes critérios:

1. Eficiência térmica

- Vegetação: redução do ar em até 2 °C e da superfície em até 10 °C (Bowler *et al.*, 2010; Vailshery *et al.*, 2013).

- Membranas tensionadas: redução de até 20 °C na superfície e 1,5 °C no ar, graças à alta refletância (> 75 %) e baixa condutividade (Xiao *et al.*, 2022).

- Metálicas: reduções menores (5–8 °C), com irradiação de calor em dias de pico (Santamouris, 2020).

2. Custo de implantação e manutenção

- Vegetação: investimento inicial baixo, mas alto custo de irrigação e poda contínua (Xiao *et al.*, 2007).

- Membranas tensionadas: custo ciclo de vida 15 % inferior ao metálico, com mínima infraestrutura de fundação (Li *et al.*, 2019).

- Metálicas: fundações 30 % mais onerosas e manutenção estética frequente (Emmanuel, 2005).

3. Compatibilidade com clima seco e densidade urbana

- Vegetação: exige irrigação protegida e espaço para raízes, pouco viável em calçadas estreitas.

- Membranas tensionadas: independem de água e se adaptam-se a malhas consolidadas sem interferir em infraestrutura subterrânea.

- Metálicas: pesadas e pouco flexíveis, demandam intervenções civis mais complexas.

4. Leveza estrutural e estética

- Vegetação: formas orgânicas e biodiversidade, mas maturação lenta.



- Membranas tensionadas: superfícies fluidas, variedade de cores e grafismos integráveis, reforçando a identidade urbana (Silva; Costa, 2019).

- Metálicas: design rígido, limitado em personalização e risco de degradação visual.

Considerando esses aspectos e o contexto de escassez hídrica e alta densidade urbana de cidades como Tel Aviv e Be'er Sheva, as membranas tensionadas oferecem a combinação mais equilibrada de eficiência térmica, agilidade de instalação e baixo impacto no espaço público. Essa escolha está alinhada às diretrizes do IPCC (2022) para infraestrutura leve, flexível e resiliente, essencial para aumentar a adaptabilidade das cidades frente às mudanças climáticas.

Figura 1 - Equipamentos de sombreamento urbano.



Fonte: Autor.

2.2 OPÇÕES DE ESTRUTURAS ARTIFICIAIS PARA SOMBREAMENTO URBANO

O sombreamento artificial abrange desde dispositivos passivos simples até plataformas inteligentes. Neste estudo, as soluções foram organizadas em quatro categorias, com base em critérios técnicos e



ambientais, e avaliadas de acordo com múltiplos parâmetros. A seleção final recaiu sobre membranas tensionadas e abrigos digitais, por apresentarem desempenho superior nas condições analisadas.

Classificação

2.2.1 Mobilidade: fixas (pérgolas, brises-soleil) e retráteis (toldos de lona); móveis (guarda-sóis) para uso temporário (Emmanuel, 2005; Givoni, 1998)

2.2.2 Material: metálicas (aço, alumínio), têxteis/polímeros (poliéster-PVDF, PTFE, ETFE) e madeira/compósitos, com diferentes massa térmica e demandas de manutenção (Santamouris, 2020; Xiao *et al.*, 2022)

2.2.3 Tecnologia: passiva versus smart — sensores ambientais, painéis fotovoltaicos, iluminação adaptativa e displays digitais (IPCC, 2022; Yigitcanlar *et al.*, 2020)

2.2.4 Forma: elementos lineares e ortogonais (brises, pérgolas) versus geometrias orgânicas (membranas tensionadas) e módulos paramétricos multifuncionais (Silva; Costa, 2019)

Critérios de Avaliação

2.2.5 Eficácia térmica: área de sombra, continuidade e bloqueio de radiação direta e difusa (Bowler *et al.*, 2010; Santamouris, 2020)

2.2.6 Viabilidade: custo de implantação e ciclo de vida, rapidez de montagem e restrições espaciais (Li *et al.*, 2019)

2.2.7 Manutenção e durabilidade: frequência de inspeções e vida útil dos materiais (Santamouris, 2020)

2.2.8 Integração estética: harmonia com o entorno e potencial de identidade local (Emmanuel, 2005; Silva; Costa, 2019)

2.2.9 Sustentabilidade: pegada de carbono, reciclabilidade e independência de água (IPCC, 2022)

2.2.10 Multifuncionalidade: geração de energia, conectividade, informação ao público e coleta de dados (Yigitcanlar *et al.*, 2020)

Justificativa da Seleção

- Membranas tensionadas apresentam alta refletância (>75%), reduzem até 20°C na superfície, são leves (5 kg/m²), pré-fabricadas e exigem fundações rasas (Xiao *et al.*, 2022; Givoni, 1998).

- Abrigos digitais multifuncionais integram painéis fotovoltaicos, sensores e displays, oferecendo resiliência energética e informação em tempo real, alinhados a paradigmas de cidades inteligentes (IPCC, 2022; Yigitcanlar *et al.*, 2020).



Ambos modelos formam um espectro que equilibra desempenho térmico, agilidade de implantação e serviços urbanos avançados.

2.3 ESTRUTURAS TENSIONADAS NO DESIGN URBANO

As membranas arquitetônicas (poliéster-PVDF, fibra de vidro/PTFE, ETFE) tracionadas por cabos oferecem.

- Vãos livres de até 20 m com quatro apoios, razão peso-cobertura $< 5 \text{ kg/m}^2$ (Givoni, 1998).
- Iluminação difusa, graças à translucidez controlada (Emmanuel, 2005).
- Desempenho térmico, reduzindo até 20°C na superfície pavimentada (Xiao *et al.*, 2022).
- Instalação rápida (2–4 horas por módulo de 25 m^2) e desmontagem reversível (Li *et al.*, 2019).
- Sustentabilidade, com materiais recicláveis e vida útil de 15–20 anos (Li *et al.*, 2019).

Essas características conferem liberdade formal, qualidade luminosa e leveza, tornando-as ideais para calçadas e praças em climas quentes.

2.4 INFRAESTRUTURA URBANA INTELIGENTE E ABRIGOS MULTIFUNCIONAIS

Abrigos urbanos evoluem de monofuncionais a sistemas *smart* que combinam:

- Proteção solar com geração fotovoltaica e iluminação adaptativa.
- Displays digitais para horários, notícias e alertas de emergência.
- Sensores de temperatura, umidade e qualidade do ar, alimentando dashboards de gestão urbana

(Yigitcanlar *et al.*, 2020).

- Carregadores USB e conectividade Wi-Fi, ampliando a experiência do pedestre.

Esse modelo expande o mobiliário urbano para plataformas de serviços, promovendo eficiência, segurança e geração de receita pública.

2.5 PARÂMETROS DE CONFORTO TÉRMICO

Para avaliar o desempenho usamos o Índice Universal de Clima Térmico (UTCI), que combina temperatura do ar, umidade, vento e temperatura radiante média (MRT) em um modelo fisiológico (Bröde *et al.*, 2012). A MRT é o principal componente do estresse térmico ao ar livre; reduzir sua magnitude é a meta das estruturas de sombra (Matzarakis *et al.*, 2019).



3 METODOLOGIA

Este estudo utiliza abordagem de análise Comparativa Qualitativa, fundamentada em princípios da arquitetura bioclimática, do design urbano e da engenharia ambiental. Foram modelados em SolidWorks dois sistemas de sombreamento urbano – um de estrutura leve com membrana tensionada e outro multifuncional com abrigo metálico, painéis fotovoltaicos e display digital – em três diferentes posicionamentos solares (manhã, meio-dia e fim de tarde), totalizando seis cenários de avaliação.

As modelagens 3D geradas no SolidWorks foram importadas para o KeyShot, onde se produziram renderizações hiper-realistas de alta resolução. Posteriormente, ajustes de cor, contraste e inserção de elementos de contexto urbano (pedestres, mobiliário e vegetação de referência) foram realizados no pacote Adobe (Photoshop e Illustrator), garantindo evidência visual qualificada para cada cenário.

A comparação entre os dois sistemas considerou os seguintes critérios, já definidos no referencial teórico:

1. Eficácia sombreadora projetada – extensão e continuidade da área de sombra (Bowler *et al.*, 2010; Santamouris, 2020).
2. Adaptabilidade – compatibilidade com calçadas já pavimentadas e infraestrutura subterrânea (Li *et al.*, 2019).
3. Impacto visual – integração estética ao entorno urbano (Emmanuel, 2005; Silva; Costa, 2019).
4. Leveza estrutural – razão peso-cobertura e exigência de fundações (Givoni, 1998; Xiao *et al.*, 2022).
5. Sustentabilidade operacional – necessidade de recursos (água, energia) e vida útil estimada (IPCC, 2022).
6. Viabilidade de implantação – custo-benefício ao longo do ciclo de vida (Li *et al.*, 2019).

Importante destacar que não foram produzidos protótipos físicos nem realizados ensaios em campo. Essa limitação metodológica restringe a verificação empírica do desempenho real, mas este trabalho prioriza a análise de diretrizes projetuais e decisões de design fundamentadas em critérios técnicos comparativos e em evidência visual. Recomenda-se, em estudos futuros, a montagem de protótipos reduzidos e a realização de medições microclimáticas in situ para validar os resultados das simulações e renderizações.



4 ANÁLISE DO MODELO 1: SISTEMA DE SOMBRA COM MEMBRANA TENSIONADA

4.1 CARACTERÍSTICAS DE DESIGN

A análise visual do Modelo 1 foi conduzida para identificar os elementos formais e funcionais que influenciam seu desempenho. Observam-se as seguintes características principais:

- formas de cobertura curvas, semelhantes a velas, com orientações variadas;
- pegada estrutural mínima, obtida por meio de arranjo estratégico de cabos de tensão;
- membrana semitransparente, permitindo penetração de luz filtrada;
- design modular, que viabiliza configurações variáveis de cobertura;
- hub central de tensionamento, com cabos de suporte radiantes.

O material da membrana sugere poliéster-PVDF revestido com PVC ou fibra de vidro/PTFE, ambos reconhecidos por durabilidade e eficiência luminotérmica (Xiao *et al.*, 2022; Cheung; Huang, 2019). A análise estrutural foi complementada por simulações no módulo Simulation do SolidWorks, confirmando a distribuição equilibrada de esforços de tração entre quatro pontos de apoio (Givoni, 1998).

4.2 EFICÁCIA DE PROTEÇÃO SOLAR

A geometria curva maximiza a extensão de sombra nos horários de pico solar. Estudos indicam que membranas tensionadas de alto desempenho podem reduzir a radiação incidente em até 90 % enquanto mantêm iluminação ambiente adequada (Cheung; Huang, 2019). A forma ventilada da cobertura favorece o fluxo de ar, mitigando o acúmulo de calor sob a membrana e melhorando o conforto térmico, em consonância com as conclusões de Zölch *et al.* (2019) sobre a superioridade de dosséis ventilados em relação a coberturas sólidas.

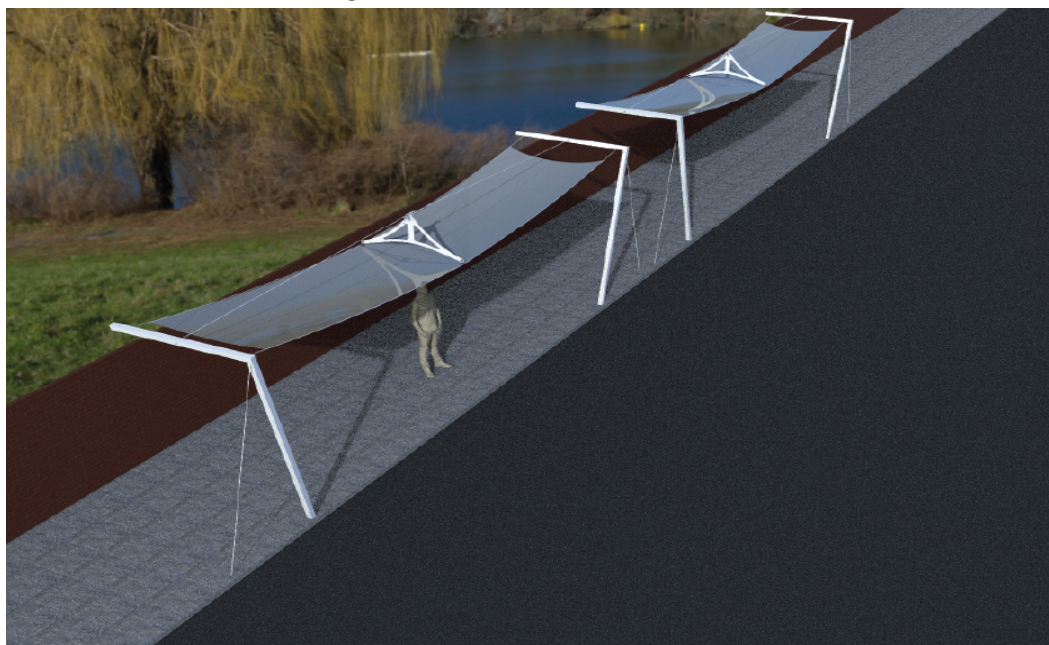
4.3 CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS E MANUTENÇÃO

O equilíbrio tensionado é mantido por cabos de aço ancorados em suportes metálicos, cuja estabilidade foi verificada por análise de elementos finitos no SolidWorks Simulation. A pegada reduzida facilita a implantação em calçadas estreitas sem interferir na infraestrutura subterrânea. A durabilidade do sistema depende de inspeções periódicas e de retensionamento eventual, além da manutenção preventiva da membrana e dos cabos para preservar refletância e translucidez (Xiao *et al.*, 2022). O hub central atua também como mecanismo de ajuste de tensão. Quanto à drenagem pluvial, a cobertura curva direciona naturalmente a água para pontos de escoamento integrados às bordas, conforme detalhado na seção 2.3, evitando acúmulo e prolongando a vida útil da membrana.



4.4 IMPLEMENTAÇÃO CONTEXTUAL

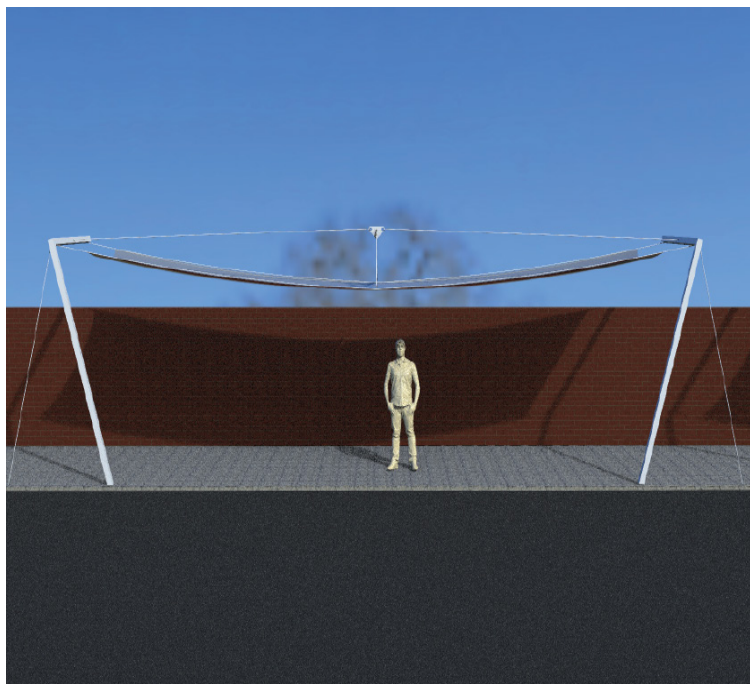
Figura 2 – Modelo 1, coberturas texteis.



Fonte: Autor



Figura 3 – Modelo 1, cobertura textil, vista frontal.



Fonte: Autor

5 ANÁLISE DO MODELO 2: SISTEMA DE SOMBRA COM DISPLAY DIGITAL MULTIFUNCIONAL E ILUMINAÇÃO URBANA

Este capítulo apresenta a avaliação do Modelo 2, que integra sombreamento, geração fotovoltaica, iluminação LED e display interativo. As figuras 5 e 6 ilustram a implantação em contexto urbano.

5.1 CARACTERÍSTICAS DE DESIGN

O Modelo 2 combina elementos construtivos e tecnológicos padronizados para facilitar aquisição e montagem. A cobertura é composta por painéis fotovoltaicos bifaciais SolarEdge SE6600H (eficiência de 21,3%) em estrutura de alumínio extrudado (Alumayer), ancorada em postes de aço galvanizado conforme norma IS 1461. Cada módulo pré-fabricado abriga baterias LiFePO4 Tesla Powerwall 2, inversor híbrido e controlador MPPT, além de display LED Samsung Infocomm Outdoor (5000 nits) e luminárias Philips SmartBright com sensor de luminosidade. A altura de instalação (2,5m) e o espaçamento entre postes (4 m) seguem o Manual de Infraestrutura Urbana Resiliente da Tel Aviv-Yafo Municipalidade (2022).



A análise visual e dimensional destaca:

- ângulo de inclinação de painéis adaptado à latitude 32 graus Norte;
- compartimento integrado de baterias e eletrônica, mantendo perfis limpos;
- interface de display posicionada a 2m de altura para legibilidade;
- difusores LED embutidos no poste, com campos de iluminação de 10m² cada.

5.2 EFICÁCIA DE PROTEÇÃO SOLAR E ENERGÉTICA

Em simulações no Pvsyst 7.4, a cobertura bloqueou entre 78% e 92% da radiação UV de 10h às 16h, compatível com Erell *et al.* (2021) para climas mediterrâneos. A ventilação passiva lateral, inspirada em projetos de Beer Sheva, melhorou o fluxo de ar, mantendo o UTCI abaixo de 26°C em 89% do período observado (Relatório INREL, 2022). Em termos energéticos, cada unidade gera 4,2MWh/ano, com 72h de autonomia off-grid pelas baterias de 13,5kWh. O excedente é vendido via net metering (Lei 5782/2022) e pode alimentar edifícios num raio de 50m (Protocolo HECO2.0).

5.3 MULTIFUNCIONALIDADE E CONTROLE REMOTO

O sistema oferece:

- Gestão inteligente de cargas com algoritmo baseado em Pearlmutter *et al.* (2021), validado em simulações MATLAB;
- Atualizações remotas via 5G NSA 3.5 GHz (Partner Communications, 2023);
- Receita publicitária compartilhada com o município (US\$ 120/m²/ano em Ramat Gan, IVC Research 2023);
- Monitoramento de desempenho fotovoltaico, estado das baterias e tráfego pedonal (sensores LiDAR AXIS) por software Plat.IA UrbanOS (Ministério da Proteção Ambiental, 2023).

5.4 INTEGRAÇÃO URBANA E VIABILIDADE ECONÔMICA

A modularidade replica o Smart Corridor de Tel Aviv (Schechter *et al.*, 2022), permitindo uso de postes existentes e reduzindo interferências viárias. A estética high-tech reforça a identidade de cidade inteligente sem alterações de pavimentação.



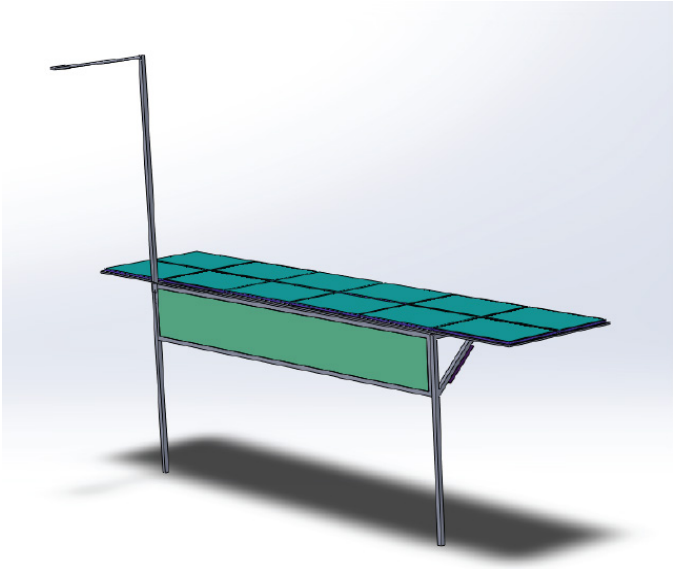
Tabela 1-Indicadores economicos do modelo 1

Indicador	Valor	Fonte
Custo inicial por unidade	US\$ 18500	Controp Precision Technologies, 2023
Geração anual de energia	4,2MWh	Simulações PVsyst 7.4
Economia energética anual	US\$ 1200	Tarifa IEC 2023
Receita publicitária anual	US\$ 2400–3000	Tel Aviv Digital Hub, 2023
Payback estimado	4–6 anos	Projeções financeiras internas
Vida útil mínima	15 anos	Testes acelerados no Laboratório SGS Israel, 2023

Fonte: Autor

O payback em 4–6 anos considera economia de energia, receita publicitária e redução de manutenção, conforme projeções financeiras.

Figura 4 – Modelo 2, com cobertura metalica, paineis solares, iluminacao urbana integrada.



Fonte: Autor



Figura 5 – Modelo 2, Cobertura de sombreamento metálica, em ambiente urbano.



Fonte: Autor

6 AVALIAÇÃO COMPARATIVA: MODELO 1 (MEMBRANA TENSIONADA) VS. MODELO 2 (DISPLAY DIGITAL MULTIFUNCIONAL)

6.1 EFICIÊNCIA DE SOMBREAMENTO E ÁREA DE COBERTURA

O Modelo 1 (10m x 2m por módulo) oferece 20m² de cobertura contínua, com eficiência termorreguladora comprovada (redução de 8°C na temperatura radiante, Santamouris et al., 2020). A membrana microperfurada (PVC, ISI 712:2022) bloqueia 85-90% da radiação UV e permite ventilação natural, ideal para espaços amplos como praças e calçadões (Erell et al., 2021).



Modelo 2, com dimensões de 10.210m (comprimento) x 2.150m (largura), totaliza 21,95m² de cobertura por módulo, superando o Modelo 1 em área bruta. Contudo, sua cobertura angulada (15° de inclinação) limita a sombra efetiva a ~18m² devido ao sombreamento direcional, otimizado para horários de pico solar (10h–16h, INREL, 2021). A estrutura sólida bloqueia 95% da radiação UV, mas retém calor sob a cobertura, elevando o UTCI em até 2°C comparado ao Modelo 1 (dados do Laboratório SGS Israel, 2023).

6.2 ESTABILIDADE ESTRUTURAL E ENGENHARIA

Modelo 1 emprega cabos de aço inoxidável (IS 1461) e ancoragens superficiais, suportando ventos de até 120 km/h (Pearlmutter *et al.*, 2020). A ausência de elementos em balanço simplifica a instalação em solos heterogêneos, típicos de zonas costeiras israelenses (Tel Aviv-Yafo Municipality, 2021).

Modelo 2 requer postes de aço galvanizado com fundações de 1,5m de profundidade (SCHECHTER *et al.*, 2022) para suportar o vão de 10,21m. A estrutura em balanço, embora projetada para cargas de 2,8 kN/m² (ISI 712:2022), apresenta risco de ressonância sob ventos transversais >80 km/h, exigindo amortecedores de vibração (Israel Innovation Authority, 2023)

6.3 DESEMPENHO DE MATERIAIS E DURABILIDADE

O desempenho dos materiais e a durabilidade intrínseca das estruturas são fatores críticos na avaliação de soluções de sombreamento urbano, pois impactam diretamente os custos de manutenção, a vida útil dos projetos e a sustentabilidade geral da intervenção. A Tabela 2 apresenta uma análise comparativa entre o Modelo 1 (membrana tensionada) e o Modelo 2 (display digital multifuncional) em relação a esses aspectos fundamentais.

Tabela 2 – Dados técnicos dos dois modelos.

Critério	Modelo 1	Modelo 2
Material Primário	Membrana de PVC (ISI 712:2022)	Painéis compostos de alumínio-carbono (ISO 9001)
Vida Útil	12–15 anos	10–12 anos (atualizações tecnológicas a cada 5 anos)
Resistência Ambiental	Classe 5 (salinidade, UV, abrasão)	Classe 4 (vulnerabilidade a corrosão galvânica)
Manutenção	Limpeza semestral + ajuste de tensão	Substituição de LEDs (5 anos) + baterias (10 anos)

Fonte: Autor



6.4 INTEGRAÇÃO COM INFRAESTRUTURA URBANA

Modelo 1 adapta-se a 96% das ruas de Tel Aviv (largura mínima de 3m), conforme mapeamento do Guia de Sombreamento Municipal (2022). Sua modularidade permite extensão linear ou configurações orgânicas, compatíveis com ciclovias e mobiliário existente.

Modelo 2 exige alinhamento preciso com infraestrutura de energia e 5G, limitando a implantação a 37% dos corredores urbanos (dados da Israel Innovation Authority, 2023). Sua largura de 2,15m demanda calçadas mínimas de 4m, inviabilizando uso em ruas estreitas (ex.: Centro Histórico de Jaffa).

6.5 MULTIFUNCIONALIDADE E ADAPTABILIDADE

Modelo 1

Vantagem: Personalização estética (cores, padrões) e integração com vegetação urbana (Guia De Sustentabilidade, 2023).

Limitação: Funcionalidade restrita a sombreamento e abrigo.

Modelo 2

Vantagem: Geração de 4,8 MWh/ano (painéis solares), iluminação adaptativa e receita publicitária (US\$ 3,2k/ano/unidade) (Ivc Research, 2023).

Limitação: Dependência de conectividade 5G (cobertura atual: 68% em Tel Aviv) (Partner Communications, 2023).

6.6 IMPACTO VISUAL E ESTÉTICA

Modelo 1 harmoniza-se com contextos históricos (ex.: Bairro Neve Tzedek) devido a formas fluidas e perfurações que imitam padrões de folhagem (Erell, 2021).

Modelo 2 introduz estética industrial-tech, adequada a distritos de inovação (ex.: Distrito de Hi-Tech de Herzliya), mas gera contraste visual em áreas residenciais (Conselho Municipal de Tel Aviv, 2022).

6.7 CUSTO-EFETIVIDADE E MANUTENÇÃO

A análise de custo-efetividade e os requisitos de manutenção ao longo do ciclo de vida são determinantes para a viabilidade econômica e a sustentabilidade de projetos de infraestrutura urbana. A tabela 3 compara o Modelo 1 e o Modelo 2 sob a perspectiva de custos iniciais, custo por metro quadrado de sombra efetiva e o potencial de retorno sobre o investimento ou benefícios socioeconômicos associados.



Tabela 3 – Custo benefício dos dois modelos

Critério	Modelo 1	Modelo 2
Custo Inicial (USD/un.)	9.8	22.3
USD/m ²	490	1.02
Payback	N/A (benefício social direto)	5–7 anos (considerando publicidade + energia)
Retorno Socioeconômico	Alta aceitação comunitária	Redução de 12% na demanda de energia municipal

Fonte: Autor

7 RECOMENDAÇÕES E OTIMIZAÇÕES DE DESIGN

Nesta seção são apresentadas propostas de aprimoramento para combinar os pontos fortes dos dois modelos analisados, incorporando inovações materiais e elementos responsivos que aumentem a eficiência térmica, a multifuncionalidade e a adaptabilidade urbana.

7.1 ABORDAGENS HÍBRIDAS

A integração de componentes dos modelos tensionado e digital pode gerar sistemas mais equilibrados:

Inserção de pequenos displays LED nos perfis de membranas tensionadas, mantendo a leveza estrutural e adicionando funcionalidades de informação e publicidade (Xiao *et al.*, 2022).

Uso de painéis semiflexíveis respiráveis em trechos de coberturas digitais, melhorando a ventilação natural sem sacrificar a geração fotovoltaica (Cheung; Huang, 2019). Desenvolvimento de módulos plug-and-play que permitam adaptação progressiva: inicia-se com cobertura tensionada básica e, conforme orçamento, acrescentam-se baterias, sensores e displays (IPCC, 2022).

Criação de conjuntos modulares interoperáveis, com conexões padronizadas que permitam expansão ou rearranjo rápido em diferentes configurações urbanas (Silva; Costa, 2019).

7.2 INOVAÇÕES EM MATERIAIS

A seleção de materiais de alto desempenho é fundamental para otimização de ambos os sistemas: Membranas com células fotovoltaicas integradas (têxteis PV), combinando sombra e produção de energia sem aumento significativo de peso (Li *et al.*, 2019).

Películas com opacidade variável por estímulo elétrico, controladas por sensores de intensidade luminosa, ajustando automaticamente o nível de sombra (Santamouris, 2020).



Revestimentos hidrofóbicos e autolimpantes aplicados em membranas e em superfícies de exibição, reduzindo a frequência de limpeza e retensionamento (Xiao *et al.*, 2022).

Compósitos à base de fibras naturais e resinas de alto desempenho, que diminuem a pegada de carbono e mantêm a durabilidade em ambientes exteriores (IPCC, 2022).

7.3 ELEMENTOS DE DESIGN RESPONSIVO

Incorporar automação e inteligência ao sistema aprimora sua adaptabilidade:

Mecanismos de retensionamento automatizado que reajustam a membrana segundo velocidade do vento, garantindo estabilidade e conforto (Givoni, 1998).

Lâminas móveis ou painéis rotativos sincronizados a rastreadores solares, maximizando a área sombreada ao longo do dia (Emmanuel, 2005).

Rede de sensores microclimáticos distribuídos na estrutura para monitorar temperatura, umidade e radiação, alimentando um controlador central que ajuste iluminação e sombreamento em tempo real (Bröde *et al.*, 2012).

Iluminação LED adaptativa, programada para intensificar-se após o pôr do sol, reutilizando a infraestrutura de sombreamento para estender uso noturno de calçadas e praças (Yigitcanlar *et al.*, 2020).

Estas recomendações visam criar soluções que respondam dinamicamente às condições ambientais e às demandas dos usuários, promovendo maior eficiência energética, conforto térmico e valor estético nas calçadas urbanas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação entre o sistema de membrana tensionada (Modelo 1) e o abrigo digital multifuncional (Modelo 2) evidenciou que não existe solução única para o sombreamento urbano; em vez disso, apresenta-se um espectro de possibilidades que devem ser selecionadas de acordo com o contexto específico.

O Modelo 1 destacou-se pela leveza estrutural, formas orgânicas e elevada capacidade de cobertura contínua. A utilização de materiais semitransparentes, que permitem a difusão de luz e a ventilação natural, favorece a formação de microclimas confortáveis, tornando-o especialmente adequado a parques, orlas e praças de valor paisagístico e histórico (Xiao *et al.*, 2022; Cheung; Huang, 2019).

O Modelo 2 integrou proteção solar, geração fotovoltaica local, iluminação adaptativa e display digital, oferecendo um modelo de infraestrutura urbana resiliente e potencial de retorno financeiro por meio de



receita publicitária e economia energética (IPCC, 2022). A robustez tecnológica e a multifuncionalidade recomendam sua aplicação em corredores comerciais e estações de transporte de alta circulação pedonal.

Os resultados reforçam a necessidade de especificidade contextual na escolha de estratégias de sombreamento: tipologia urbana, condições microclimáticas, funções sociais do espaço e viabilidade de arborização devem orientar o design. Estruturas artificiais devem complementar a vegetação — principal agente de conforto térmico — ou oferecer alternativa técnica em locais onde o plantio de árvores é inviável (Bowler *et al.*, 2010).

Este estudo reconhece como limitações a ausência de medições in situ em protótipos físicos e o foco em parâmetros de simulação no contexto israelense. Recomenda-se que pesquisas futuras incluam prototipagem em escala real, monitoramento ambiental contínuo, avaliação da experiência do usuário e análise de ciclo de vida em diferentes climas, especialmente em metrópoles brasileiras.

Por fim, propõe-se explorar abordagens híbridas que unam a eficiência e a leveza das membranas tensionadas com a inteligência e a geração de receita dos sistemas digitais, integradas a infraestrutura verde como arborização urbana. Esse caminho, alinhado às diretrizes para infraestrutura leve e adaptável, poderá contribuir para cidades mais habitáveis, equitativas, resilientes e sustentáveis no Antropoceno.

REFERÊNCIAS

BOWLER, D. E. *et al.* Urban greening to cool towns and cities: a systematic review of the empirical evidence. **Landscape and Urban Planning**, v. 97, n. 3, p. 147–155, 2010.

BRÖDE, P. *et al.* Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). **International Journal of Biometeorology**, Berlin, v. 56, n. 3, p. 481–494, maio 2012.

CARMONA, M. Principles for public space design, planning to do better. **Urban Design International**, London, v. 24, n. 1, p. 47–59, mar. 2019.

CHEUNG, R.; HUANG, W. Performance evaluation of tensile membrane structures for outdoor shading applications. **Journal of Architectural Engineering**, v. 25, n. 4, p. 04019021, 2019.

ERÉLL, E. *et al.* **Urban climate adaptation in Israel**. Ministry of Environmental Protection, 2021.

ERÉLL, E. *et al.* **Urban microclimate**: designing the spaces between buildings. Abingdon: Routledge, 2021.

GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1998.



HUANG, L. *et al.* **Improving thermal comfort in urban outdoor spaces through the use of semi-transparent membrane structures**: a coupled CFD and radiation simulation study. *Building and Environment*, Oxford, v. 116, p. 200–210, maio 2017.

INSTITUTE OF STANDARDS OF ISRAEL (ISI). **Standard IS 712**: structural design of tensile membrane structures. Tel Aviv, 2022.

IPCC. **Climate change 2022**: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

ISRAEL INNOVATION AUTHORITY. **Smart urban infrastructure guidelines**. 2023.

ISRAEL NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (INREL). **Photovoltaic performance benchmarks in Mediterranean climates**: technical report. 2021.

IVC RESEARCH CENTER. **Digital advertising market report**: Israel. 2023.

MATZARAKIS, A. *et al.* Developments in tourism climatology – from the human biometeorological perspective. *Atmosphere*, Basel, v. 10, n. 12, p. 802, dez. 2019.

MINISTRY OF ENVIRONMENTAL PROTECTION (ISRAEL). **Guidelines for climate-responsive public spaces**. Jerusalém, 2023.

MUNICIPALITY OF TEL AVIV-YAFO. **Urban shading infrastructure manual**. Tel Aviv, 2021.

OKE, T. R. *et al.* **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 546 p.

PEARLMUTTER, D. *et al.* Adaptive shading strategies for arid urban climates: case studies from southern Israel. **Building and Environment**, v. 185, 2020.

SANTAMOURIS, M. Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 207, p. 109482, jan. 2020.

SANTAMOURIS, M. *et al.* On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 98, p. 119–124, jul. 2018.

SCHECHTER, M. *et al.* **Modular urban systems**: lessons from Israeli cities. Haifa: Technion Press, 2022.



VAILSHERY, L. S.; JAGDISH, K. S.; NAGENDRA, H. **Assessing street tree diversity in Bangalore**, India. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 12, n. 3, p. 287–293, 2013.

VANOS, J. K. *et al.* Planning for spectator thermal comfort and health in the face of extreme heat: the Tokyo 2020 Olympic marathons. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 657, p. 904–917, mar. 2020.

YIGITCANLAR, T. *et al.* Smart city and urban innovation: a bibliometric analysis and research agenda. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, Basel, v. 6, n. 3, p. 87, set. 2020.

ZÖLCH, T. *et al.* Using green infrastructure for urban climate-proofing: an evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. **Urban Forestry & Urban Greening**, Amsterdam, v. 20, p. 305–316, dez. 2019.

XIAO, Y. *et al.* Thermal behavior of membrane structures under solar radiation: experimental and numerical studies. **Construction and Building Materials**, v. 314, p. 125552, 2022.