

Autorização concedida a Biblioteca Central da Universidade de Brasília pelo autor Thiago Montenegro Góes para disponibilizar a obra, gratuitamente, de acordo com a licença conforme permissões assinaladas, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da obra, a partir desta data.

A obra continua protegida por Direito Autoral e/ou por outras leis aplicáveis. Qualquer uso da obra que não o autorizado sob esta licença ou pela legislação autoral é proibido.

#### Referência

GÓES, Thiago Montenegro et al. Envoltórias verdes: o uso de ferramentas computacionais na análise ambiental. In: FERREIRA, Maurício Lamano (org). **Ferramentas ambientais aplicadas ao planejamento de cidades sustentáveis**: da geoconservação às adaptações às mudanças climáticas. Tupã: ANAP, 2020.

Maurício Lamano Ferreira



FERRAMENTAS AMBIENTAIS APLICADAS  
AO PLANEJAMENTO DE CIDADES SUSTENTÁVEIS

da geoconservação  
às adaptações às mudanças climáticas



Organizador

Maurício Lamano Ferreira

FERRAMENTAS AMBIENTAIS APLICADAS AO  
PLANEJAMENTO DE CIDADES SUSTENTÁVEIS  
da geoconservação às adaptações  
às mudanças climáticas

1ª Edição

ANAP  
Tupã/SP  
2020

**EDITORA ANAP****Associação Amigos da Natureza da Alta Paulista**

Pessoa de Direito Privado Sem Fins Lucrativos, fundada em 14 de setembro de 2003.

Rua Bolívia, nº 88, Jardim América, Cidade de Tupã, São Paulo. CEP 17.605-310.

Contato: (14) 99808-5947

[www.editoraanap.org.br](http://www.editoraanap.org.br)

[www.amigosdanatureza.org.br](http://www.amigosdanatureza.org.br)

[editora@amigosdanatureza.org.br](mailto:editora@amigosdanatureza.org.br)

Revisão Ortográfica - Smirna Cavalheiro

Foto capa - Rafael do Nascimento Lamano Ferreira

Arte final capa - Flavio Augusto Scoco de Abreu

## Ficha Catalográfica

F383f Ferramentas ambientais aplicadas ao planejamento de cidades sustentáveis: da geoconservação às adaptações às mudanças climáticas/ Maurício Lamano Ferreira (orgs). 1 ed. – Tupã: ANAP, 2020.

331 p; il.; 14.8 x 21cm

ISBN 978-65-86753-05-9

1. Ambiente 2. Cidade 3. Planejamento  
I. Título.

CDD: 333.72

CDU: 333.72-47

Índice para catálogo sistemático  
Brasil: Meio Ambiente; Conservação e Proteção

## ORGANIZADOR DA OBRA

### **Maurício Lamano Ferreira**

*Pós doutor pela Universidade de São Paulo (CENA/USP), Doutor em Ciências pela Universidade de São Paulo (CENA/USP), Mestre em Biodiversidade Vegetal e Meio Ambiente pelo Instituto de Botânica de São Paulo (IBT/SP), formado em Geociências pelo Instituto de Geociências da USP (IGc/USP) e também em Ciências Biológicas pela Universidade Mackenzie (UPM). Com grande interesse em questões ambientais, sua pesquisa tem dois focos principais, a saber: i) efeitos da poluição atmosférica em ecossistemas naturais e urbanos e ii) compreensão de padrões e processos ecológicos, com ênfase na ciclagem biogeoquímica, mudanças climáticas e conservação da natureza (Bio e Geo conservação). Dentre os principais temas de seus trabalhos e orientações encontram-se: Poluição Ambiental, Ecologia de Ecossistemas e Ecologia Isotópica, Ciclos Biogeoquímicos, Mudanças Climáticas, Adaptações às Mudanças Climáticas Baseadas em Ecossistemas (AbE), Nature-based Solutions (NbS) e Conservação da Natureza. Com experiência docente nos cursos de graduação em Ciências Biológicas, Engenharia Ambiental e Civil e Tecnologia em Gestão Ambiental, o docente conta com 52 orientações de TCC e mais de 60 supervisões em Iniciação Científica, demonstrando importante contribuição na formação de recursos humanos. Na pós-graduação 'Lato sensu', Maurício já atuou como professor e membro do Núcleo Docente Estruturante (NDE) do curso de Engenharia Ambiental. No 'Stricto sensu', o pesquisador conta com 7 orientações de mestrado e uma de doutorado, com dissertações e tese relacionadas à Ecologia de Florestas Urbanas e Poluição Atmosférica. Com uma rede internacional de colaboradores, o professor tem publicações em importantes periódicos científicos como SCIENCE e ENVIRONMENTAL RESEARCH, destacando a internacionalização da sua pesquisa científica. Pelo seu reconhecimento em ensino, pesquisa e extensão, Maurício foi premiado duas vezes como 'Professor 10' na Universidade Nove de Julho.*

## SUMÁRIO

<b>PREFÁCIO</b> .....	<b>11</b>
<i>Samuel Carvalho de Benedicto</i>	
<b>PARTE I</b>	
<b>ATRIBUTOS ECOLÓGICOS E BIOTA COMO FERRAMENTAS AMBIENTAIS</b>	
<b>Capítulo 1</b> .....	<b>19</b>
<b>PLANEJAMENTO AMBIENTAL URBANO E A FRAGMENTAÇÃO DE ECOSISTEMAS NATURAIS</b>	
<i>Regina Márcia Longo; Alessandra Leite da Silva; Admilson Irio Ribeiro</i>	
<b>Capítulo 2</b> .....	<b>45</b>
<b>BIOMONITORAMENTO DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO E COMPOSTOS NITROGENADOS UTILIZANDO PLANTAS DE <i>Lolium multiflorum</i> CV. LEMA</b>	
<i>Ricardo Keiichi Nakazato; Marisa Domingos</i>	
<b>Capítulo 3</b> .....	<b>65</b>
<b>ESCALAS DE INFRAESTRUTURA VERDE</b>	
<i>Cíntia Miua Maruyama</i>	
<b>Capítulo 4</b> .....	<b>79</b>
<b>BIOMONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR: DO CONCEITO À PRÁTICA</b>	
<i>Patricia Bulbovas; Marisa Domingos</i>	

**Capítulo 5 ..... 103**  
**EFICÁCIA DO ORDENAMENTO TERRITORIAL PARA A PROTEÇÃO**  
**DOS SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DA SERRA DO ITAPETI**

*Elaine Aparecida Rodrigues; Rodrigo Antonio Braga Moraes Victor;  
 Edgar Fernando de Luca; Kátia Mazzei; Maurício Lamano Ferreira;  
 Luis Alberto Bucci; Rosangela Soares Lopes*

**Capítulo 6 ..... 139**  
**ISÓTOPOS ESTÁVEIS COMO FERRAMENTA DE MONITORAMENTO**  
**AMBIENTAL EM CIDADES**

*Karina Gonçalves da Silba; Maurício Lamano Ferreira; Plínio  
 Barbosa de Camargo*

**PARTE II**  
**TECNOLOGIAS, GESTÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS COMO**  
**FERRAMENTAS AMBIENTAIS**

**Capítulo 7 ..... 157**  
**SENSORIAMENTO REMOTO E SUAS CONTRIBUIÇÕES AOS**  
**ESTUDOS URBANOS: O FENÔMENO DE ILHA DE CALOR E O**  
**MONITORAMENTO DE QUALIDADE DE ÁGUA**

*Cristiano Capellani Quaresma*

**Capítulo 8 ..... 179**  
**FERRAMENTAS URBANAS ADOTADAS NO COMBATE ÀS**  
**INUNDAÇÕES NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO**

*Carlos Alberto Nunes de Oliveira; Diego de Melo Conti; Pedro  
 Roberto Jacobi*

**Capítulo 9 ..... 193**  
**CONSERVAÇÃO DA GEODIVERSIDADE E DO PATRIMÔNIO**  
**GEOLÓGICO**

*Maria da Glória Motta Garcia; Lígia Maria de Almeida Leite  
 Ribeiro; Christine Laure Marie Bourotte*

<b>Capítulo 10</b> .....	<b>221</b>
<b>CONTRIBUIÇÕES DA AVALIAÇÃO AMBIENTAL ESTRATÉGICA: DO PLANEJAMENTO AMBIENTAL À GESTÃO URBANA</b>	
<i>Amarilis Lucia Casteli Figueiredo Gallardo; Juliana Siqueira-Gayl; Daniella Aparecida de Mattos de Oliveira Rolo; Heidy Rodriguez Ramos; Débora Mendonça Monteiro Machado</i>	
<b>Capítulo 11</b> .....	<b>237</b>
<b>ENVOLTÓRIAS VERDES: O USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE AMBIENTAL</b>	
<i>Thiago Montenegro Góes; Caio Frederico e Silva; Pedro Dias Boa Sorte; Teresa Santos; José António Tenedório</i>	
<b>Capítulo 12</b> .....	<b>261</b>
<b>ANÁLISE DO PROCESSO DE EUTROFIZAÇÃO EM CORPOS HÍDRICOS DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO</b>	
<i>Heraldo Donatelli Filho; Andreza Portella Ribeiro; Anderson de Oliveira; Leonardo Ferreira da Silva; Harry Alberto Bollmann</i>	
<b>Capítulo 13</b> .....	<b>283</b>
<b>DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DE ZONAS COSTERAS EN CUBA: CASO DE ESTUDIO SECTOR COSTERO QUIBÚ-ALMENDARES, MUNICIPIO PLAYA, LA HABANA, CUBA</b>	
<i>Elizabeth Dayana Curra Sánchez; Eduardo Salinas Chávez; Alberto Enrique García Rivero; Ana Maria Suarez</i>	
<b>Capítulo 14</b> .....	<b>311</b>
<b>POLÍTICAS PÚBLICAS AMBIENTAIS E MUDANÇAS CLIMÁTICAS: COMO ADAPTAR CIDADES PARA FUTUROS CENÁRIOS DE ALTERAÇÕES AMBIENTAIS</b>	
<i>Maryly Weyll Sant'Anna; António Guerner Dias; Maurício Lamano Ferreira</i>	

## Capítulo 11

### ENVOLTÓRIAS VERDES: O USO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS NA ANÁLISE AMBIENTAL

*Thiago Montenegro Góes*<sup>41</sup>

*Caio Frederico e Silva*<sup>42</sup>

*Pedro Dias Boa Sorte*<sup>43</sup>

*Teresa Santos*<sup>44</sup>

*José António Tenedório*<sup>45</sup>

#### INTRODUÇÃO

Enfrentamos uma crise climática sem precedentes e que requer cidades cada vez mais resilientes. Os principais modelos climatológicos apontam para um aumento médio de temperatura da Terra de até 4,8 °C até o final do século 21, segundo o IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change* (COLLINS *et al.*, 2013). Contudo, sabemos que o aumento não será homogêneo no espaço nem no tempo, com ondas de calor muito superiores a esses valores.

Os centros urbanos estão no epicentro das questões de mudanças climáticas, tanto como causa, como consequência. As atividades que ocorrem nas cidades, como transportes, produção industrial bens como as edificações e o consumo da mineração e da agricultura são responsáveis por 70% de todas

---

<sup>41</sup> Mestre, Doutorando no Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília – PPG/FAU/UnB. E-mail: thiago.goes01@gmail.com

<sup>42</sup> Doutor, Professor na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo e no PPG FAU da Universidade de Brasília (UnB). Pesquisador LaSUS/Lacam/SICAC. E-mail: caiosilva@unb.br

<sup>43</sup> Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília – PPG/FAU/UnB. E-mail: pedrodiasbs@gmail.com

<sup>44</sup> Doutora, pesquisadora no Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais (CICS.NOVA), Faculdade de Ciências Sociais e Humanidades (NOVA FCSH), Universidade NOVA de Lisboa, Portugal. E-mail: teresasantos@fcs.unl.pt

<sup>45</sup> Doutor, professor na Faculdade de Ciências Sociais e Humanidades (NOVA FCSH) do Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais (CICS.NOVA) da Universidade NOVA de Lisboa, Portugal. E-mail: ja.tenedorio@fcs.unl.pt

as emissões de gases do efeito estufa (ONU, 2011). Além disso, as cidades sofrerão alguns dos principais efeitos do aquecimento global, pois é onde se encontra a maior parte da população e os efeitos do aquecimento são acentuados pelo efeito da ilha de calor (ESTRADA; TOL, 2017).

Nesse sentido, se faz urgente desenvolver estratégias e aplicar políticas que sejam capazes de mitigar os efeitos nocivos das atividades urbanas ao clima (SANTAMOURIS, 2014), assim como tornar as cidades mais resilientes e menos suscetíveis aos efeitos de mudanças climáticas. Infraestruturas verdes possuem um papel essencial em possibilitar resiliência climática das cidades, mas também auxiliam a criar ambientes mais saudáveis e assim melhorar a qualidade de vida local. Isso se deve aos diversos serviços ambientais que essas infraestruturas fornecem, como melhoria do microclima, gestão das águas de chuvas, redução de emissões de gases do efeito estufa, entre outros, assim serviços sociais, como, por exemplo, aumentar coesão social (GEHRELS *et al.*, 2016).

Dentro da grande temática de infraestrutura verde, o uso da vegetação é considerado estratégia central para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis, ecológicas, saudáveis e humanas (NIEMELÄ *et al.*, 2010). Nas últimas décadas, a importância da vegetação urbana deixou de ser predominantemente estética e ornamental para ganhar um papel essencial de provedora de serviços ambientais (SILVERA SEAMANS, 2013, SALMOND *et al.*, 2016). Assim, o emprego da vegetação urbana é um dos principais aliados para reduzir as emissões de gases do efeito estufa, especialmente pela capacidade de fixação de carbono (ROMERO *et al.*, 2019).

A vegetação na área urbana possui papel estratégico na mitigação do calor na escala local, por sua capacidade de sombreamento, reflexão e evapotranspiração (ROMERO, 2013). Em relação ao calor no meio urbano, a vegetação possuiu características físicas que distinguem a sua transmissão de energia térmica em relação aos materiais construtivos convencionais, como asfalto, blocos de concreto e cerâmica. O desempenho térmico da vegetação é caracterizado pela absorção de cerca de 90% da radiação visível e 60% da infravermelha, a qual é utilizada em suas funções biológicas, e o restante transmitido ou refletido pelas folhas. Esse potencial de redução da carga térmica é especialmente relevante em contextos climáticos predominante quentes, como é grande parte do território brasileiro.

O emprego de envoltórias verdes (EV) – coberturas e paredes verdes – por mais que não seja uma prática nova (BOWE, 2010), tem ganho destaque nas últimas décadas (LI; YEUNG, 2014). Em contextos urbanos cada vez mais densos e com grande supressão de áreas verdes, EV são alternativas viáveis para prover os diversos serviços ambientais da vegetação sem a necessidade de competir com o mercado imobiliário.

Os benefícios que EV possibilitam são diversos como: aumento da biodiversidade urbana, melhora da qualidade do ar e da água, promover a aproximação do homem com elementos da natureza, reduzir alagamentos, amenizar o clima local, melhorar o conforto térmico e reduzir o consumo energético das edificações, além de questões estética e contemplativas.

No nível do clima urbano, uma política de emprego de EV é capaz de atenuar as ondas de calor. Estudos apontam para o potencial de redução de picos temperatura do ar de até 11°C em Riad na Arábia Saudita e 7°C em Brasília (ALEXANDRI; JONES, 2008).

Já no nível da edificação, EVs são capazes de melhorar os níveis de conforto térmico em 7°C em climas tropicais (DOMINIQUE *et al.*, 2014) em virtude da massa térmica, sombreamento, evapotranspiração e reflexão que a EV propicia. Essa capacidade de melhoria do conforto está atrelada à proporção de vegetada na envoltória, com maior impacto de coberturas verdes em edificações de baixa altura e de paredes verdes em edificações de maior gabarito. Ademais, além de proporcionar melhores índices de satisfação dos usuários, o emprego de EV acarreta na redução do consumo energético da edificação – especificamente de sistema de condicionamento de 25% a 80% (WONG *et al.*, 2008) –, aspecto essencial para a redução das emissões de gases do efeito estufa, visto que as edificações representam 19% de todas as emissões de gases do efeito estufa (ÜRGE-VORSATZ *et al.*, 2014).

Assim, percebemos que as EVs em si são ferramentas de controle ambiental na escala urbana. Além disso, atualmente existem diversas ferramentas de modelagem computacional que podem auxiliar na melhor definição de políticas públicas para a implantação de estratégias como EV, assim como a avaliação do seu impacto no conforto ambiental. Elas variam desde ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento para a identificação de potenciais na escala local, até ferramentas de simulação do microclima e do desempenho termoenergético da edificação que quantificam

o impacto do emprego de estratégias como EV antes mesmo de sua implementação, ainda na fase de projeto.

Este capítulo apresenta um panorama geral de ferramentas de modelagem computacionais capazes de avaliar o impacto na mitigação do calor da implementação das EV em múltiplas escalas a fim de auxiliar a implementação de políticas urbanas, além de uma visão geral do potencial de EV como estratégia de mitigação das mudanças climáticas no meio urbano. A primeira parte destina-se a inserir as EV no contexto de soluções baseadas na natureza e infraestrutura verde, assim como abordar os benefícios de EV ao conforto ambiental tanto na escala urbana, como da edificação – e consequentemente o impacto na eficiência energética. Na segunda parte está a apresentação de ferramentas de modelagem computacional que podem auxiliar na tomada de decisão em três escalas: no nível de planejamento a partir de ferramentas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, na escala urbana por meio de simulação computacional do microclima e na escala da edificação de simulações termoenergéticas para avaliação do conforto térmico e eficiência energética. Por fim, discutem-se perspectivas futuras dessas ferramentas, especialmente sobre escopo e escala de investigação, além de questões de integração e interoperabilidade.

## **ENVOLTÓRIAS VERDES: INFRAESTRUTURA VERDE PARA QUALIDADE AMBIENTAL**

As áreas urbanas podem contribuir para eventos extremos de calor e aumentar a mortalidade e morbidade na população urbana (GABRIEL; ENDDLICHER, 2011), como visto em Paris, França, em 2003 (DHAINAUT *et al.*, 2004), Melbourne, Austrália, em 2009 (Departamento de Serviços Humanos, 2009) e Moscou, Rússia, em 2010 (REVICH, 2011).

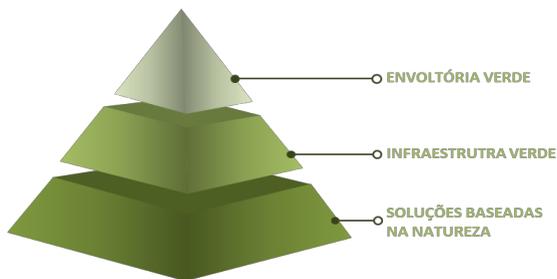
A resiliência urbana pode ser compreendida como a capacidade dos indivíduos, comunidades, instituições, negócios e sistemas, em comum acordo com a cidade, sobrevivem aos choques, desastres naturais, crises econômicas, falhas de infraestrutura e sobrecargas. Resiliência não é apenas recuperação ou um fenômeno estático, mas é transformação. Resiliência é o processo de como a cidade por se redefinir após um choque, o que pode torná-la mais forte (MARUYAMA; YAMAGATA, 2016).

Esses novos conceitos colocam o paradigma do desenvolvimento sustentável em xeque. A cidade resiliente é mais preparada para enfrentar os problemas ambientais que a cidade sustentável? A esse fim, a cidade resiliente acolhe as soluções baseadas na natureza dentro da sua própria dinâmica.

Infraestrutura verde são soluções de infraestrutura urbana baseadas na natureza que prestam serviços ambientais. Um dos principais tipos de infraestrutura verde é a vegetação urbana, que pode possibilitar bem-estar às pessoas por meio de melhorias do conforto ambiental, qualidade do ar e aumento da salubridade. Ademais, a presença de vegetação nas edificações também influencia a vidas dos usuários do edifício e do entorno imediato. Pesquisa realizada por Valesan *et al.* (2010) na cidade de Porto Alegre/RS relatou que os usuários de edifícios com EV apontam como principais vantagens o "embelezamento da paisagem urbana" e a "integração do meio urbano com a natureza".

Podemos considerar as EVs como elementos integrantes do conjunto das infraestruturas verdes. As infraestruturas verdes, por sua vez, são consideradas integrantes do campo de pesquisa das soluções baseadas na natureza (Figura 1). Assim, a adoção de EV apresenta-se como uma das alternativas deste campo que pretende mitigar as mudanças climáticas. Além disso, possibilitam benefícios como aumento da biodiversidade, melhoria da qualidade de vida e saúde das pessoas, redução de consumo energético e dos gases do efeito estufa, mitigação da poluição da água e do ar, além de valor estético e contemplativo (ÖZYAVUZ *et al.*, 2015)

Figura 1. Hierarquia das soluções baseadas na natureza, infraestrutura verde e envoltória verde



Fonte: Autores (2020).

As EVs tornam a cidade um ambiente mais receptível para elementos dos ambientes naturais. Segundo Meiners *et al.* (2002), as paredes verdes são habitats para diversas espécies e podem ser definidas como uma comunidade biótica ou um conjunto associado a um ambiente físico em um local específico, especialmente se há uma consideração específica das espécies que irão compor uma parede ou cobertura verde. O uso de espécies nativas, em contraposição às exóticas possuiu diversos benefícios, pois constituem um importante patrimônio cultural e econômico para as populações locais, representam a possibilidade de conciliação entre os objetivos da intervenção antrópica e os da preservação da biodiversidade e permitem a integração de projetos paisagísticos ao entorno paisagístico natural (NASCIMENTO; OLIVEIRA, 2005; ROCHA *et al.*, 1995). Além disso, suas características morfológicas e fisiológicas possibilitam amenizar o clima local.

Um dos benefícios mais notórios de EV é sua capacidade em auxiliar na mitigação do fenômeno ilha de calor urbano, descrita pela primeira vez em Londres pelo meteorologista Luck Howard em 1833 (HOWARD, 1833). Nesse fenômeno, o calor é absorvido pelas superfícies urbanas com alta capacidade térmica (TALEGHANI, 2018) e posteriormente liberado no ambiente, o que eleva a temperatura. A utilização de vegetais em vez de materiais com alta capacidade térmica é uma estratégia que auxilia na mitigação dos efeitos de ilhas urbanas de calor e eventos extremos de calor (NORTON *et al.*, 2014).

Na escala da edificação, por sua vez, Araújo (2007) ressalta que o uso da cobertura verde favorece o desempenho térmico dos edifícios, interna e externamente, o que proporciona maior conforto térmico ao usuário. Segundo Romero (2013), o uso de vegetação é a estratégia mais eficiente para se evitar o ganho de calor, pois diminui a incidência solar nas superfícies dos ambientes construídos. Além disso, o emprego de EV pode auxiliar no conforto térmico em virtude do aumento da inércia térmica da envoltória, o que pode ser benéfico tanto em climas quentes quanto frios. Essa melhoria no conforto térmico da edificação, mais que melhorar a condição de habitabilidade, acarreta maior eficiência energética da edificação, possibilitando na redução no consumo de energia e conseqüentemente na redução de emissões de gases do efeito estufa.

Nesse sentido, a definição do material superficial das edificações mais adequados como EV, pode contribuir para cidades mais resilientes, que

propiciem maior bem-estar aos usuários, mais saúde, diversidade, além de mais conforto térmico tanto no ambiente urbano, como dentro das edificações, o que consequentemente permite cidades com menor consumo de energia. Além disso, é possível alcançar esses objetivos, à medida que tornamos as cidades mais morfologicamente semelhantes aos ambientes naturais, o que inclusive contribui para cidades mais sustentáveis.

## **FERRAMENTAS PARA ANÁLISE EM MULTIESCALA DO IMPACTO DE ENVOLTÓRIAS VERDES NO CONFORTO AMBIENTAL**

Ferramentas de modelagem computacional, desde sua disseminação a partir da Terceira Revolução Industrial – mas especialmente agora com a Quarta Revolução Industrial – têm transformado a humanidade de uma forma sem precedentes, com alterações profundas em como as pessoas trabalham, vivem e se relacionam. Essas mudanças têm impactos profundos em todas as indústrias e suas cadeias produtivas (SCHWAB, 2016). Especificamente o emprego de sistemas computacionais possibilita maior manipulação e avaliação de dados, em uma dimensão praticamente inviável à capacidade humana. Isso apresenta novas informações, o que auxilia a tomada de decisão, em uma abordagem baseada em evidências (HAMILTON, WATKINS, 2008). Dessa forma, as ferramentas de modelagem computacional servem de apoio, como um assistente, à tomada de decisão em diversas áreas de atuação.

No planejamento urbano e desenvolvimento de políticas públicas, as possibilidades de empregos de ferramentas de modelagem computacional são inúmeras, desde legislações ou códigos no nível federais até municipal. Além disso as informações que esse tipo de abordagem fornece, podem direcionar investimentos como linhas de financiamento para área prioritárias de pesquisa ou desenvolvimento de produtos. Ademais, ao criar um ecossistema de ferramentas, os dados e informações obtidos por um tipo de ferramenta podem auxiliar análises de outras ferramentas, o que fortalece a abordagem de tomada de decisão baseada em evidências

Os sistemas de informação geográfica se beneficiam muito dos sistemas computacionais, pela sua capacidade de armazenamento, processamento e cruzamento de dados. As ferramentas de sensoriamento remoto são capazes de fornecer vastas quantidades de dados aos sistemas de informações

geográficas. Isso está especialmente relacionado ao uso de imagens de satélite, que têm se tornado popular para análise de contextos urbanos a partir dos anos 1990 – com o maior acesso devido à desclassificação como tecnologia militar –, mas especialmente a partir dos anos 2000 – com a melhoria da qualidade das imagens e maior resolução espacial (mínima área coberta por cada pixel). Por meio de análises espectrais das imagens, essas tecnologias de sensoriamento remoto permitem a identificação e caracterização de diversas coberturas, como por exemplo coberturas vegetais.

Ferramentas de simulação computacional para avaliação do desempenho têm trajetória parecida e têm se popularizado nas últimas décadas. Essas ferramentas se destacam por auxiliarem na melhoria de ambientes existentes ou mesmo em fase de projeto, porque são capazes de equacionar questões de qualidade ambiental e assim assistem à melhoria do desempenho dos ambientes (KEELER; BURKE, 2010; ATHIENITIS; O'BRIEN, 2015). Isso ocorre porque são ferramentas de natureza multidisciplinar, orientadas a problemas amplos e de escopo abrangente, que visam a fornecer soluções aproximadas a problemas complexos por meio de um modelo simplificado, mas fidedigno (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

Especificamente, as ferramentas de avaliação do microclima urbano permitem analisar o conforto ambiental como questões de umidade, velocidade dos ventos, temperatura do ar e radiante, por meio de modelos que representam as características físicas do local e do clima. Assim, além de poder avaliar as condições atuais de conforto ambiental de um contexto urbano, ferramentas de avaliação do microclima permitem estudar diversas alternativas de intervenção, o que permite uma tomada de decisão mais embasada. Essa abordagem tem se mostrado especificamente relevante ao estudo do impacto de vegetação no ambiente urbano, como os casos de EV.

Ainda mais populares que ferramentas de simulação do microclima urbano, ferramentas de simulação do desempenho ambiental de edificações – especialmente a modelagem energética da edificação, ou *Building Energy Modeling* (BEM). Essas ferramentas permitem a avaliação de questões de conforto ambiental de espaços internos, assim como seu consumo energético, por meio da construção de um modelo representativo das suas características físicas. Similarmente às ferramentas de avaliação do microclima, permitem avaliar alternativas sobre a forma de cenários para melhorar o conforto ou

desempenho ambiental e reduzir o consumo energético. Normalmente, essas ferramentas possuem enfoque na avaliação dos sistemas construtivos e sistemas ativos da edificação<sup>46</sup>. Especificamente a avaliação do impacto da evapotranspiração da vegetação normalmente não é adequadamente equacionada, se a vegetação não está encostada na envoltória da edificação. Contudo, se a vegetação está empregada na envoltória, como é o caso de EV, essas ferramentas de simulação são capazes de avaliar inclusive o impacto da evapotranspiração no ambiente interno.

### **Escala local: sensoriamento remoto e geoprocessamento**

O planejamento urbano constitui uma ferramenta de gestão eficiente para promover o desenvolvimento sustentável em várias escalas. Porém, o seu sucesso depende muito de informações precisas e robustas. Nesse contexto, os dados de sensoriamento remoto são uma fonte eficiente de informação sobre elementos na superfície urbana. Os recentes avanços nas tecnologias e algoritmos dos sensores digitais tornaram possível a aquisição de imagens de muito alta resolução (5 m a menos de 1 m), de forma regular e a um custo relativamente baixo.

Essas informações permitem abordagens em várias escalas, das cidades aos bairros e aos edifícios. Os dados recolhidos por sensores instalados a bordo de veículos aéreos não tripulados (drones), helicópteros, aviões ou satélites incluem informação espectral e altimétrica de grande detalhe espacial. Deste modo, combinando diferentes sensores digitais, modelos 3D complexos da superfície podem ser produzidos em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e usados para avaliar diversos fatores que contribuem para a qualidade urbana.

Normalmente, os dados derivados são apresentados como indicadores espaciais, que fornecem informações quantitativas atualizadas sobre um objeto específico, do status da vegetação à temperatura da superfície da terra, qualidade da água ou emissões de poluentes. Tradicionalmente, a coleta deste tipo de informação exige inventários tecnicamente exigentes e com recursos

---

<sup>46</sup> Entende-se como sistemas ativos aqueles que dependem diretamente de energia ao seu funcionamento, como sistemas de ar-condicionado, ventilação, resfriamento e aquecimento, iluminação artificial e outros equipamentos elétricos.

humanos muito especializados, que demoram tempo a produzir informação útil, que muitas vezes já se encontra desatualizada quando disponibilizada.

Os indicadores urbanos espaciais baseados em dados remotos, por seu lado, coletam eficientemente as informações que permitem aos planejadores avaliar o problema, decidir onde e quando as políticas devem ser realizadas, quais podem ser as metas realistas e quem está mais apto a implementá-las (SANTOS *et al.*, 2016). O uso de indicadores baseados em conhecimento geográfico permite ainda avaliar o alcance das políticas públicas, uma vez que a sua fácil formulação permite acompanhar a implementação e verificar o cumprimento das metas definidas no plano.

Ao considerar medidas de adaptação e mitigação às mudanças climáticas como as EV, os dados de sensoriamento remoto podem fornecer indicadores relevantes para melhor estimar as necessidades atuais e avaliar cenários de planejamento alternativos. A partir do processamento digital das imagens de muito alta resolução é possível identificar quais os locais na cidade que estão privados de áreas verdes, e que deste modo podem ser favorecidos numa fase inicial do planejamento urbano. Porém, o planejamento da intervenção ecológica em uma cidade implica a existência de áreas adequadas no terreno; no entanto, em áreas de alta densidade, o espaço disponível é geralmente escasso. Nesse contexto, as EV podem constituir uma alternativa válida e saber onde estão os melhores locais da cidade para receber essas estruturas é uma ferramenta essencial para o sucesso do planejamento verde (SANTOS *et al.*, 2019).

Contudo, nem todo edifício pode receber uma EV, pois vários fatores influenciam a tomada de decisão sobre a possível adoção de sistemas de vegetação na envoltória devem ser avaliados. No caso específico das coberturas, a primeira dificuldade é a presença de telha como material de cobertura. Também coberturas com inclinação superior a 20° não são indicadas para receber essas estruturas verdes. Igualmente, coberturas com pouca captação solar podem não ser as mais indicadas para receber vegetação.

Neste contexto, uma abordagem multissensor é a forma mais eficiente de avaliar estes fatores. Por um lado, a informação espectral recolhida em imagens permite identificar os materiais utilizados em cada topo de edifício. Por outro lado, a informação altimétrica permite criar um modelo 3D do ambiente urbano e derivar a informação sobre as inclinações de cada topo,

bem como quantificar a radiação solar disponível em cada cobertura (SANTOS *et al.*, 2014). Essa metodologia foi empregada em Lisboa, Portugal, especificamente à identificação do potencial de emprego de coberturas verdes por Santos *et al.* (2016). Essa abordagem possibilita aos gestores avaliarem a viabilidade econômica e desenvolver planos de ações de forma mais embasada.

Dessa forma, o planejamento para o desenvolvimento ecológico nas cidades deve basear-se em informações sobre a adequação local para adaptação ecológica. Os produtos derivados de sensoriamento remoto permitem, por um lado, identificar os critérios de sucesso de uma intervenção verde de forma consistente, rápida e replicável para toda a área urbana; mas também monitorizar a sua implementação de modo a avaliar o seu alcance e aconselhar ajustes, se necessário.

O modelo de planejamento urbano moderno baseado em conhecimento geográfico – denominado de *e-planning* – permite auxiliar a tomada de decisão e assistir na discussão pública dos planos por meio da visualização do impacto das intervenções propostas no espaço público. O processo de *e-planning* pode ser incorporado em diversas escalas, no entanto, conhecer a capacidade local fornece base sólida à tomada de decisão e ao sucesso das políticas de desenvolvimento sustentável.

### **Simulação microclimática**

Após identificar quais os melhores locais na cidade para receber EV, é pertinente estudar diversos cenários de intervenção verde e avaliar qual traz mais benefícios ao nível do conforto no espaço público. Nesta fase, a informação recolhida por sensores remotos sobre a forma urbana e os materiais à superfície pode ser usada em modelos de simulação microclimática que produzem, de acordo com as condições meteorológicas locais, indicadores de conforto térmico. Deste modo, diferentes cenários de intervenção podem ser testados e produzir informação de apoio ao planejamento verde à escala de vizinhança, como estudos de impacto de vizinhança (EIV), discussões de planos diretores e avaliação de impactos intervenções de gestões municipais.

Muitas pesquisas dedicam-se a entender como o desenvolvimento urbano e a falta de vegetação natural contribuem para o aumento da

temperatura nas cidades. Alguns estudos discutem a relação entre a vegetação como meio de promover o conforto térmico em um contexto ambiental, assim como as EV como estratégias de adaptação ou mitigação.

O ENVI-met é um programa desenvolvido por diversos projetos de investigação científica e está, portanto, sob constante desenvolvimento. Sua proposta fundamenta-se no prognóstico das leis fundamentais da dinâmica de fluidos e da termodinâmica. O modelo inclui a simulação de: enchente ao redor e entre edifícios troca de processos de calor e vapor na superfície do solo e nas paredes turbulência troca de vegetação e parâmetros de vegetação; bioclimatologia; dispersão de partículas (BRUSE, 2004). Atualmente, o software ENVI-met encontra-se na sua quarta versão e entre outros recursos aceita arquivos climáticos do tipo EPW (*EnergyPlus Weather file*).

A escala das ilhas urbanas de calor oferece pesquisas relevantes em dois contextos climáticos diferentes. Maleki e Mahdavi (2016) discutem estratégias de mitigação usando um modelo de microclima urbano tridimensional. Em seu estudo, eles investigaram os efeitos da variação das propriedades físicas e geométricas do tecido urbano no microclima urbano e no conforto térmico ao ar livre com o uso do ENVI-met. Os autores concluíram que resultados que aumentam a quantidade de vegetação e pavimentos permeáveis podem resfriar a temperatura do ar em até 3 °C.

Em outro contexto climático, Razzaghmanesh *et al.* (2016) apresentam uma investigação experimental nos vários níveis climáticos. Eles usam simulação nas escalas micro e macro de um ambiente urbano típico na África do Sul para avaliar o potencial de mitigação do efeito ilhas urbanas de calor na cidade de Adelaide. Eles apontam a substituição de superfícies vegetadas por materiais com baixo teor de albedo como uma das razões para o aumento da temperatura em um ambiente urbano e, conseqüentemente, também uma das causas essenciais dos efeitos de ilhas urbanas de calor. Os resultados mostraram que essas mudanças têm efeitos significativos no resfriamento durante o verão e podem se comportar como uma camada de isolamento para manter os edifícios mais quentes no inverno. Finalmente, os autores afirmam que o uso de paredes verdes e arborização de rua, juntamente com a adoção de materiais com alto índice de albedo, é recomendado à redução da temperatura urbana e mitigação dos efeitos das ilhas urbanas de calor.

Morakinyo *et al.* (2019) apontam as paredes verdes como uma ótima estratégia para melhorar as características térmicas de um ambiente ao ar livre e reduzir o uso de energia em ambientes fechados. Especificamente em cidades com alta densidade e verticalidade, como Hong Kong, a área de superfície de fachadas dos edifícios é muito maior que as áreas de cobertura e solo combinadas, oferecendo uma plataforma vertical para o esverdeamento. Os autores usaram a simulação com ENVI-met para entender o potencial resfriamento do ar e a melhoria do conforto térmico de uma vizinhança de densidades variadas. Eles constataram um potencial de redução de cerca de 1 °C na temperatura do ar se 30 a 50% das fachadas dos edifícios de Hong Kong fossem recobertas com paredes verdes. Isso permite melhorar o conforto térmico para pedestres durante o dia em pelo menos uma classe termal no índice PET (*Physiological Equivalent Temperature*).

A avaliação do impacto do desempenho de diferentes tipos de infraestrutura verde no conforto térmico do clima urbano é abordada por Zölch *et al.* (2016). Investiga-se como diferentes tipos de infraestrutura verde urbana – especificamente, arborização e EV – afetam o conforto térmico dos pedestres. O artigo demonstra que o plantio de árvores obteve o impacto mais positivo, com uma redução média de 13% no PET, em comparação com o cenário existente. Especificamente, paredes verdes possibilitaram atenuar entre 5 a 10% no PET. Entretanto, os resultados também indicam que o impacto de coberturas verdes foi desprezível na redução do PET.

Já Herath *et al.* (2018) avaliaram a estratégia de mitigação e resiliência da infraestrutura verde urbana na tropical Colombo, a capital comercial do Sri Lanka, por meio de simulação para as condições climáticas quentes e úmidas do final de verão, em agosto. Avaliou-se o impacto no clima de sete cenários – três de coberturas verdes, três de paredes verdes e cenário existente – com o uso do ENVI-met. Os resultados destacaram que as EVs reduziram significativamente a temperatura. Os melhores cenários mostram uma redução de cerca de 2 °C com o emprego de parede verde e de 1,64 °C para a cobertura verde em comparação com o cenário existente.

Dessa forma, demonstra-se a capacidade de EV como ferramenta de controle ambiental e na melhoria do clima urbano, especificamente no controle ao desconforto por calor e os efeitos do fenômeno de ilha de calor. Para que EVs sejam implementadas adequadamente em políticas públicas é

necessário que sejam avaliados seus impactos. Nesse aspecto ferramentas de avaliação do microclima urbano podem contribuir significativamente, seja na análise de estudos de impacto de vizinhança, em discussões de planos diretores juntos com a população ou na avaliação de alternativas por parte dos gestores públicos.

### **Simulação termoenergética da edificação**

As infraestruturas verdes também impactam o balanço energético dos edifícios. Ferramentas de simulação do desempenho da edificação são ferramentas de modelagem computacional capazes de desenvolver modelo virtuais representativos de uma condição de contorno real (DEWILDE, 2018). Isso é possível por meio de caracterização adequada de diversos dados de entrada como arquivo climático, características do sítio, características termofísicas e geométricas dos elementos construtivos, sistemas empregados e cargas e rotinas de uso e ocupação. Por serem ferramentas de natureza multidisciplinar, orientadas a problemas amplos e de escopo abrangente, podem fornecer soluções a problemas complexos de forma fidedigna por meio de modelo simplificado (HENSEN; LAMBERTS, 2011).

Essas ferramentas podem ser compreendidas como experimentos virtuais pois permitem avaliar a influência de diversas estratégias nos indicadores de desempenho da edificação (AUGENBROE, 2011). Especificamente, *Building Energy Modeling* (BEM) é um tipo de ferramenta de avaliação do desempenho da edificação que possui como enfoque a avaliação do consumo energético de uma edificação, entretanto, outros indicadores relativos ao desempenho termoenergético, como temperatura do ar, radiante e operativa também são gerados.

Existem diversas ferramentas de cálculo que realizam esse tipo de simulação. O *EnergyPlus*, desenvolvido pelo Departamento de Energia do Estados Unidos desde 1995 a partir de projetos anteriores – DOE2 e Blast – é considerado o estado da arte desse tipo de ferramenta. Contudo, por se tratar de um programa alfanumérico, não possui uma interface gráfica amigável (WETTER *et al.*, 2015). Dessa forma, diversas interfaces gráficas foram desenvolvidas em cima do *EnergyPlus* e o utilizam como algoritmo de cálculo, como *OpenStudio*, *DesignBuilder*, *Sefira*, *Ecotect*, entre outros. Ademais,

também existem outras ferramentas tipo BEM que possuem algoritmos de cálculo próprios, como os casos do TAS e IESve.

Essas ferramentas de simulação têm sido vastamente utilizadas para a avaliação do impacto de EV no desempenho de edificações, seja tanto para conforto térmico como para eficiência energética. Especificamente as ferramentas baseadas no *EnergyPlus* são capazes de avaliar o impacto de EV no desempenho de forma fidedigna. Por possuir objeto específico a esse fim, o *EnergyPlus* é capaz de simular os efeitos de plantas aderidas em sistemas construtivos – paredes e coberturas – inclusive o efeito evapotranspirativo das plantas, a rotina de irrigação e a evaporação do substrato.

Desta forma, é possível investigar o desempenho de diferentes cenários construtivos como EV, e assim compará-las com outros tipos de envoltórias. Ademais, essas ferramentas possibilitam investigar quais atributos – ou parâmetros – de um tipo de envoltória como EV mais influenciam no conforto ou eficiência energética de uma edificação, como por exemplo altura da vegetação, profundidade do solo e *leaf area index* (LAI). Assim é possível refinar melhor as soluções e atingir resultados mais otimizados. Essas estratégias podem ser bastante úteis para melhor definir políticas públicas, legislação, código de obras, linhas de financiamento e área prioritárias de pesquisa mais adequadas as diferentes realidades climáticas.

Estudos comparativos podem pautar legislações locais, como código de obras ou planos diretores, pois permitem investigar o desempenho de diversas soluções. Por exemplo, o estudo de Gagliano *et al.* (2015) avaliou diversas soluções de coberturas e apontou que coberturas verdes possibilitam melhores condições de conforto térmico no verão no clima mediterrâneo estudado, com redução de 3 °C em média em comparação com solução tradicional de alvenaria e 1 °C em comparação com a segunda melhor solução. Além disso, a maior inércia térmica permite a redução da oscilação de temperatura, o que também reduz a demanda de pico de consumo de energia, aspecto crucial a maior resiliência da rede elétrica.

Contudo, por mais que esses estudos comparativos permitam investigar o desempenho entre soluções, ainda assim avaliam um número restrito de alternativas e exploram o universo de soluções de maneira limitada. Esse tipo de estudo não possui uma capacidade de refinar as soluções construtivas para maximizar seu desempenho. Nesse sentido é importante avaliar o impacto que

os diversos parâmetros das EV no desempenho do ambiente. Afinal, há uma grande diversidade tipos de EV.

Estudos paramétricos permitem realizar um ajuste fino de solução de EV e permitem observar como a variação de um parâmetro impacta o resultado de conforto ou eficiência energética. Dessa forma, é possível identificar qual combinação dos parâmetros estudados permite melhor resultado de conforto ou eficiência energética. Isso pode facilitar o desenvolvimento de diretrizes mais específicas para códigos de obras locais ou políticas de eficiência energética na esfera nacional.

Já análises de sensibilidade permitem avaliar o impacto da variação de determinado parâmetro no resultado de conforto ou eficiência energética. Diferentemente de estudos paramétricos propriamente ditos, análises de sensibilidade não fornecem os resultados para cada combinação de parâmetros, mas demonstram a influência de determinado parâmetro no resultado. Isso pode auxiliar na definição de áreas prioritárias de pesquisa e desenvolvimento, o que pode direcionar políticas de fomento.

Podemos constatar essas duas abordagens no estudo de Gomes *et al.* (2019), que realiza um estudo paramétrico aliado à análise de sensibilidade com o *EnergyPlus* com o intuito de avaliar o impacto de cobertura verde no consumo de energia de um prédio institucional de baixo gabarito, em Portugal. O estudo aponta que a altura da vegetação, profundidade do solo e *leaf area index* (LAI) foram identificados como parâmetros-chave, assim como irrigação. Especificamente a variação da irrigação afetou em 500% o consumo de energia, enquanto a profundidade do solo afetou em 115%.

O estudo também evidenciou que determinados parâmetros afetam diferentemente o consumo para aquecimento e resfriamento. A profundidade do solo influencia mais o consumo para aquecimento – em 140% – enquanto o LAI está mais relacionado ao consumo por resfriamento – com uma variação de 365% (GOMES *et al.*, 2019).

Dessa forma, demonstra-se a capacidade de EV na melhoria do conforto térmico e eficiência energética das edificações em diversos contextos climáticos. Contudo, seu emprego adequado depende essencialmente da capacidade de avaliar diversos cenários, inclusive variações dos parâmetros, o que as ferramentas de simulação do desempenho da edificação podem auxiliar. Assim, essas ferramentas podem contribuir à definição de políticas

públicas, como legislação, desde o nível local como código de obras, até questões normativas no nível nacional, além de orientar linhas de financiamento e área prioritárias de pesquisa.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Para minimizar os impactos promovidos pelas mudanças climáticas, assim como enfrentá-las, as cidades necessitam de uma reformulação para tornarem-se cada vez mais resilientes. A dicotomia entre espaço antrópico em contraposição ao espaço natural precisa ser superada e as cidades em harmonia com a natureza precisa prevalecer. A esse fim, as soluções baseadas na natureza podem contribuir em muito se integradas ao processo de planejamento e construção das cidades de forma holística.

A vegetação não pode ser considerada apenas um bem estético e ornamental no contexto urbano, mas como infraestrutura verde. Nesse sentido, age com promotor de diversos serviços ambientais, como melhoria do microclima, redução de emissões de gases do efeito estufa, aumento de biodiversidade, gestão das águas pluviais, entre outros.

Em ambientes urbanos cada vez mais densos, as EV são uma alternativa viável para implementação de vegetação urbana como infraestrutura verde. As EV funcionam como ferramentas de controle ambiental tanto na escala do microclima, como na escala do edifício. Na escala microclimática, EV pode auxiliar na mitigação dos efeitos das ilhas de calor e regulação dos eventos extremos de temperatura em diversos contextos climáticos. Enquanto na escala da edificação, os diversos atributos que as EV apresentam são capazes de servir como estratégias de conforto térmico tanto para o controle do calor quanto do frio. Isso mais do que melhorar a condição de habitabilidade, possui impacto direto no consumo de energia e, conseqüentemente, na redução de emissões de gases do efeito estufa. Tanto na edificação, como no clima urbano, a capacidade de melhoria do conforto está atrelada à proporção de vegetada na envoltória com maior impacto de coberturas verdes em edificações de baixa altura e de paredes verdes em edificações de maior gabarito.

Para a implementação de políticas públicas de planejamento de forma mais técnica, embasadas cada vez mais em dados e evidências, são necessárias ferramentas capazes de avaliar os impactos da adoção dessas políticas. Nesse

sentido, ferramentas de modelagem computacional colaboraram na tomada de decisão visto que são capazes de auxiliar na identificação de cenários, assim como verificar os impactos – especificamente no conforto térmico no escopo deste capítulo –, além de possibilitar refinamento das soluções para sua otimização dos resultados. Dessa forma, essas ferramentas possibilitam uma avaliação em múltiplas escalas para uma melhor tomada de decisão.

Alguns usos das ferramentas já são uma realidade para certos centros de pesquisa e para profissionais mais envolvidos com a simulação computacional. Nesse sentido, apresentam-se algumas perspectivas para o campo de atuação daqueles que desejam implementar, avaliar e monitorar EV em seus projetos, nas mais variadas escalas.

A prática de *e-planning* com o uso de ferramentas de sensoriamento remoto auxilia a tomada de decisão, assim como assistir na discussão pública dos planos por meio da visualização do impacto das intervenções propostas no espaço público. Especificamente, a abordagem multissensor que possibilita uma caracterização mais completa do contexto urbano e assim identificar os locais mais adequados ao emprego de EV.

Na escala do microclima urbano, ferramentas como o ENVI-met permitem avaliar as condições de conforto térmico por meio de modelagem computacional tridimensional. Esse tipo de prática pode auxiliar na avaliação de estudos de impacto de vizinhança (EIV), ou mesmo em Estudos Prévios de Viabilidade Técnica (EPVT), ambos instrumentos do Estatuto das Cidades, assim como fundamentar tecnicamente a discussão e a revisão de planos diretores.

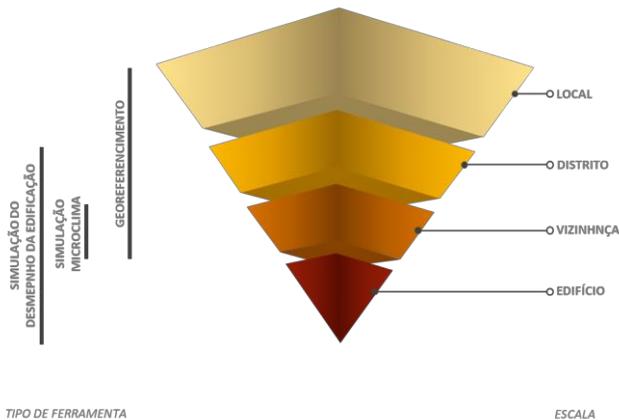
Já na escala do edifício, ferramentas de modelagem computacional como o *EnergyPlus* e suas interfaces gráficas possibilitam averiguar o impacto no conforto térmico do espaço interno, assim como impacto no consumo de energia e sua eficiência energética e, conseqüentemente, nas emissões de gases do efeito estufa. Essas abordagens podem auxiliar no desenvolvimento de diretrizes mais específicas para códigos de obras ou planos diretores no nível local locais ou políticas de eficiência energética em escalas mais amplas, como na esfera nacional.

Uma tendência nesse sentido são programas que permitem a avaliação do parque construído e não somente uma edificação, como ocorre com as ferramentas UMI – *Urban Modeling Interface* –, *CitySIM* e CEA – *City Energy*

*Analyst*. Essas ferramentas, além de permitirem investigar o desempenho termoenergético do parque construído como um todo, também podem avaliar o conforto térmico do ambiente urbano. Isso permite a avaliação de forma mais holística, contudo, especificamente a respeito do impacto da vegetação na escala urbana, sua capacidade de análise nesse contexto ainda é limitada, pois não equaciona adequadamente questões relativas à umidade da evapotranspiração das plantas.

A Figura 2 a seguir sintetiza as escalas de atuação de cada tipo de ferramenta de modelagem computacional.

Figura 2. Ferramentas de modelagem computacional e suas escalas de atuação



Fonte: Autores (2020).

Outra questão relevante é quanto ao fluxo de trabalho, interoperabilidade e troca de informação entre ferramentas. Apesar de trabalhos, como Santos *et al.* (2019), utilizarem múltiplas ferramentas para análise multiescala, a troca de informações entre as ferramentas ocorre de forma analógica, o que dificulta a troca de informações e possibilita perda de informação. Isso prejudica a qualidade de uma avaliação holística, assim como consome mais tempo para sua execução.

Ferramentas de linguagem de programação visual para programas de relacionados ao ambiente construído têm se popularizado recentemente, como *Grasshopper*, *Dynamo*, *Marionette* e *Houdini*. Essas ferramentas criam uma interface que permite maior integração de diversos programas, com uma

melhor comunicação de dados, visto que são interfaces de programação que não exigem a escrita de linhas de código, uma programação mais amigável. Dessa forma, essas interfaces criam ecossistemas com uma vasta disponibilidade de ferramentas todas em um mesmo lugar e como acesso aos mesmos bancos de informações.

Este contexto é especialmente relevante se o ambiente é de código aberto (*open-source*), como é o caso do *Grasshopper*, pois permite o desenvolvimento por diversos agentes, o que acelera seu desenvolvimento. Atualmente, diversas ferramentas já são acessíveis no *Grasshopper*, desde o *EnergyPlus* e sua interface gráfica *OpenStudio*, por meio do *plugin* Honeybee, o ENVI-met, pelo *plugin* Guismo, o Qgis pelo *plugin* Heron, assim como a importação de imagens de satélite por meio do Dragonfly. Esse ecossistema favorece trocas e otimiza o tempo de trabalho.

Conclui-se que as ferramentas de modelagem computacional podem auxiliar a avaliação da incorporação de EV nos centros urbanos, apoiando a tomada de decisão de políticas públicas de planejamento em prol da melhoria da qualidade ambiental das cidades. Essas ferramentas são valiosas para os gestores, pois trazem evidências às decisões projetuais (*evidence-based design*) sobretudo por possibilitarem melhor identificação e avaliação de estratégias de controle ambiental. Por fim, garante-se que com o conhecimento, divulgação, uso e evolução das plataformas, assim como com a melhoria da interoperabilidade, as ferramentas ambientais possuem potencial cada vez mais vasto.

## **AGRADECIMENTOS**

Este trabalho é parcialmente financiado por fundos internacionais por meio da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto UIDB/04647/2020 do CICS.NOVA – Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais da Universidade Nova de Lisboa, Portugal.

O terceiro autor é financiado por fundos internacionais por meio da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito da Norma Transitória - DL 57/2016/CP1453/CT0004.

O segundo autor agradece à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF), pela Bolsa de Pós-Doutorado que subsidia parte desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDRI, E., JONES, P. Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. **Building and Environment**, v. 43, n. 4, p. 480-493, 2008.
- ARAÚJO, S. R. **As funções dos telhados verdes no meio urbano, na gestão e no planejamento de recursos hídricos**. 2007. Monografia (graduação em Engenharia Florestal) – Instituto de Florestas, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, Rio de Janeiro, 2007.
- ATHIENITIS, A.; O'BRIEN, W. **Modeling, design and optimization of net-zero energy buildings**. Alemanha: Ernst & Sohn GmbH & Co., 2015. ISBN 978-3-433-03083-7.
- AUGENBROE, G. The role of simulation in performance-based buildings. In: HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. (Orgs.). **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011. cap. 2, p. 15-36.
- BOWE, P. The evolution of the ancient greek garden. **Studies in the History of Gardens and Designed Landscapes**, v. 30, n. 3, p. 208-223. 2010. DOI: 10.1080/14601170903403264
- BRUSE, M. ENVI-met 3.0: updated model overview. 2004. Disponível em: <http://www.envi-met.net/documents/papers/overview30.pdf>
- COLLINS, M. *et al.* Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: Climate change 2013: the physical science basis. In: STOCKER, T.F.; QIN, D. *et al.* (eds.). **Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- DEPARTMENT OF HUMAN SERVICES. Heatwave in Victoria: an assessment of health impacts. **State of Victoria Report**. Melbourne, Victoria: Victorian Government Department of Human Services, 2009. Disponível em: <https://www2.health.vic.gov.au/about/publications/researchandreports/January-2009-Heatwave-in-Victoria-an-Assessment-of-Health-Impacts>
- DEWILDE, P. **Building performance analysis**. Wiley-Blackwell, 2018. ISBN-10: 9781119341925.
- DHAINAUT, J.; CLAESSENS, Y.; GISNBURG, C. *et al.* Unprecedented heat-related death during the 2003 heat wave in Paris: consequences on emergency departments. **Crit Care**, v. 8, n. 1, p. 1-2, 2004.
- DOMINIQUE, M.; TIANA, R.H.; FANOMEZANA, R.T. *et al.* Thermal behavior of green roof in reunion island: contribution towards a net zero building. **Energy Procedia**, v. 57, p. 1908-1921, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.055>
- ESTRADA, F.; TOL, R. A global economic assessment of city policies to reduce climate change impacts. **Nature Clim. Change**, n. 7, p. 403-406, 2017. DOI 10.1038/nclimate3301.

- GABRIEL, K. M. A.; ENDLICHER, W. R. Urban and rural mortality rates during heat waves in Berlin and Brandenburg, Germany. **Environment Pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 2044-2050, 2011.
- GAGLIANO, A.; DETOMMASO, M.; NOCERA, F. *et al.* A multi-criteria methodology for comparing the energy and environmental behavior of cool, green and traditional roofs. **Building and Environment**, v. 90, p. 71-81, 2015. ISSN 0360-1323. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.043>.
- GEHRELS, H. *et al.* Designing green and blue infrastructure to support healthy urban living. **TO2 Federatie**. June 2016.
- GOMES, M.G.; M. SILVA, C.; VALADAS, A.S. *et al.* Impact of vegetation, substrate, and irrigation on the energy performance of green roofs in a mediterranean climate. **Water**, n. 11, 2016. 2019. doi.org/10.3390/w11102016
- HAMILTON, D.K.; WATKINS, D.H. **Evidence-based design for multiple building types**. Wiley, 2008. ISBN: 978-0-470-12934-0
- HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. Introduction to building performance simulation. In: HENSEN, J.L.M.; LAMBERTS, R. (Orgs.). **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011. cap. 1, p. 1-14.
- HERATH, H. M. P. I. K.; HALWATURA, R. U.; JAYASINGHE, G. Y. Modeling a tropical urban context with green walls and green roofs as an urban heat island adaptation strategy. **Procedia Engineering**, n. 212, p. 691-698, 2018.
- HOWARD, L. **The climate of London**. Deduced from meteorological observations made in the metropolis and various places around it. London: Harvey and Darton, 1833.
- KEELER, M.; BURKE, B. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- LI, W .C.; YEUNG, K.K.A. A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 3, n. 1, p. 127-134, 2014.
- MALEKI, A.; MAHDAVI, A. Evaluation of urban heat islands mitigation strategies using 3dimensional urban micro-climate model ENVI-met. **Asian Journal of Civil Engineering**, v. 17, n. 3, p. 357-371, 2016.
- MARUYAMA, H.; YAMAGATA, Y. **Urban resilience: a transformative approach (advanced sciences and technologies for security applications)**. Cham: Springer International Publishing, 2016.
- MEINERS, S. J.; STEWARD, T. A.; CADENASSO, P. *et al.* Exotic plant invasion over 40 years of old field succession: community patterns and associations. **Ecography**, v. 25, p 215-223, 2002.
- MORAKINYO, T.; LAI, A.; LAU, K. K. *et al.* Thermal benefits of vertical greening in a high-density city: Case study of Hong Kong. **Urban Forestry & Urban Greening**, n. 37, p. 42-55, 2019.
- NASCIMENTO, M. S. B.; OLIVEIRA, M. E. **Diversidade e uso de plantas nativas**. 2005. Disponível em: [http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2005/artigo.2005.05.8820647 706/](http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2005/artigo.2005.05.8820647%20706/)
- NIEMELÄ, J.; SAARELA, S.; SÖDERMAN, T. *et al.* Using the ecosystem services approach for better planning and conservation of urban green spaces: a finland case study. **Biodiversity and Conservation**, v. 19, n. 11, p. 3225-3243, 2010. DOI:10.1007/s10531-010-9888-8

- NORTON, B. A.; COUTTS, A. M.; LIVESLEY, S. J. *et al.* Planning for cooler cities: a framework to prioritise green infrastructure to mitigate high temperatures in urban landscapes. **Landscape and Urban Planning**, v. 134, p. 127-138, 2015.
- ONU. **Global Report On Human Settlement**. UN-HABITAT. 2011. ISBN: 978-92-1-132296-5.
- ÖZYAVUZ, M.; AYDIN, B. K.; ERTIN, D. G. The effects of green roofs on urban ecosystems. **GreenAge III Symposium**, 15-17 de abril de 2015, Istanbul, Turquia.
- RAZZAGHMANESH, M.; BEECHAM, S.; SALEMI, T. The role of green roofs in mitigating urban heat island effects in the metropolitan area of Adelaide, South Australia. **Urban Forestry & Urban Greening**, n. 15, p. 89-102, 2016.
- REVICH, B. Heat-wave, air quality and mortality in European Russia in summer 2010: Preliminary assessment. **Yekologiya Cheloveka/Human Ecology**, n. 7, p. 3-9, 2011.
- ROCHA, Y. T.; MATTHE, L. A. F.; RODRIGUES, R. R. Levantamento florístico de maciço de vegetação nativa do brejo integrado a projeto paisagístico. **Revista Brasileira de Horticultura Ornamental**, Campinas, v 1, n 2, p. 86-92, 1995.
- ROMERO, A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. 2. ed. Brasília: Editora UnB, 2013.
- ROMERO, M. A. B.; BAPTISTA, G. M.; AZEVEDO, E. *et al.* **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. Brasília: Editora UnB, 2019.
- SALMOND, J.A.; TADAKI, M.; VARDOULAKIS, S. *et al.* Health and climate related ecosystem services provided by street trees in the urban environment. **Environ Health**, n. 15, S36, 2016. <https://doi.org/10.1186/s12940-016-0103-6>.
- SANTAMOURIS, M. Cooling the cities - a review of reflective and green roof mitigation technologies to fight heat island and improve comfort in urban environments. **Solar Energy**, n. 103, p. 682-703, 2014. DOI: 10.1016/j.solener.2012.07.003.
- SANTOS, T.; TENEDÓRIO, J. A.; GONÇALVES, J. A. Quantifying the city's green area potential gain using remote sensing data. **Sustainability**, v. 8, n. 12, p. 1247, 2016.
- SANTOS, T.; GOMES, N.; FREIRE, S. *et al.* Applications of solar mapping in the urban environment. **Applied Geography**, n. 51, p. 48-57, 2014.
- SANTOS, T.; SILVA, C.; TENEDÓRIO, J. A. Promoting citizens' quality of life through green urban planning. In: LAURINI, R. R.; ROCHA, J. G. **Geographical information systems theory, applications and management, communications in computer and information Science**. [s/l]: Springer International Publishing, 2019. p. 153-175.
- SCHWAB, K. **The fourth industrial revolution**. Geneva: World Economic Forum, 2016.
- SILVERA SEAMANS, G. Mainstreaming the environmental benefits of street trees. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 12, n. 1, p. 2-11, 2013. DOI: 10.1016/j.ufug.2012.08.004.
- TALEGHANI, M. Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 81, 2011-2018, 2018.
- ÜRGE-VORSATZ, D. *et al.* Buildings. In: Mitigation. **Working Group III contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change**, p. 671-738, 2014.

- VALESAN, M.; FEDRIZZI, B.; SATTLER, M. A. Vantagens e desvantagens da utilização de peles-verdes em edificações residenciais em Porto Alegre segundo seus moradores. **Ambient. constr.**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 55-67, 2010.
- WETTER, M.; NOUIDUI, T. S.; LORENZETTI, D. *et al.* Prototyping the next generation energyplus simulation engine. **14th Conference of International Building Performance Simulation Association**, Hyderabad, India, Dec. 7-9, 2015.
- WONG, N.H.; CHEONG, D.K.W.; YAN, H. *et al.* The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. **Energy and Buildings**, n. 35, p. 353-364, 2003.
- ZÖLCH, T.; MADERSPACHER, J.; WAMSLER, C. *et al.* Using green infrastructure for urban climate-proofing: An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale. **Urban Forestry and Urban Greening**, n. 20, p. 305-316, 2016.

