

UMA FERRAMENTA PARA CÁLCULO DA MÁXIMA INTENSIDADE DA ILHA DE CALOR NOTURNA

**Camila Mayumi Nakata-Osaki (1); Léa Cristina Lucas de Souza (2);
Daniel Souto Rodrigues (3)**

(1) Arquiteta e urbanista, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, camilanakata@yahoo.com.br, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235 – São Carlos-SP, 13565-905, Tel.: (16) 3351 8295

(2) Doutora, Professora do Departamento de Engenharia Civil, leacrist@ufscar.br, Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235 – São Carlos-SP, 13565-905, Tel.: (16) 3351 8295

(3) Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Civil, dsr@civil.uminho.pt, Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057 Braga, Portugal, Tel.: +351 253 604 726

RESUMO

O objetivo deste artigo é verificar a influência da geometria urbana na intensidade de ilhas de calor noturnas com uso de uma ferramenta computacional desenvolvida como extensão de um SIG. O método deste trabalho está dividido em três principais etapas: desenvolvimento da ferramenta, calibração do modelo e simulação de cenários hipotéticos com diferentes geometrias urbanas. Um modelo simplificado que relaciona as intensidades máximas de ilha de calor urbana (ICUmáx) com a geometria urbana foi incorporado à sub-rotina de cálculo e, posteriormente, adaptado para fornecer resultados mais aproximados à realidade de duas cidades brasileiras, as quais serviram de base para a calibração do modelo. A comparação entre dados reais e simulados mostraram uma diferença no aumento da ICUmáx em função da relação H/W e da faixa de comprimento de rugosidade (Z_0). Com a ferramenta já calibrada, foi realizada uma simulação de diferentes cenários urbanos, demonstrando que o modelo simplificado original subestima valores de ICUmáx para as configurações de cânions urbanos de $Z_0 < 2,0$ e superestima valores de ICUmáx para as configurações de cânions urbanos de $Z_0 \geq 2,0$. Além disso, este estudo traz como contribuição à verificação de que cânions urbanos com maiores áreas de fachadas e com alturas de edificações mais heterogêneas resultam em ICUmáx menores em relação aos cânions mais homogêneos e com maiores áreas médias ocupadas pelas edificações, para um mesmo valor de relação H/W. Essa diferença pode ser explicada pelos diferentes efeitos na turbulência dos ventos e nas áreas sombreadas provocados pela geometria urbana.

Palavras-chave: geometria urbana, ilha de calor noturna, SIG.

ABSTRACT

The aim of this paper is to verify the influence of urban geometry in the intensity of nocturnal heat islands using a computational tool developed as an extension of a GIS. The method is divided into three main stages: development of the tool, calibration of the model, and simulation of hypothetical scenarios with different urban geometries. A simplified model that relates the maximum intensities of urban heat island (ICUmáx) with urban geometry was incorporated into the sub-routine and subsequently adapted to provide reliable results in relation to two Brazilian cities, which were the basis for the model calibration. A comparison between real and simulated data show a difference in the growth of the ICUmáx as a function of H/W ratio and of the roughness length range (Z_0). With the previously calibrated tool, a simulation of different urban settings was performed, demonstrating that the original simplified model underestimates ICUmáx values for urban canyons settings of $Z_0 < 2,0$ and overestimates ICUmáx values for urban canyons settings of $Z_0 \geq 2,0$. In addition, this study brings a contribution to finding that urban canyons with larger areas of facades and more heterogeneous heights of buildings result in lower ICUmáx in relation to more homogeneous canyons with highest average areas occupied by the buildings, for the same H/W ratio. This difference can be explained by the different effects on the turbulence of the wind and the shaded areas caused by urban geometry.

Keywords: urban geometry, nocturnal heat island, GIS.

1. INTRODUÇÃO

A formação da ilha de calor urbana (ICU ou UHI – *Urban Heat Island*) é um fenômeno amplamente abordado em pesquisas na área de planejamento urbano. Trata-se do aumento de temperatura do ar dos centros urbanos em relação aos seus arredores ('área rural'), sendo abordada como a diferença entre o valor de temperatura desses centros urbanos e a área rural, que define a 'intensidade da ilha de calor urbana (ΔT_{u-r})' (OKE, 1987). Esse aumento de temperatura pode ser benéfico em cidades de altas latitudes e clima mais fresco, mas pode causar muitas consequências indesejáveis, como o desconforto térmico humano e aumento significativo de uso de ar-condicionado em cidades de latitudes médias e baixas.

A ilha de calor urbana tem como causa as próprias modificações feitas pelo homem na urbanização, como o uso de materiais impermeáveis, as diferentes propriedades térmicas de materiais utilizados na construção, o calor antropogênico, a poluição do ar e a geometria das superfícies (OKE, 1981).

Nas pesquisas de ICU, muitos investigadores utilizam o cânion urbano como uma forma de se identificar uma unidade geométrica da cidade. O cânion urbano é descrito por condições apresentadas por uma longa rua com edifícios altos de ambos os lados (PRIYADARSINI et al., 2008). Em estudos de microescala, a geometria de espaços abertos pode ser o parâmetro mais relevante responsável pela variação do microclima (OKE, 1988; ALI-TOUDERT; MAYER, 2006; BOURBIA; BOUCHERIBA, 2010).

De forma a representar a geometria urbana, o 'fator de visão do céu' (FVC, ou SVF de *Sky View Factor* em inglês) e a 'relação H/W' (*height/width ratio*) são muito utilizados como indicadores das condições geométricas do cânion urbano. O FVC é definido como a fração do céu que pode ser vista a partir de certo ponto do cânion urbano. A relação H/W é a altura das edificações dividida pela largura da rua. Quanto menor o FVC, maior é a relação H/W, e menor é a área de céu visível e de dissipação da radiação de ondas longas, reduzindo, assim, a taxa de resfriamento das áreas urbanas através da redução do transporte turbulento devido ao abrigo do vento e da quantidade de calor antropogênico liberado (OKE, 1987).

Durante o dia, o cânion urbano tende a acumular calor oriundo da radiação de ondas curtas recebida pelas superfícies, promovendo seu aquecimento, enquanto, principalmente no período noturno, é liberado calor em forma de radiação de ondas longas (primeiras horas após o pôr-do-sol). A ilha de calor urbana é tratada, então, como um fenômeno tipicamente noturno (OKE, 1981).

Procurando demonstrar o balanço energético de um cânion, Oke (1987) analisou cânions implantados sobre o eixo de direção Norte-Sul. A direção Leste-Oeste foi evitada neste caso, pois em função do sombreamento de um lado da rua sobre o outro, somente as paredes de faces voltadas à Sul poderiam receber radiação solar no hemisfério Norte. No caso de ruas de direção Norte-Sul, independente do hemisfério, as paredes de ambos os lados da rua recebem insolação, seja a parede de face Leste no período da manhã, ou a parede de face Oeste no período da tarde.

De acordo com Theeuwes et al. (2014), a relação entre H/W e a ICU é muito complexa, podendo ser explicado por dois processos que se contrapõem. Primeiro, pelo processo de aprisionamento da radiação de ondas-longas, em que o calor é mantido dentro do cânion urbano, conforme os edifícios se tornam mais altos e a largura da rua menor, tendo um efeito de aumento na ICU. Segundo, pelo processo de sombreamento, o qual inibe o aquecimento do cânion e tem um efeito de diminuir a ICU na camada de cobertura urbana. Com ruas mais estreitas, menos radiação solar alcançará o interior do cânion, levando a um menor aquecimento durante o dia.

Bourbia e Boucheriba (2010) analisaram e compararam a influência da variação do cânion urbano no microclima, com medições em sete pontos durante período de 24h no centro da cidade de Constantina (Argélia), caracterizada por ser uma estrutura urbana muito densa, de clima semiárido, localizada sob as coordenadas 36,17°N e 07,23°L. Uma comparação entre pontos medidos indicaram, naquele estudo, que o ponto de maior relação H/W e menor FVC apresentou ambiente mais fresco. Os mesmos autores constatarem que a variação no comportamento térmico das ruas medidas pode estar relacionada ao efeito da geometria, que cria uma certa falta de simetria em relação à exposição solar do cânion urbano durante o dia. Proteger as superfícies da radiação solar é uma das mais importantes estratégias para a redução da carga de calor em um clima quente e seco.

Em comparação com a paisagem circundante, a cidade normalmente oferece um conjunto mais rugoso, mais quente e superfícies mais secas. As edificações são os principais elementos de rugosidade de uma cidade. Oke (1987) sugere que seja feita uma classificação de terrenos urbanizados em comprimento de rugosidade (Z_0): de 0,2 à 0,6 para terrenos abertos (como fazendas e vilas); de 0,4 à 1,8 para terrenos em áreas suburbanas (de baixa densidade); e de 1,5 à 10 para terrenos em áreas urbanas (de alta densidade). O comprimento de rugosidade é um parâmetro utilizado, geralmente, em estudos de análise das alterações no fluxo de ventos, mas que vem sendo utilizado e adaptado por alguns pesquisadores (SUGAWARA;

NARITA, 2009; KANDA; MORIIZUMI, 2009; VOOGT; GRIMMOND, 2000) para a análise de fluxo de calor no ambiente urbano.

1.1 Delimitação da abordagem

Oke (1981) desenvolveu um modelo empírico de previsão de intensidade máxima de ilhas de calor ($\Delta T_{(u-r)max}$) a partir da relação H/W, para dias calmos e sem nuvens. O modelo de Oke (1981) se tornou referência na área, por sua importância em estudos de análise de relação entre geometria urbana e formação de ilhas de calor. Entretanto, aquele modelo baseou-se em levantamentos realizados em cidades da Europa, América do Norte e Australásia, caracterizando climas urbanos diferenciados daqueles encontrados no território brasileiro.

A adaptação do modelo simplificado de Oke para um modelo numérico em uma ferramenta computacional pode ampliar as possibilidades de análises e facilitar a aplicação do mesmo por diferentes pesquisadores.

No caso de programas de computador, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) merecem destaque, pois possuem habilidade de armazenar relações topológicas entre objetos geográficos (representados, por exemplo, por pontos, linhas ou áreas) e destes objetos com dados tabulares (alfanuméricos), contendo as mais diversas informações. Além de possuírem inúmeras ferramentas de análise incorporadas nos próprios pacotes comerciais, os SIG cada vez mais assumem destaque, pelo fato de se constituírem em uma plataforma sobre a qual se pode desenvolver e incorporar novas técnicas e métodos de planejamento territorial (SILVA et. al., 2004).

Alguns pesquisadores desenvolveram modelos de avaliação do ambiente térmico urbano com métodos de SIG para diferentes escalas de abordagem e objetivos, como previsão de temperatura do ar, conforto térmico humano e dinâmica dos ventos (JUSUF; HIEN, 2009; UNGER, et al., 2011; SVENSSON et al., 2003; CHEN; NG, 2011). As ferramentas de cálculo de ilha de calor urbana, por tratarem de um fenômeno de alta complexidade, procuram selecionar apenas alguns parâmetros para dados de entrada e saída, simplificando o processo de cálculo de balanço energético na camada urbana. Na maioria dos casos, objetiva-se isolar um parâmetro para facilitar a interpretação de sua influência nas temperaturas urbanas.

Nesse contexto, o programa ArcGIS apresenta potencial para o desenvolvimento de uma ferramenta desse tipo. O ArcGIS se configura em um SIG que vem sendo continuamente atualizado, possuindo diversas ferramentas de representação e análise espacial. Dada então a importância do modelo de Oke em estudos de previsão de ilha de calor pela geometria urbana e das amplas possibilidades em programação que o ArcGIS 10 fornece, é proposta nesta pesquisa a adaptação do modelo simplificado de Oke para a plataforma SIG.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é verificar a influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor noturnas, com uso de uma ferramenta computacional desenvolvida como extensão de um SIG.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido nas seguintes etapas:

1. Desenvolvimento da ferramenta;
2. Calibração do modelo;
3. Simulação de cenários hipotéticos com diferentes geometrias urbanas.

3.1. Desenvolvimento da ferramenta

A ferramenta computacional foi desenvolvida no SIG ArcGIS 10.2, programa no qual foi incorporada uma sub-rotina de cálculo através de uma macro (sequências de tarefas já programadas e disponibilizadas pelo programa). Para isso, a concepção da sub-rotina considera que o modelo de Oke (1981) é a base de cálculo da máxima intensidade da ilha de calor, tendo como referência o valor de relação H/W. Além disso, como a relação H/W do modelo de Oke é fundamentada em um cânion homogêneo infinito e a realidade das cidades na maioria das vezes não corresponde a essa configuração, adotou-se uma forma de incorporar a heterogeneidade do terreno urbanizado através da classificação de rugosidade proposta por Oke (1987). Dessa forma, adapta-se o modelo ao SIG, através de uma sub-rotina que traduz em códigos o algoritmo que foi desenvolvido para realizar os seguintes cálculos:

- a. cálculo da relação H/W;
- b. cálculo da $\Delta T_{(u-r)max}$ pelo modelo de Oke;

- c. classificação das quadras em comprimento de rugosidade (Z_0); e
- d. cálculo da $\Delta T_{(u-r)\max}$ pelo modelo adaptado.

Os cálculos ‘c’ e ‘d’ foram incluídos no algoritmo após a comparação de dados reais de intensidade de ilha de calor com os resultados obtidos pelo modelo simplificado de Oke. Os dados medidos demonstraram diferentes comportamentos para diferentes faixas de Z_0 . Dessa forma, o cálculo de Z_0 foi incorporado ao código para que o SIG pudesse realizar a classificação das quadras e a aplicação da equação de correção destinada à faixa de Z_0 correspondente. O tópico ‘3.2. Calibração do modelo’ descreve de forma mais detalhada esse procedimento de calibração do modelo às áreas urbanas medidas.

Os dados de entrada necessários para a realização dos cálculos são um arquivo criado no SIG, contendo: duas camadas (*shapefiles*), representando os edifícios em ‘polígonos’ (com a informação da altura em metros contida na tabela de atributos) e os eixos das vias em ‘linhas contínuas’ (*polyline*), que é utilizada como referência para o cálculo de H/W. Além disso, é necessário que o usuário forneça uma medida de proximidade mínima desejada entre os edifícios e a linha de eixo (‘raio de proximidade’), pois esse raio determina os edifícios que efetivamente são considerados no cálculo de H/W. Os dados de saída fornecidos pela ferramenta são: a classificação das quadras em Z_0 e a relação H/W; e, os valores de intensidade máxima da ilha de calor simulada pelo modelo de Oke e pelo modelo adaptado (calibrado).

A partir dos dados de entrada inseridos pelo usuário, a sub-rotina executa, inicialmente, um série de associações espaciais. As linhas contínuas de eixos são subdivididas em fragmentos com base nas intersecções de eixos, determinando assim o conjunto de prédios a ser considerado em cada quadra-base de cálculo. Conforme a Figura 1a, com base no valor de ‘raio de proximidade’, a sub-rotina selecionará os edifícios que ‘pertencem’ a cada quadra-base (no exemplo, o raio de proximidade é igual a 20m). Cada edifício será vinculado à quadra a que pertence (Figura 1b) que, por sua vez, estará associada às linhas de eixo que as delimitam (Figura 1c).

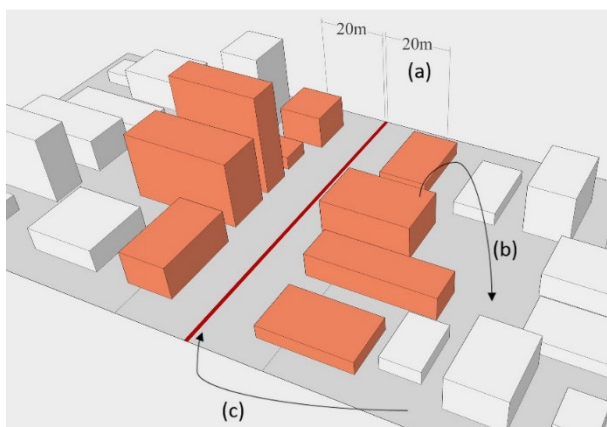


Figura 1 – Associações espaciais do algoritmo para cálculo da relação H/W por eixo de quadra: (a) raio de proximidade a partir da linha de eixo de, por exemplo, 20m; (b) associação dos edifícios com a quadra; (c) associação da quadra ao eixo que a delimita.

A partir desse momento, são executadas associações espaciais, para cálculo de relação H/W, e numéricas para o cálculo do modelo de Oke (Equação 1, adaptada de OKE, 1981). Para este estudo, é considerada para a medida de largura da via (W) a somatória da largura da rua, das calçadas e da medida do recuo frontal à edificação, caso exista.

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 7,45 + 3,97 \times \ln(H/W) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$\Delta T_{u-r(\max)}$ é a intensidade máxima da ilha de calor (°C);

H é a média da altura das edificações da quadra urbana (m);

W é a largura média da via medida de face à face das edificações do cânion urbano (m).

O cálculo para a classificação das quadras em Z_0 (Equação 2, adaptada de OKE, 1987) é, na sequência, incorporado à sub-rotina. Considera-se para o cálculo de A^* as fachadas voltadas ao centro do cânion urbano.

$$Z_0 = 0,5h (A^*/A') \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Z_0 é o comprimento da rugosidade (m);

h é a altura média das edificações da quadra urbana (m);

A^* é a área média da fachada voltada ao centro do cânion urbano (m^2);
 A' é a área média ocupada por cada edificação (total) da quadra urbana (m^2).

Por fim, a sub-rotina aplica as equações de correção. Dessa forma, garantem-se resultados mais aproximados à realidade das cidades brasileiras, as quais serviram de base para a calibração da ferramenta neste estudo.

3.2. Calibração do modelo

A calibração do modelo foi realizada com base na comparação de dados reais levantados com os resultados do cálculo pelo modelo teórico simplificado de Oke. Dessa forma, foi proposto um ajuste da ferramenta de simulação, a partir da realidade de duas cidades brasileiras selecionadas para o estudo. O procedimento foi realizado em 8 etapas, organizadas no fluxograma da Figura 2 e executadas na ordem que segue.

1. Levantamento de dados meteorológicos e obtenção de valores de $\Delta T_{(u-r) \max}$ para cada ponto.
2. Representação da geometria urbana das áreas de estudo no SIG.
3. Cálculo da geometria urbana.
4. Cálculo da $\Delta T_{(u-r) \max}$ com base no modelo de Oke.
5. Comparação dos dados reais medidos com os dados simulados.
6. Obtenção das equações de correção por categoria de Z_0 .
7. Classificação das quadras urbanas pelo valor de Z_0 .
8. Incorporação das equações de correção à sub-rotina de cálculo.

As etapas 3, 4, 7 e 8 são desenvolvidas dentro do ambiente da sub-rotina de cálculo incorporada ao SIG.

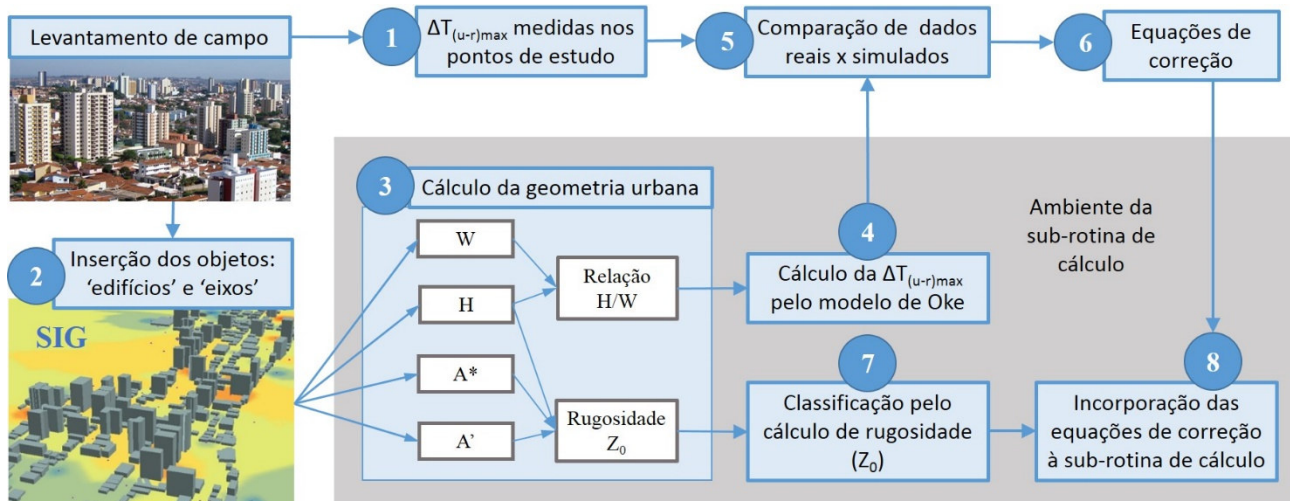


Figura 2 – Fluxograma da calibração do algoritmo para os dados levantados nas áreas de estudo.

3.2.1. Caracterização dos pontos de estudo e instrumentação

Para fins de calibração do modelo, foram realizados levantamentos de campo em pontos de estudo que caracterizam cânions com diferentes valores de relação H/W. As áreas de estudo estão localizadas nas cidades de São José do Rio Preto e Bauru (ambas no interior do estado de São Paulo). A cidade de São José do Rio Preto localiza-se sob as coordenadas 20°49'12"S e 49°22'44"O, a 443 km de distância da capital São Paulo, situada em uma altitude média de 489 metros, possuindo área de 431,96 km² e população de 438.354 habitantes (IBGE, 2014). A cidade de Bauru está localizada sob as coordenadas 22°18'54"S e 49°03'39"W e encontra-se a 345 km da capital, com altitude média de 526 m, área de 667,68 km² e população de 364.562 (IBGE, 2014).

Foram obtidos desses levantamentos dados meteorológicos de 21 pontos de estudo, todos localizados em ruas de eixos de direção Norte-Sul (ou com tendência à direção NE-SO/NO-SE). Foram selecionados somente dias estáveis, sem ocorrência de chuvas ou nevoeiros, de céu claro (baixa nebulosidade, menor que 50%) e baixa velocidade média de vento (menor que 2,0 m/s). Os dados obtidos da cidade de São José do Rio Preto foram levantados em junho de 2013 e outubro de 2012 (em colaboração com MASIERO, 2014), e os dados obtidos da cidade de Bauru foram levantados em junho e julho de 2005 (por LEME, 2005). Os valores de $\Delta T_{u-r(\max)}$ dos dias medidos foram selecionados no período noturno, nas primeiras horas após o pôr do sol (entre 18h e 22h). Os pontos com valores de relação H/W iguais ou consecutivos (na faixa de 0,15 à

0,23) foram submetidos a um tratamento estatístico (calculando-se as médias) antes de serem comparados com os valores resultantes da simulação pelo modelo de Oke.

Os equipamentos utilizados nos pontos de coleta de São José do Rio Preto foram *data-loggers* da HOBO Pro v2, modelo U23-001, marca ONSET, com sensores de temperatura (de -40 a 70°C), com resolução de 0,02°C à 25°C, e umidade (0-100%). Em Bauru foram utilizados *data-loggers* HOBO H8 Pro Series Temp/External Temp H08-031-08, da marca ONSET, com sensores de temperatura do ar (de -30° a 50°C) e externa/superficial (-40° a 100°C), com resolução de 0,02°C a 21°C em modo de alta resolução. Os equipamentos foram fixados em postes de fornecimento de energia, a 3 metros de altura, com orientação a sul. Todos os equipamentos utilizados possuem proteção contra radiação solar direta e chuva.

3.3. Simulação de cenários hipotéticos com diferentes geometrias urbanas

Com a sub-rotina concluída, é proposta, neste artigo, uma simulação de 12 cenários urbanos hipotéticos, que correspondem a diferentes configurações de quadras urbanas, tanto no valor de relação H/W, quanto ao comprimento de rugosidade (Z_0), já que ambos os parâmetros são calculados pela própria sub-rotina.

Os resultados e análise dessa simulação são apresentados no tópico '4.2. Aplicação da ferramenta desenvolvida em simulação de diferentes cenários urbanos'.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este tópico é dividido em duas partes: a apresentação dos dados que subsidiaram a calibração do modelo e a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilha de calor noturna, através da simulação de diferentes cenários urbanos hipotéticos com a ferramenta calibrada.

4.1. Relação entre dados reais e simulados pelo modelo simplificado de Oke

A comparação entre dados reais e simulados pelo modelo de Oke demonstrou uma tendência crescente da $\Delta T_{u-r(max)}$ em relação ao valor de H/W, mas comportamentos diferenciados para duas faixas de Z_0 (Figura 3).

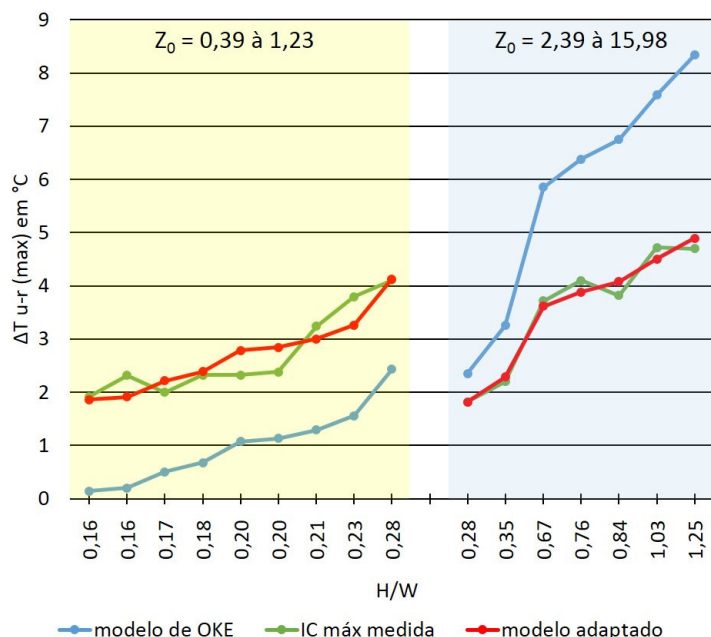


Figura 3 – Valores de intensidade máxima de ICU obtidas pelo modelo de Oke, medição e modelo adaptado.

A faixa de ' $Z_0 = 0,39$ à $1,23$ ' apresenta a relação entre valores de intensidade máxima de ilha de calor para uma faixa de relação H/W entre 0,16 e 0,28. Os valores medidos encontram-se acima dos simulados pelo modelo de Oke com diferenças de 1,25°C a 2,25°C. O coeficiente de determinação dessa relação é de $R^2 = 0,80$ com desvio padrão de 1,15.

A faixa de ' $Z_0 = 2,39$ à $15,98$ ' apresenta resultados para a faixa de relação H/W de 0,28 à 1,25. Existe uma maior correlação entre as curvas dos valores simulados pelo modelo de Oke e a dos dados reais, que também apresenta uma relação diretamente proporcional à relação H/W, mas de forma menos acentuada que a do modelo de Oke. A curva dos dados reais, no entanto, ficou abaixo da curva de valores do modelo de

Oke com diferenças que variam de 0,53°C a 3,63°C. Essa relação apresentou um coeficiente de determinação de $R^2 = 0,97$, com desvio padrão de 2,13.

Os desvios encontrados podem ser explicados pela interferência de outros parâmetros que não seja a geometria urbana (vento, calor antropogênico, propriedades dos materiais, vegetação, etc.).

Analisando ainda o gráfico da Figura 3, constata-se que as configurações urbanas que estão na faixa de ' $Z_0 = 2,39$ à $15,98$ ' e H/W de 0,28 a 0,76 apresentam parte de seus resultados de ICU máxima (modelo adaptado) na mesma faixa de valores que as configurações urbanas que estão na faixa de ' $Z_0 = 0,39$ à $1,23$ ' e H/W de 0,16 a 0,28. Em outras palavras, cânions que apresentam maior rugosidade, mesmo que com valores médios de relação H/W maiores que os de cânions mais baixos e homogêneos (menor rugosidade) interferem nas máximas de ilhas de calor noturnas amenizando-as. Isso pode ser explicado pelo seu maior efeito no sombreamento, que reduz o armazenamento de calor por radiação de onda curta e, conseqüentemente, diminui a liberação de calor no período noturno através da radiação de onda longa.

A diferença de tendência notada entre essas duas faixas de Z_0 , serviu como um parâmetro adicional para a calibração do modelo de Oke às cidades analisadas neste estudo. Para que a ferramenta não apresentasse erros de cálculo de resultados para valores de Z_0 que não foram analisados, foram extrapolados os valores possíveis de Z_0 na inserção das equações no código da ferramenta. Essa extrapolação considera valores de Z_0 menores que '2,0' para o primeiro grupo, e os maiores ou iguais à 2,0 para o segundo grupo.

Entretanto, deve ficar claro que os testes com o modelo para dados reais foram realizados somente para as faixas de Z_0 entre 0,39 e 1,23 para o primeiro grupo e entre 2,39 e 15,98 para o segundo grupo, já que essas foram as faixas encontradas nas áreas de estudo. Em outras palavras, a ferramenta não garante dados validados para as áreas simuladas nas faixas de $Z_0 < 0,39$, de 1,23 à 2,39, e de $Z_0 > 15,98$, mas apenas uma previsão com base na calibração do modelo.

4.2. Aplicação da ferramenta desenvolvida em simulação de diferentes cenários urbanos

A fim de abranger uma ampla gama de cenários para a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor, foi determinado como critérios os seguintes valores de relação H/W: 0,25, 0,5, 1, 2, 3 e 4. Além disso, essa escala de relação H/W foi simulada tanto para valores de $Z_0 < 2,0$ quanto para $Z_0 \geq 2,0$. A Tabela 1 traz a identificação dos cenários simulados com base nesses critérios e a Figura 4 ilustra as geometrias desses cenários fornecidas como entrada.

Tabela 1 – Determinação dos critérios de relação H/W e Z_0 para as simulações de cenários urbanos

	Relação H/W:					
	0,25	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0
$Z_0 < 0,2$	Quadra A1	Quadra A2	Quadra A3	Quadra A4	Quadra A5	Quadra A6
$Z_0 \geq 2,0$	Quadra B1	Quadra B2	Quadra B3	Quadra B4	Quadra B5	Quadra B6

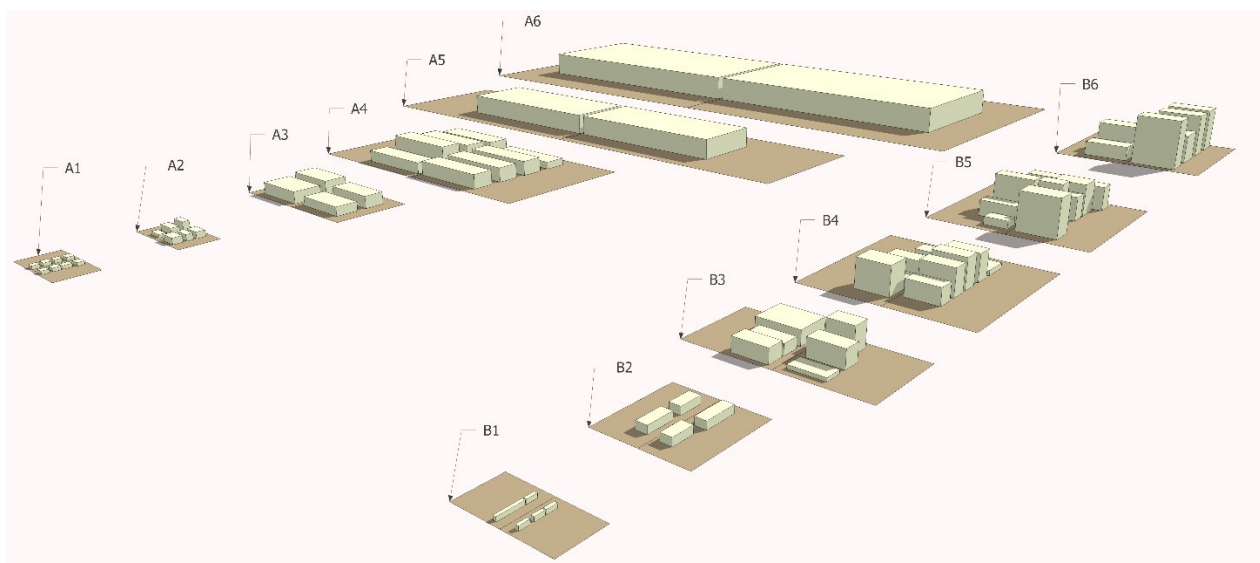


Figura 4 – Representação da geometria das 12 quadras urbanas (cenários hipotéticos) simuladas

Como forma de exemplificação para a compreensão da diferença entre esses cenários, podem ser associadas à essas geometrias as seguintes tipologias:

- A1 – habitação de interesse social;
- A2 – sobrado estreito;
- A3 – prédio de 4 andares e vários apartamentos;
- A4 – blocos de sala de aula;
- A5 – shopping center;
- A6 – indústria pesada;
- B1 – edifício de lazer pequeno;
- B2 – sobrado largo;
- B3 – prédio de 4 andares compacto (com possibilidade de variação nas alturas);
- B4 – prédio de 5 ou 6 andares (média, com possibilidade de maior variação);
- B5 – prédio de 8 a 10 andares (média, com possibilidade de maior variação);
- B6 – prédio de 10 a 13 andares (média, com possibilidade de maior variação).

Os resultados obtidos dessa simulação (Figura 5) demonstram que todos os cenários de $Z_0 < 2,0$ apresentaram valores de ICU máxima maiores em, aproximadamente, $1,66^\circ\text{C}$ em relação aos valores simulados pelo modelo de Oke. As curvas que as representam apresentam-se praticamente equidistantes entre si em toda a sua extensão. Com relação aos resultados obtidos pela simulação de cenários de $Z_0 \geq 2,0$, todos os valores de ICU máxima ficaram abaixo dos simulados pelo modelo de Oke, mas com diferenças que variaram de $0,34^\circ\text{C}$ a $5,69^\circ\text{C}$ (para os valores de H/W simulados), apresentando uma tendência de maior diferença conforme maior for a relação H/W.

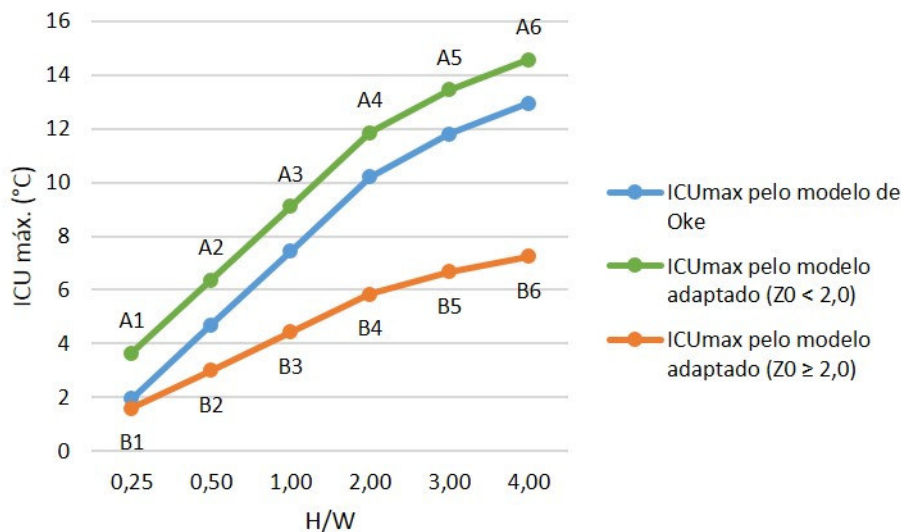


Figura 5 – Gráfico dos resultados da ICU máxima simulada pelo modelo de Oke e pelo modelo adaptado

Em todos os valores de relação H/W simulados, a intensidade máxima de ICU para cenários de menor rugosidade ($Z_0 < 2,0$) foi maior que dos cenários de maior rugosidade ($Z_0 \geq 2,0$), com diferença de $2,04^\circ\text{C}$ a $7,31^\circ\text{C}$, conforme aumenta-se o valor de relação H/W. Considerando a equação de cálculo de comprimento de rugosidade (Equação 2), cenários urbanos em que predominam edifícios com maior área ocupada em relação à área de fachada tendem a apresentar valores de ICU máx maiores do que os estimados pelo modelo de Oke, para os mesmos valores de relação H/W. Para os cenários urbanos em que as áreas das fachadas dos edifícios são predominantemente maiores que as áreas ocupadas pelos mesmos, os valores de ICU máx tendem a ser menores que os simulados pelo modelo de Oke, para os mesmos valores de relação H/W, se distanciando a medida que a relação H/W aumenta.

Realizando uma análise mais pontual, para os cenários de relação H/W = 2,0, por exemplo, verifica-se que mesmo os dois cenários simulados possuindo o mesmo valor médio de relação H/W, o cenário de $Z_0 < 2,0$ possui ICU máx ($\sim 12^\circ\text{C}$) duas vezes maior que o cenário de $Z_0 \geq 2,0$ ($\sim 6^\circ\text{C}$). Essa relação de ICU máx ser, aproximadamente, duas vezes maior de ‘cenários $Z_0 < 2,0$ ’ para ‘cenários $Z_0 \geq 2,0$ ’ se repete para todos os valores de H/W. O modelo adaptado sugere, então, que cânions urbanos de mesma relação H/W média, mas com diferentes valores Z_0 , podem apresentar ilhas de calor com diferença de até duas vezes maior de cânions

com edifícios de ocupação mais densa e homogêneos em relação à cânions mais heterogêneos com edifícios mais altos (maiores áreas de fachada).

A calibração do modelo, entretanto, se baseou em dados de relação H/W de 0,15 a 1,25. Portanto, os valores apresentados na simulação para as relações H/W de 2,00, 3,00 e 4,00 são previsões com base na extrapolação da calibração do modelo para os dados de geometria urbana medidos.

5. CONCLUSÕES

Este artigo propõe a verificação da influência da geometria urbana na intensidade máxima de ilhas de calor noturnas com o uso de uma ferramenta computacional desenvolvida como extensão de um SIG. O modelo simplificado de Oke (1981) incorporado à sub-rotina de cálculo foi adaptado para fornecer resultados mais aproximados à realidade de duas cidades brasileiras, as quais serviram de base para a calibração do modelo. A comparação entre dados reais e simulados pelo modelo de Oke mostraram uma diferença no aumento em função da relação H/W e da faixa de Z_0 .

A ferramenta desenvolvida foi utilizada em simulação de diferentes cenários urbanos, que demonstrou que o modelo de Oke subestima valores de $ICU_{máx}$ para as configurações de cânions urbanos de $Z_0 < 2,0$ e superestima valores de $ICU_{máx}$ para as configurações de cânions urbanos de $Z_0 \geq 2,0$. Além disso, este estudo traz como contribuição à verificação de que cânions urbanos com maiores áreas de fachadas e com alturas de edificações mais heterogêneas ($Z_0 \geq 2,0$) resultam em $ICU_{máx}$ menores em relação aos cânions mais homogêneos e com maiores áreas médias ocupadas pelas edificações ($Z_0 < 2,0$), para um mesmo valor de relação H/W. Essa diferença pode ser explicada pelos diferentes efeitos na turbulência dos ventos e nas áreas sombreadas provocados pela geometria urbana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Numerical study on the effects of aspect ratio and solar orientation on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, v. 41, p. 94-108, 2006.
- BOURBIA, F.; BOUCHERIBA, F. Impact of street design on urban microclimate for semi arid climate (Constantine). **Renewable Energy**, v. 35, p. 343-347, 2010.
- CHEN, L.; NG, E. Quantitative urban climate mapping based on a geographical database: A simulation approach using Hong Kong as a case study. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 13, p. 586-594, 2011.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. www.ibge.gov.br. Acesso em: 06 de março de 2015.
- JUSUF, S. K.; HIEN, W. N. Development of empirical models for an estate level air temperature prediction in Singapore. **Proceedings...** Second International Conference on Countermeasures to Urban Heat Islands. September 19-23, 2009.
- KANDA, M.; MORIIZUMI, T. Momentum and heat transfer over urban-like surfaces. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 131, p. 385-401, 2009.
- LEME, F. T. **Fase B – Expansão da coleta de dados de fator de visão do céu e armazenamento**. Vinculado ao projeto “Verificação da influência da geometria urbana no consumo de energia elétrica em edificações por modelagem de redes neurais artificiais: Projeto CEU – Consumo de Energia Urbano”. Relatório de pesquisa. 2005.
- MASIERO, E. **Influência de corpos d’água em microclimas urbanos: estudo de caso em São José do Rio Preto – SP**. Tese de doutorado, Pós-graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos, 2014.
- OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2ª ed. London and New York: Routledge. 1987.
- OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, p. 237-254, 1981.
- OKE, T. R. Street design and urban Canopy layer climate. **Energy and Buildings**, v. 11, p. 103-113, 1988.
- PRIYADARSINI, R.; HIEN, W. N.; DAVID, C. K. W. Microclimate modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. **Solar Energy**, v. 82, p. 727-745, 2008.
- SILVA, A. N. R.; RAMOS, Rui António Rodrigues; SOUZA, Léa Cristina Lucas de; RODRIGUES, Daniel Souto; MENDES, José Fernando Gomes. **SIG - Uma plataforma para introdução de técnicas emergentes no planejamento urbano, regional e de transportes**. 1. ed. São Carlos: Ed. Dos Autores. 227p. 2004.
- SUGAWARA, H.; NARITA, K. Roughness length for heat over an urban canopy. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 95, p. 291-299, 2009.
- SVENSSON, M. K.; THORSSON, S.; LINDQVIST, S. A. A geographical information system model for creating bioclimatic maps – examples from a high, mid-latitude city. **International Journal of Biometeorology**, v. 47, p. 102-112, 2003.
- THEEUWES, N. E.; STEENEVELD, G. J.; RONDA, R. J. HEUSINKVELD, B. G.; VAN HOVE, L. W. A.; HOLTSLAD, A. A. M. Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio. **Royal Meteorological Society**, v. 140, p. 2197-2210, 2014.
- UNGER, J.; SAVIC, S.; GÁL, T. Modelling of the annual mean urban heat island pattern for planning of representative urban climate station network. **Advances in Meteorology**, p. 1-9, 2011.
- VOOGT, J. A.; GRIMMOND, C. S. B. Modeling surface sensible heat flux using surface radiative temperatures in a simple urban area. **American Meteorological Society**, v. 39, p. 1679-1699, 2000.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pesquisa de Nível Superior – CAPES, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelos recursos financeiros aplicados no projeto.