

**Efeitos da rugosidade superficial na variabilidade da ventilação natural
em cânions urbanos, em clima tropical de savana**

Luana Karla de Vasconcelos Brandão

Doutoranda do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFAL, Brasil.
luana.brandao@arapiraca.ufal.br

Ricardo Victor Rodrigues Barbosa

Professor Doutor do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFAL, Brasil.
rvictor@fau.ufal.br

RESUMO

O presente artigo analisou os efeitos da rugosidade superficial na variabilidade da ventilação natural no interior de cânions urbanos, a partir da variação de dois parâmetros morfológicos: a relação H/W, baseada no espaço entre edifícios, e a orientação das vias ($N = 0^\circ / N = 45^\circ$). Como objeto de estudo, tem-se a cidade de Arapiraca, de clima tropical de savana (As), localizada no semiárido alagoano. A metodologia adotada foi baseada em análise preditiva, por meio de simulação computacional, com uso do *software* ENVI-met v.4 Beta. Foram elaborados 18 cenários urbanos hipotéticos, que variaram quanto à aplicação de recuo mínimo inicial e progressivo ao número de pavimentos, com incidência da ventilação predominante perpendicular ($N = 0^\circ$) e oblíqua ($N = 45^\circ$) às edificações, para o período quente e seco. O desempenho climático dos cânions foi avaliado, quantitativa e qualitativamente, por meio de dados de velocidade e direção dos ventos às 15h, a uma altura de 1,5 m do solo. Os resultados mostraram que os cenários com baixa rugosidade superficial, com aplicação do recuo progressivo, edificações de diferentes alturas e incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, apresentaram condições mais favoráveis ao aproveitamento da ventilação natural para o conforto térmico ao ar livre, no nível do pedestre. Frente aos resultados encontrados, ressalta-se a necessidade de diretrizes de planejamento urbano que estejam alinhadas às estratégias bioclimáticas locais e aos preceitos de sustentabilidade e resiliência urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: Clima urbano. Planejamento urbano. Morfologia urbana. Urbanismo bioclimático. ENVI-met.

1. INTRODUÇÃO

A rugosidade (Z_g) de uma estrutura urbana é definida como um parâmetro que expressa a morfologia geométrica da superfície, cujo conceito significa a medida da rugosidade aerodinâmica da superfície, relacionada à altura dos elementos, como também à forma e à distribuição da densidade destes, afetando diretamente a velocidade das massas de ar que alcançam a estrutura urbana (Oke *et al.*, 2017). Sabe-se que esta variável interfere no perfil vertical ou gradiente de vento (Torres, 2017). Além disso, Oke *et al.* (2017) destacaram que a rugosidade superficial influencia nas condições de permeabilidade dos ventos e, consequentemente, no ambiente térmico dentro de uma estrutura urbana.

Estimular o aumento da velocidade dos ventos, reduzir a carga térmica e aumentar a dispersão do calor antropogênico e de poluentes no ambiente urbano, são questões imprescindíveis no estudo do clima urbano (De; Mukherjee, 2018; Xue *et al.*, 2020). A morfologia urbana está intrinsecamente ligada à velocidade dos ventos ao nível do pedestre. Nesse sentido, a rugosidade superficial é um fator que pode ser utilizado para quantificar a intensidade de seus efeitos (Chen *et al.*, 2017). Diversos estudos indicaram que quanto maior a rugosidade superficial, menor a quantidade do fluxo de ar que pode passar pela camada limite (Wen; Juan; Yang, 2016; Mohammed; Salman, 2018; Lobaccaro *et al.*, 2019).

Diferentes elementos urbanos, compreendidos como unidade 3D primária, podem ser obstáculos para a adequada permeabilidade dos ventos dentro da estrutura urbana, especialmente os edifícios. Ao contrário dos elementos vegetativos, os edifícios são impermeáveis, inflexíveis e geralmente pontiagudos (Oke *et al.*, 2017). Dessa forma, a velocidade dos ventos na escala do pedestre é reduzida em áreas com elevada rugosidade superficial, gerando o aumento da carga térmica e, por consequência, o desconforto térmico (Kouklis; Yiannakou, 2021; Brandão; Barbosa, 2023).

O método para mensurar as condições dos ventos e térmicas pode variar de acordo com a escala de abordagem e a tecnologia disponível. O Índice de Área Frontal (IAF) é um

parâmetro essencial para avaliar a rugosidade superficial e analisar corredores de ventilação urbana, sendo mais indicado para estudos na mesoescala (Li *et al.*, 2022; Xu; Gao, 2022). Contudo, não abrange as condições térmicas.

Os modelos de dinâmicas de fluidos computacionais (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) podem ser utilizados em meso e microescala, além de estimar condições de vento e térmicas, a exemplo do *software* ENVI-met, que simula modelos urbanos a partir de dados meteorológicos locais e coletados *in loco* (Perini *et al.*, 2017; Ma *et al.*, 2020). Em escalas microclimáticas, também é possível estimar a velocidade e a direção dos ventos por meio de campanhas de medição em um ponto específico, mas essa metodologia demanda equipamentos de tecnologia avançada com um alto custo (Blocken, 2015; Papadopoulou *et al.*, 2015). Isso torna essa última alternativa inviável em muitas realidades de pesquisa, seja para fins acadêmicos ou para planejamento urbano.

A escala para análise dos efeitos climáticos de um conjunto edificado na rugosidade superficial é o cânion urbano, unidade urbana para estudo do adensamento construtivo por meio da verticalização. Compreender como a forma urbana pode contribuir para potencializar o aproveitamento da ventilação natural e, assim, gerar condições favoráveis ao conforto térmico, é essencial no processo de planejamento urbano das cidades.

2. OBJETIVO

O presente artigo objetivou analisar os efeitos da rugosidade superficial na variabilidade da ventilação natural no interior de cânions urbanos a partir da variação de dois parâmetros morfológicos: a relação H/W e a orientação das vias, em cidade de clima tropical de savana (As). Como estudo de caso, tomou-se a cidade de Arapiraca, localizada na região do semiárido brasileiro.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos adotados na presente investigação consistiram em três etapas distintas: (1) Seleção e caracterização de fração urbana com tendência à verticalização no objeto de estudo; (2) Composição dos dados de entrada no modelo para simulação computacional; e (3) Elaboração dos modelos e simulação dos cenários hipotéticos no *software* Envi-met v.4 Beta.

3.1 Caracterização do Estudo de Caso

Localizada no interior do estado de Alagoas (Brasil), a cidade de Arapiraca está inserida na região do semiárido do Nordeste brasileiro, a uma altitude de, aproximadamente, 280 m. Possui população estimada de 234.309 habitantes (IBGE, 2021), em uma área territorial de 356,179 km². Nas últimas décadas apresentou um intenso crescimento populacional, e se desenvolveu como um importante centro comercial e de serviço.

Figura 1 - Localização de Arapiraca/AL.



Fonte: Adaptado de SEPLAG/AL (2022).

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger (Alvares *et al.*, 2012), o clima de Arapiraca é tropical de savana (As). No que tange as características climáticas, a cidade apresenta: temperatura média anual de 24,7 °C, umidade relativa do ar média anual de 73,9% e pluviosidade média anual de 890,0 mm (Silva, 2019). Os ventos predominantes são de Leste, com direção secundária de Sudeste, com velocidades de ventos fracos e bonançosos, e ocorrência de calmarias em 13,73% das horas anuais (Silva; Barbosa, 2022).

Como a unidade urbana estudada foi o cânion urbano, a escolha da fração urbana para modelagem dos cenários urbanos hipotéticos foi baseada no tipo de tecido com tendência à verticalização, o Horizontal Disperso (Torres, 2017). A fim de contribuir para o crescimento vertical da cidade, tornou-se importante selecionar uma área de estudo onde é possível observar edifícios implantados e a construção de novos, especialmente na zona norte da cidade. Dessa forma, foi selecionado o perímetro que corresponde à Avenida Deputada Ceci Cunha.

A Av. Dep. Ceci Cunha é uma área valorizada da cidade, de uso comercial e residencial, onde estão situados alguns edifícios da cidade. No perímetro que divide os bairros Novo Horizonte e Itapuã é possível observar diversos vazios urbanos e lotes com maior dimensão. Desta forma, a Figura 2a apresenta a fração urbana selecionada como área de estudo da presente pesquisa.

Figura 2 - Área de estudo selecionada na Av. Dep. Ceci Cunha (a), vista na perspectiva do pedestre (b).



Fonte: Adaptado de Google Earth (2024) e arquivo pessoal.

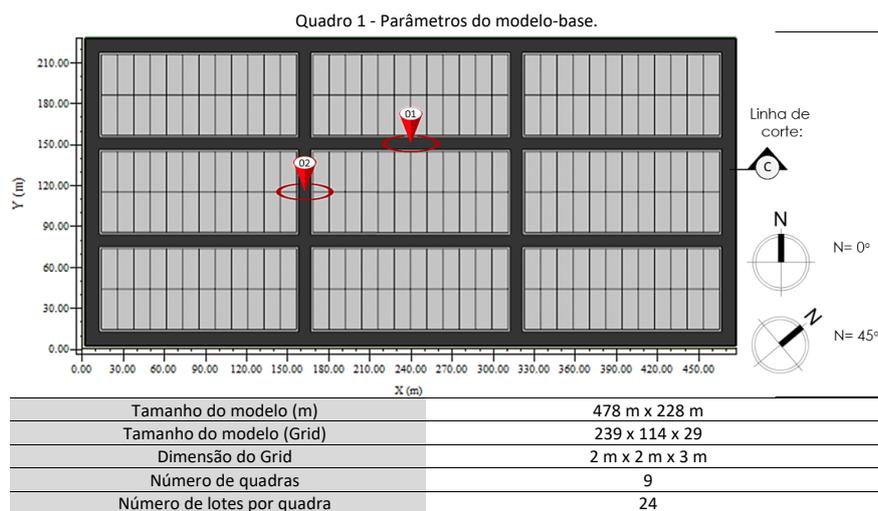
Para a elaboração dos cenários hipotéticos, buscou-se compreender o padrão recorrente de ocupação nessa fração urbana, com base no desenho das quadras e dos lotes, e na largura das vias e das calçadas, por meio de base cartográfica atualizada, disponibilizada pela Prefeitura Municipal. A Avenida conta com um canteiro central continuamente arborizado (Figura 2b) e entre as quadras existe uma área verde linear, com presença de arborização de grande porte.

Acerca das características observadas *in loco* do perímetro selecionado: o revestimento das ruas é asfalto ou cobertura natural, as calçadas são em concreto ou com revestimento cerâmico, e as fachadas são em cerâmica ou pintadas com diferentes cores. Os materiais de cobertura predominantes são telhas cerâmicas, fibrocimento ou lajes de concreto. A área de estudo foi de 129.454,93m², com orientação Sudoeste/Nordeste.

3.2 Dados de Entrada no Modelo

No *software* ENVI-met, a simulação requer dois principais arquivos: um arquivo de configuração urbana, no qual a área de estudo é modelada (incluindo a localização de edifícios, vegetação, solo, superfícies e receptores); e um arquivo de configuração climática com todos os valores e horários de inicialização (Muniz-Gaal *et al.*, 2020). O processo é descrito abaixo.

O modelo da área de estudo foi construído com resolução de grade de 2 m x 2 m x 3 m, mantendo boa representatividade, totalizando uma área de 478 m x 228 m, em 239 x 114 x 29 grids. A área foi constituída por nove quadras com 24 lotes, medindo 12 m x 30 m, separadas por ruas com 8 m de largura. A quantidade de lotes por quadra, o tamanho médio dos lotes e a largura das ruas correspondem ao padrão de parcelamento do solo observado na fração urbana adotada como referência para o estudo. Com o intuito de analisar apenas o efeito da massa construída, não foram inseridas vegetações nos cenários. A área foi modelada conforme indicado no Quadro 1.



Dimensão do lote	12 m x 30 m
------------------	-------------

Fonte: Autores.

A altura do topo do modelo foi de 90,98 m, obtida a partir do método telescópico de geração da grade vertical com fator de aumento de 2%, a partir da altura de 45 m, haja vista a altura mínima exigida pelo modelo ser o dobro da altura do edifício mais alto inserido no modelo (ENVI-met, 2024). Para manter a estabilidade do modelo, foram inseridas 5 grades de nidificação em torno da área modelada (Brandão, Barbosa; 2023). Foram adotadas duas inclinações para o norte: 0° e 45°, representativas para incidência perpendicular e oblíqua da ventilação predominante (leste) em relação às edificações, respectivamente.

Nos cenários de estudo foram estabelecidos 2 pontos receptores para coleta de dados climáticos, a fim de analisar o resultado das simulações. O ponto 01 (120,73) está situado paralelo a barlavento e ao ponto 02 (84,66), situado a sotavento. Os materiais utilizados na modelagem dos cenários hipotéticos foram baseados nos materiais existentes no banco de dados do *software* ENVI-met v.4 Beta (Quadro 02).

Quadro 2 - Características dos materiais utilizados na modelagem da área de estudo e dos cenários.

Coberta	ID	Material	Albedo	Emissividade
	R2	Telha cerâmica	0.50	0.90
Paredes	B2	Tijolos cerâmicos	0.40	0.90
Calçadas	PG	Concreto cinza	0.40	0.89
Ruas	ST	Asfalto	0.12	0.90
Solo	LO	Argiloso	0.00	0.98

Fonte: Autores.

Comentado [RD1]: Aqui o correto é "Coberta" mesmo ou: Cobertura?

Foi utilizado o fator de ajuste solar de 0,92, de acordo com a calibração de Torres (2017) para Arapiraca. O horário de início da simulação foi às 21h, devido à ausência de radiação solar e haver disponibilidade de atmosfera neutra. Os dados de umidade específica foram tomados da estação do aeroporto de Natal/RN, por ser o ponto mais próximo com este tipo de dado disponível. Com o intuito de obter dados climáticos de 2 dias (dois ciclos completos). O primeiro ciclo é considerado como um período para estabilidade da simulação e no segundo ciclo, os dados climáticos foram considerados para análise. Os dados de um dia extremo para o período quente e seco foram utilizados para temperatura do ar e umidade relativa (Silva, 2019). Os parâmetros de entrada para simulação computacional estão descritos no Quadro 3.

Quadro 3 - Parâmetros de dados de entrada para simulação computacional.

Parâmetro	Verão
Data de início	26/11/2015
Horário de início	21:00
Total de horas simuladas	52
Velocidade do vento medida a 10 m de altura (m.s ⁻¹)*	2.7
Direção do vento (graus)*	94
Comprimento da rugosidade no local da medição	0.1
Temperatura inicial da atmosfera (K)*	302.34
Umidade específica no topo do modelo (2500 m- g/kg)**	2.92
Umidade relativa a 2 m (%)*	62.9
Fator de ajuste solar****	0.92

*Silva, 2019.

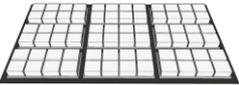
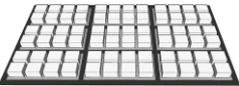
**Dados do aeroporto de Natal/RN, obtidos pelo site do Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming.

***Padrão do modelo.
****Torres, 2017.
Fonte: Autores.

3.3 Elaboração dos Cenários Hipotéticos para Simulação

Os cenários hipotéticos foram modelados sobre a base digitalizada (ver Quadro 4).

Quadro 4 - Parâmetros dos cenários hipotéticos.

Modelo	Padrão de verticalização	N° Pav.	ID	Recuos (m)		Largura cânion (m)	H/W
				Frontal	Lateral/ Posterior		
	REF.	1	RF	3	1,5	18	0,16
	Baixo	5	RI-05	3	1,5	18	0,83
			RP-05	4,5	3	21	0,7
	Médio	10	RI-10	3	1,5	18	1,6
			RP-10	7	5,5	26	1,15
	Alto	15	RI-15	3	1,5	18	2,5
			RP-15	9,5	8	31	1,45
	Misto	5/10/15	RI-Misto	*	*	18	*
			RP-Misto	*	*	*	*

*Valores variáveis dentro do cânion urbano.
Fonte: Autores.

As edificações verticalizadas foram modeladas considerando o remembramento de três lotes padrões, diante da necessidade de aplicar o recuo progressivo ao número de pavimentos. Os cenários foram modelados a partir de combinações de parâmetros urbanísticos, de forma a conferir variações na rugosidade superficial do cânion urbano, a partir da relação H/W. Nesse sentido, foram consideradas variações quanto à altura das edificações, aos recuos entre os edifícios e à direção de incidência da ventilação predominante.

A altura das edificações considerou cenários com baixa, média e alta verticalização, a partir do atual padrão de número de pavimentos existentes na cidade em estudo, resultando em edificações com 5, 10 e 15 pavimentos, respectivamente. Foram modelados cenários com alturas homogêneas e heterogêneas, resultando em variações na rugosidade superficial. A distribuição espacial dos edifícios com diferentes alturas na quadra foi feita aleatoriamente por sorteio, considerando a mesma quantidade de exemplares de cada altura em cada quadra.

A distância entre as edificações foi calculada a partir da aplicação de recuos mínimos, atualmente vigentes na legislação urbanística da cidade (ARAPIRACA, 2001), e de recuos progressivos ao número de pavimentos, de acordo com a Equação 1. Este cálculo corresponde ao mesmo adotado para edificações verticalizadas, de acordo com a legislação urbanística vigente na capital do estado (MACEIÓ, 2007).

$$RP = (Ri + (n-2)) / 2$$

Equação 1

Onde:

RP corresponde ao recuo progressivo resultante, em metros;

Ri corresponde ao recuo inicial ou mínimo, em metros, aplicado na zona em questão; e

n corresponde ao número de pavimentos da edificação.

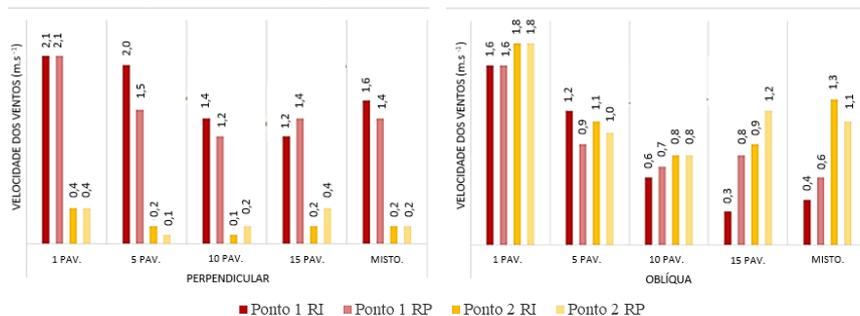
A aplicação do recuo progressivo ao número de pavimentos resultou em afastamentos maiores entre as edificações mais altas, conferindo variações na porosidade da geometria urbana. Assim, os parâmetros adotados na modelagem resultaram em 18 simulações. O presente estudo tomou como recorte analisar as condições dos ventos, comparativamente, a partir dos dados de velocidade e direção dos ventos. A extração dos dados foi feita às 15h, período mais quente do dia, na altura de 1,5 m do solo.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Velocidade dos ventos

O *software* ENVI-met considera a velocidade constante durante o dia, nesse sentido, o comportamento da velocidade e da direção do vento foi analisado às 15h, a partir de dados quantitativos. O Gráfico 2 demonstra, quantitativamente, o comportamento da velocidade dos ventos no Ponto 01, a barlavento, e no Ponto 02, a sotavento.

Figura 3 - Gráfico do comportamento da velocidade dos ventos ($m.s^{-1}$) para às 15h.



Fonte: Autores.

A alta rugosidade superficial, em decorrência do aumento da densidade de construção, geralmente retarda o fluxo de ar próximo à superfície (Oke, 2017), o que justifica as velocidades mais altas se concentrarem nos cenários REF. Com relação à adoção dos recuos inicial e progressivo, observou-se um padrão presente em todos os cenários: apesar das velocidades dos ventos se apresentarem mais altas nos cenários REF e RI-05, decorrentes da canalização do fluxo dos ventos, mas à medida que as edificações se verticalizam, gradualmente, a velocidade aumenta nos cenários com uso do recuo progressivo.

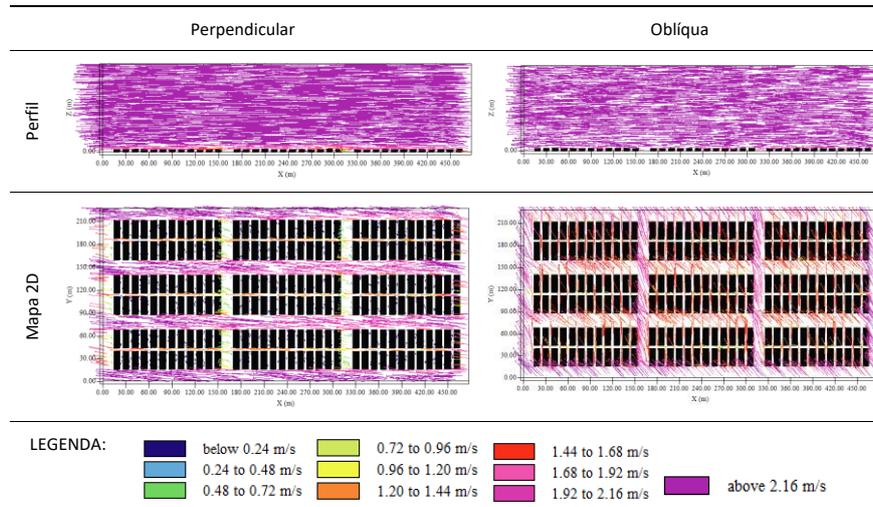
O espaçamento entre as edificações pode gerar diferentes regimes de fluxo de vento no cânion urbano. O uso de recuo mínimo inicial e progressivo demonstrou dois dos três regimes apontados por Oke *et al.* (2017): o fluxo *skimming* e o fluxo de interferência de esteira, respectivamente. O primeiro tipo é caracterizado pelo fluxo acima do telhado “saltar” pelos topos dos edifícios com menos tendência a entrar nos cânions das ruas, reduzindo a velocidade dos ventos, e até gerando áreas de sombra de ventilação no interior do cânion. Enquanto o segundo, a distância que separa os edifícios não impede que os ventos adentrem no interior do cânion.

Com relação à orientação dos cânions, nos modelos urbanos hipotéticos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações, é possível observar a disparidade entre o ponto a barlavento (01) e a sotavento (02), por conta da canalização do fluxo do ar nas vias de circulação com eixo Leste-Oeste, que gera o aumento da velocidade dos ventos, com uma diferença de até $1,8 m.s^{-1}$ no cenário RI-05. Nos modelos de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, essa diferença foi atenuada, com uma diferença de $0,1 m.s^{-1}$ no mesmo cenário em questão. Isso porque a orientação do traçado viário otimizou a permeabilidade dos ventos na malha urbana. Tork *et al.* (2017) também constataram que em vias orientadas a Nordeste-Sudeste, oblíqua à direção predominante do vento, o desempenho térmico é superior quanto à velocidade do vento e ao potencial de ventilação cruzada. A velocidade dos ventos é importante para o conforto térmico, a qualidade do ar e a dispersão de poluentes atmosféricos e do calor antropogênico (Oke, 2017; Xue *et al.*, 2020).

4.2. Direção dos ventos

A análise qualitativa do comportamento dos ventos foi feita através de perfis e mapas 2D, elaborados por meio do *software* Leonardo. O Leonardo é uma interface do ENVI-met, que oferece uma ampla gama de opções de visualização, desde simples cortes ou mapas em 2D até trajetórias de fluxo 3D. O Quadro 5 apresenta os perfis e mapas 2D do modelo REF, na incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações.

Quadro 5 - Perfis e mapas de ventilação, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular e oblíqua.



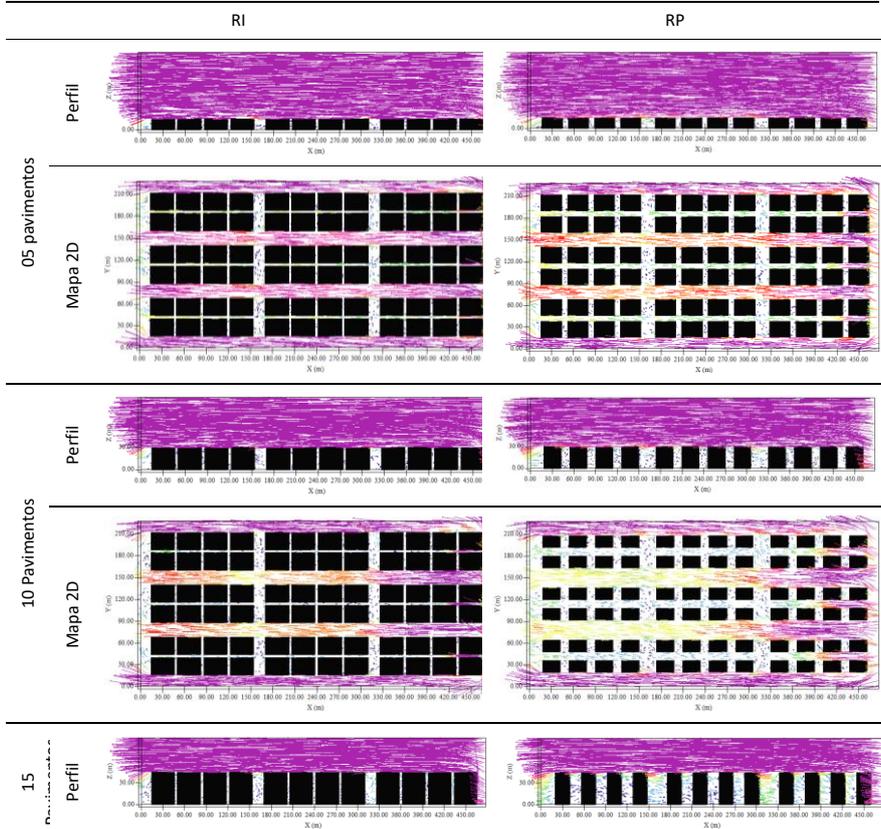
Fonte: Autores.

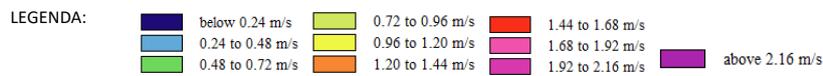
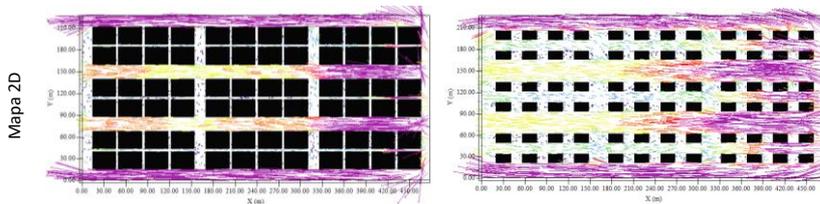
Nos perfis, percebe-se que na camada intraurbana ocorre a diminuição da velocidade dos ventos, todavia, como as edificações apresentam a mesma altura, o perfil vertical do vento não se altera de maneira significativa. Nos mapas do cenário REF de $N=0^\circ$, é possível observar que a incidência dos ventos predominantes paralelos às vias de circulação com eixo Leste-Oeste acarreta na canalização dos ventos, que gera o aumento da velocidade dos ventos, chegando a atingir mais de $2,16 \text{ m.s}^{-1}$. O aumento da velocidade dos ventos nas vias paralelas à direção predominante da ventilação natural, gera a formação de áreas de estagnação de ar nas vias perpendiculares, e a sotavento das edificações é possível observar a formação de áreas de sombras de ventilação.

O Quadro 6 apresenta os perfis e mapas 2D dos demais modelos, na incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações. Com base na análise dos perfis, observa-se que a alta rugosidade altera a permeabilidade do fluxo de ar, e a velocidade dos ventos na malha urbana diminui, especialmente nos modelos com uso do recuo mínimo inicial, o que coincide com os resultados encontrados por Brandão e Barbosa (2023). Contudo, nos cenários com uso do recuo progressivo, esse efeito foi reduzido. A exemplo, o cenário RI-15 apresentou no interior das quadras a velocidade de $1,44 \text{ m.s}^{-1}$ a $1,68 \text{ m.s}^{-1}$, enquanto o cenário RP-15, chegou a apresentar velocidades acima de $2,16 \text{ m.s}^{-1}$, uma diferença que pode chegar a $0,72 \text{ m.s}^{-1}$.

Os mapas 2D demonstram que o uso do recuo progressivo potencializa a permeabilidade dos fluxos de ar na malha urbana, o que diminui as áreas de sombra de vento a sotavento, menos presença de canalização dos ventos nas vias sentido Leste-Oeste, o que configura condições mais favoráveis ao conforto térmico a nível do pedestre. No ponto 01, a barlavento, a velocidade dos ventos varia entre $1,20 \text{ m.s}^{-1}$ e $1,44 \text{ m.s}^{-1}$ no cenário RI-15, enquanto no mesmo ponto do cenário RP-15, o valor aumenta para entre $1,44 \text{ m.s}^{-1}$ e $1,68 \text{ m.s}^{-1}$. Já no ponto 02, a sotavento, no cenário RI-15 o fluxo dos ventos apresentou velocidades abaixo de $0,24 \text{ m.s}^{-1}$, e no cenário RP-15, entre $0,24 \text{ m.s}^{-1}$ e $0,48 \text{ m.s}^{-1}$.

Quadro 6 - Perfis e mapas de ventilação às 15h, de incidência da ventilação perpendicular às edificações ($N=0^\circ$).

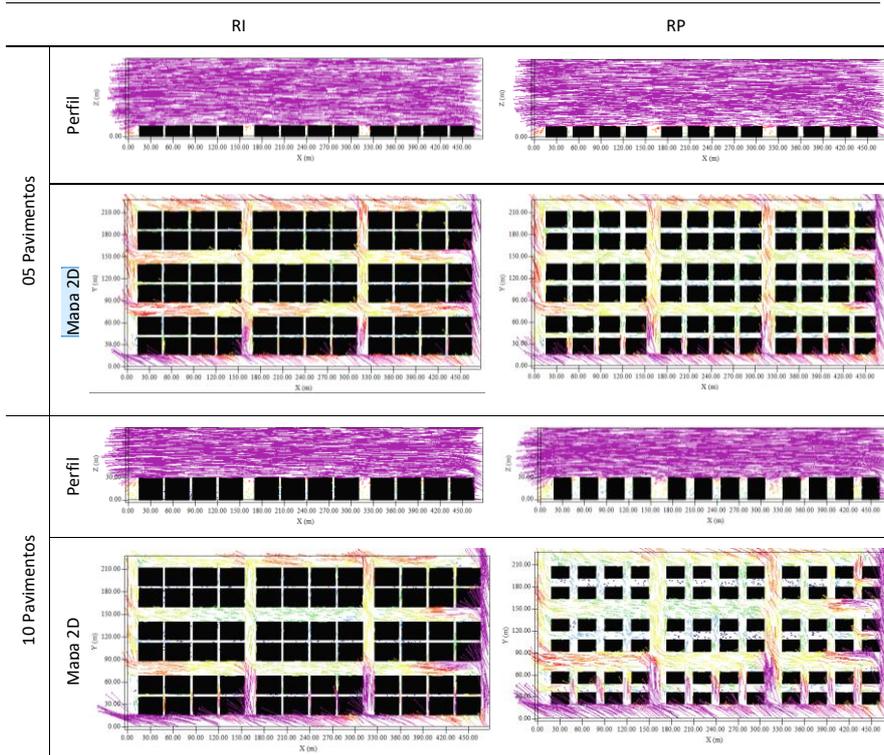




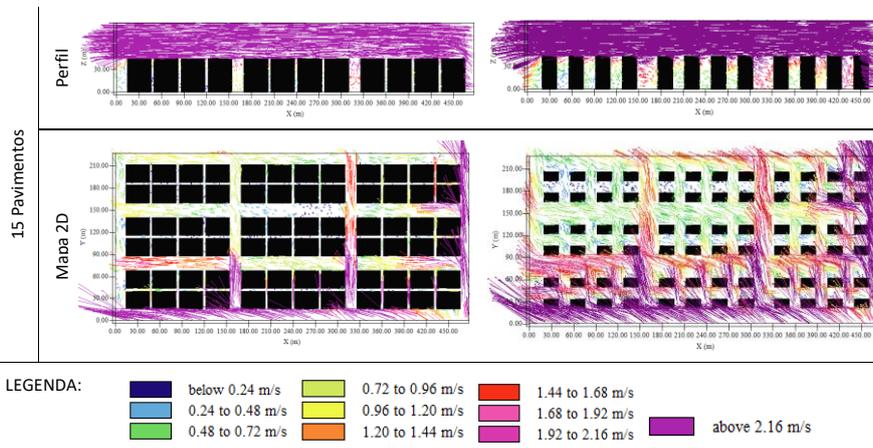
Fonte: Autores.

O Quadro 7 apresenta os perfis e mapas 2D dos demais modelos, na incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações.

Quadro 7 - Perfis e mapas de ventilação às 15h, de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°).



Comentado [RD2]: Checar os textos desta coluna, porque eles não estão visíveis, parece que parte da imagem ficou por cima.



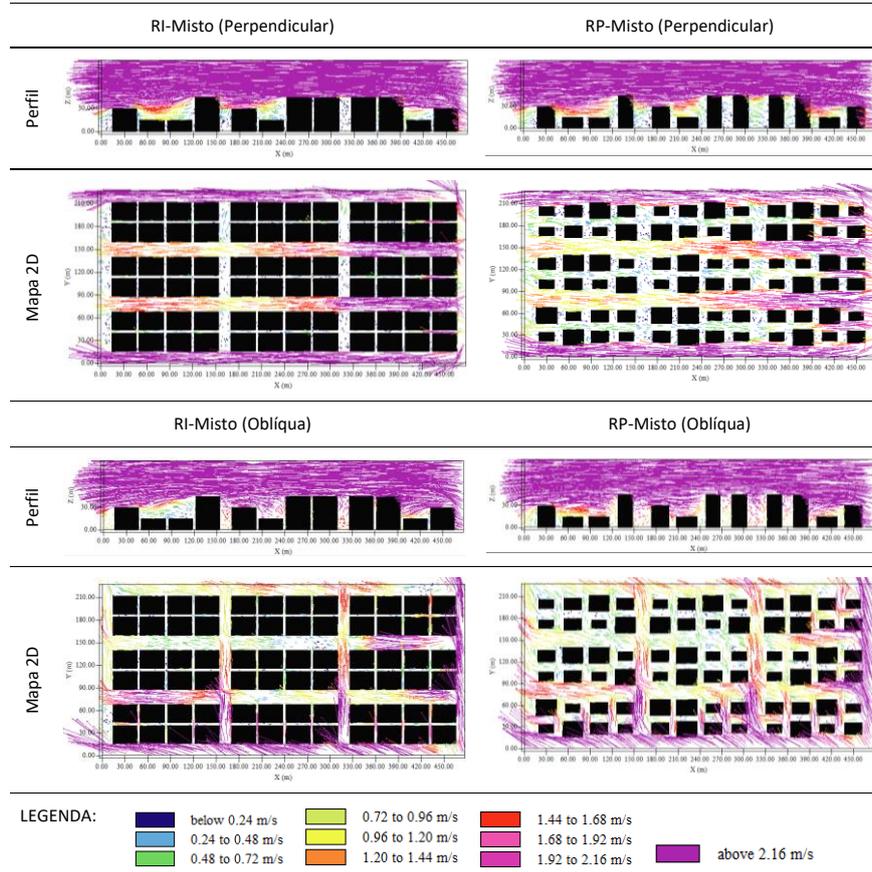
Fonte: Autores.

Quanto à análise dos perfis, os resultados não foram diferentes dos observados nos modelos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações, pois aqui a rugosidade superficial permanece com as taxas altas devido às edificações verticalizadas apresentarem alturas iguais. Nos modelos com uso do recuo mínimo inicial, o regime dos fluxos de ventos ainda se caracteriza como *skimming*, em função do pouco espaço entre as edificações, o que diminui substancialmente a velocidade dos ventos na escala do pedestre. Vale destacar que, de acordo com Freitas e Azerêdo (2021), o aproveitamento da ventilação natural auxilia no conforto térmico do pedestre em regiões de clima tropical, como é o caso do presente objeto de estudo.

Nos mapas dos cenários de incidência da ventilação oblíqua às edificações, é possível observar que os modelos com uso do recuo progressivo permanecem com condições mais favoráveis ao aproveitamento da ventilação natural, devido a uma melhor permeabilidade do fluxo de ar. No ponto 01, a barlavento, a velocidade dos ventos varia entre $0,24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ no cenário RI-15, enquanto no mesmo ponto do cenário RP-15, o valor aumenta para entre $0,72 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Já no ponto 02, a sotavento, no cenário RI-15 o fluxo dos ventos apresenta entre $0,96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, e no cenário RP-15, entre $1,44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $1,68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

O Quadro 8 apresenta os resultados obtidos a partir dos cenários mistos (RI/RP):

Quadro 8 - Perfis e mapas de ventilação às 15h, de incidência da ventilação perpendicular e oblíqua.



Fonte: Autores.

Com relação aos cenários mistos, os perfis demonstram como a rugosidade superficial influencia no comportamento dos ventos, em sua forma de deslocamento, deixando de ser lamelar (em lâminas) para se tornar turbilhonar (Oke *et al.*, 2017), e em sua velocidade. O que diminui as áreas de estagnação de vento entre as edificações verticalizadas, aumentando a velocidade dos ventos na escala do pedestre, promovendo melhores condições de conforto térmico no interior do cânion. Resultado semelhante também foi observado por Mohammed e Salman (2018).

Acerca dos mapas 2D, a baixa rugosidade superficial otimizou o aproveitamento da ventilação natural a barlavento e a sotavento, pois ao gerar a forma de deslocamento turbilhonar dos ventos, promove-se a entrada de maior fluxo dos ventos no interior das quadras, o que garante condições de conforto térmico no ambiente urbano. A adoção do recuo

progressivo e a orientação das vias de forma oblíqua potencializa esse efeito e diminui as áreas de sombra de vento a sotavento.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao analisar o comportamento da velocidade dos ventos com relação à forma urbana, dois fatores devem ser considerados: a porosidade e a rugosidade, que influenciam no perfil vertical do vento, conhecido como gradiente de vento. O cenário misto possibilitou analisar a rugosidade superficial da malha urbana frente ao desempenho do aproveitamento da ventilação natural. Nos modelos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações, nota-se que o cenário misto apresentou resultados similares aos cenários verticalizados, e nos modelos de incidência oblíqua, o resultado se repetiu e foi potencializado.

Este estudo avaliou as condições climáticas e a sensação térmica dos cenários para o clima tropical de savana de latitude média e sem considerar os efeitos das interações da vegetação. Uma das principais conclusões deste artigo leva à notável importância da rugosidade superficial na permeabilidade dos ventos e, por consequência, na velocidade dos ventos. Com base nos resultados mencionados, os parâmetros geométricos dos cânions urbanos afetam fortemente o microclima e o conforto térmico no nível de pedestres, destacando a necessidade de desenvolver diretrizes de planejamento urbano baseadas nesses parâmetros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHOUR-YOUNSI, S.; KHARRAT, F. Outdoor thermal comfort: Impact of the geometry of an urban street canyon in a Mediterranean subtropical climate - Case study Tunis, Tunisia. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 216, p. 689-700, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.12.062>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES, J. L. de M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0507.

ANTONINI, E.; VODOLA, V.; GASPARI, J.; DE GIGLIO, M. Outdoor Wellbeing and Quality of Life: A Scientific Literature Review on Thermal Comfort. *Energies*, v. 13, 2020. DOI: 10.3390/en13082079.

BLOCKEN, B. Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Build. Environ.*, v. 91, p. 219-245, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>.

BRANDÃO, L. K. de V.; BARBOSA, R. V. R. Modelagem de cânions urbanos em clima tropical de savana: relação entre os parâmetros geométricos e o microclima ao nível do pedestre. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, v. 11, n. 83, p. 2318-8472, 2023. DOI: <https://doi.org/10.17271/23188472118320234706>.

CHEN, Y.-C.; FRÖHLICH, D.; MATZARAKIS, A.; LIN, T.-P. Urban Roughness Estimation Based on Digital Building Models for Urban Wind and Thermal Condition Estimation - Application of the SkyHelios Model. *Atmosphere*, v. 8, n. 247, 2017. DOI: 10.3390/atmos8120247.

Código de Obras e Edificações no Município de Arapiraca. **Lei Municipal nº 2.220**, de 2001. Recuperado em 02 de abril de 2023, de www.arapiraca.al.gov.br.

Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió. **Lei Municipal nº 5.593**, de 8 de fevereiro de 2007. Recuperado em 20 de abril de 2023, de www.maceio.al.gov.br.

- DE, B.; MUKHERJEE, M. Optimisation of canyon orientation and aspect ratio in warm-humid climate: Case of Rajarhat Newtown, India. *Urban Climate*, n. 24, p. 887–920, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.11.003>.
- FREITAS, R.; AZERÊDO, J. **Urbanismo bioclimático e cidades sustentáveis**. [recurso eletrônico] / organizadores: Ruskin Freitas, Jaucele Azerêdo. Recife: Ed. UFPE, 2021.
- GIVONI, B. **Climate considerations in building and urban design**. New York: John Wiley & Sons, 1998.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. (2010). **Censo Demográfico - 2010**. Arapiraca: IBGE. Recuperado em 15 de janeiro de 2023, de www.ibge.gov.br.
- LI, L.; ZHAO, Z.; WANG, H.; SHEN, L.; LIU, N.; HE, B.-J. Variabilities of Land Surface Temperature and Frontal Area Index Based on Local Climate Zone. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, v. 15, 2022. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3153958.
- LOBACCARO, G.; ACERO, J. A.; MARTINEZ, G. S.; PADRO, A.; LABURU, T.; FERNANDEZ, G. Effects of Orientations, Aspect Ratios, Pavement Materials and Vegetation Elements on Thermal Stress inside Typical Urban Canyons. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 16, n. 3574, 2019. DOI: 10.3390/ijerph16193574.
- KOUKLIS, G.-R.; YIANNAKOU, A. The Contribution of Urban Morphology to the Formation of the Microclimate in Compact Urban Cores: A Study in the City Center of Thessaloniki. *Urban Sci.*, v. 5, n. 37, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/urbansci5020037>.
- MA, X.; WANG, M.; ZHAO, J.; ZHANG, L.; LIU, W. Performance of Different Urban Design Parameters in Improving Outdoor Thermal Comfort and Health in a Pedestrianized Zone. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, v. 17, n. 2258, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17072258.
- MOHAMMED, Y.; SALMAN, A. Effect of urban geometry and green area on the formation of the urban heat island in Baghdad city. *MATEC Web of Conferences*, v. 162, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816205025>.
- MUNIZ-GÁAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Urban geometry and the microclimate of street canyons in tropical climate. *Building and Environment*, v. 169, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106547>.
- NASROLLAHI, N.; GHOSOURI, A.; KHODAKARAMI, J.; TALEGHANI, M. Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review. *Sustainability*, v. 12, p. 01-22, 2020. DOI: 10.3390/su122310000.
- OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
- PAPADOPOULOU, M.; RAPHAEL, B.; SMITH, I.; SEKHAR, C. Optimal Sensor Placement for Time-Dependent Systems: Application to Wind Studies around Buildings. *J. Comput. Civ. Eng.*, 2015, 30. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000497](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000497).
- PERINI, K.; ATA CHOKHACHIAN, A.; SEN DONG, S.; AUER, T. Modeling and simulating urban outdoor comfort: Coupling ENVI-Met and TRNSYS by grasshopper. *Energy and Buildings*, v. 152, p. 373-384, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.061>.
- ROMERO, M. A. B. Correlação entre o microclima urbano e a configuração do espaço residencial de Brasília. *Fórum Patrimônio: Mudanças climáticas e o impacto das cidades*, v. 4, n. 1, p. 9-22, 2011.
- SILVA, M. F. da. Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2019.
- SILVA, M. F. da.; BARBOSA, R. V. R. Regime de ventos em cidades de diferentes regiões geográficas de Alagoas a partir de dados meteorológicos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia*, Dourados, MS, v. 31, 2022, ISSN 2237-8642.

TORRES, S. C. **Forma e Conforto: estratégias para repensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática.** Recife, 2017. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano - Universidade Federal de Pernambuco), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017.

XU, F.; GAO, Z. Índice de área frontal: uma revisão dos métodos de cálculo e aplicação no ambiente urbano. **Building and Environment**, v. 224, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109588>.

XUE, Y.; WANG, Y.; PENG, H.; WANG, H.; SHEN, J. The impact of building configurations and anthropogenic heat on outdoor thermal comfort in high-density urban areas. **Urban Climate**, v. 22, p. 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.01.003>.

WEN, C-Y.; JUAN, Y-H.; YANG, A-S. Enhancement of City Breathability with Half Open Spaces in Ideal Urban Street Canyons. **Building and Environment**, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.11.048>.

WONG, M. S.; NICHOL, J. E.; TO, P. H.; WANG, J. A simple method for designation of urban ventilation corridors and its application to urban heat island analysis. **Build. Environ.**, v. 45, p. 1880-1889, 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.019>.

YANG, H.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Build. Environ.**, v. 60, p. 93-104, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.00>.