



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS  
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO  
MESTRADO EM DINÂMICAS DO ESPAÇO HABITADO

LUANA KARLA DE VASCONCELOS BRANDÃO

**VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO: ANÁLISE DE  
PARÂMETROS URBANÍSTICOS INTEGRADOS À ABORDAGEM  
BIOCLIMÁTICA EM ARAPIRACA, ALAGOAS.**

Maceió

2020

LUANA KARLA DE VASCONCELOS BRANDÃO

**VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO: ANÁLISE DE  
PARÂMETROS URBANÍSTICOS INTEGRADOS À ABORDAGEM  
BIOCLIMÁTICA EM ARAPIRACA, ALAGOAS.**

Dissertação de mestrado apresentada a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas, como requisito final para obtenção do grau de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues  
Barbosa  
Coorientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Carnaúba  
Torres

Maceió  
2020

**Catálogo na fonte**  
**Universidade Federal de Alagoas**  
**Biblioteca Central**  
**Divisão de Tratamento Técnico**

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

- B817v Brandão, Luana Karla de Vasconcelos.  
Verticalização e ambiente térmico urbano: análise de parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática em Arapiraca, Alagoas / Luana Karla de Vasconcelos Brandão. – 2020.  
149 f. : il. figs. ; graf. ; tabs. color.
- Orientador: Ricardo Victor Rodrigues Barbosa.  
Coorientadora: Simone Carnáuba Torres.  
Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2020
- Bibliografia. f. 137-146.  
Apêndice: f. 147-149.
1. Clima urbano. 2. Planejamento urbano. 3. Urbanismo bioclimático. 4. Adensamento urbano. 5. Verticalização. I. Título.

CDU: 72: 551.584.5 (813.5)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

Luana Karla de Vasconcelos Brandão

**VERTICALIZAÇÃO E AMBIENTE TÉRMICO URBANO: ANÁLISE DE  
PARÂMETROS URBANÍSTICOS INTEGRADOS À ABORDAGEM  
BIOCLIMÁTICA EM ARAPIRACA, ALAGOAS.**

Dissertação de mestrado apresentada a  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Alagoas, como  
requisito final para obtenção do grau de  
Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

APROVADA EM: 28 / 02 / 2020

BANCA EXAMINADORA



---

Prof. Dr. RICARDO VICTOR RODRIGUES BARBOSA (Orientador)  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> SIMONE CARNAÚBA TORRES (Coorientadora)  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



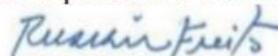
---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> JULIANA OLIVEIRA BATISTA  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> LÚCIA TONE FERREIRA HIDAKA  
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL



---

Prof. Dr. RUSKIN MARINHO DE FREITAS  
Curso de Arquitetura e Urbanismo – UFPE

*Aos meus pais, Wilson e Cícera, pelo empenho e sacrifício para oferecer a mim, e meus irmãos, a oportunidade de estudar e por nos apoiar em cada sonho almejado.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus, pois até aqui me ajudou o Senhor!

Agradeço a minha família, especialmente ao meu Pai, Wilson Ferreira Brandão, e a minha Mãe, Cícera M<sup>a</sup> de Vasconcelos Brandão, por ensinar a mim e meus irmãos, Leonardo e Pedro, o valor do estudo, pois só estou aqui mediante a dedicação, exemplo e amor incondicional dos dois!

Ao meu Noivo, Rodrigo Barbosa Ferro, por descansar ao meu lado quando estava sobrecarregada, por seu otimismo nos momentos de dificuldade, por seu cuidado com minha saúde e por seu esforço para estar presente em cada etapa importante, desde o processo seletivo até a finalização do Mestrado, tornando esta uma conquista nossa! Obrigada por todo amor, carinho e companheirismo, eu te amo!

À prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Gianna Barbirato, pela orientação e por ter me recebido com tamanho carinho, cujo exemplo levarei sempre comigo! Ao Prof. Dr. Ricardo Victor Rodrigues Barbosa, pelos ensinamentos desde a graduação, no PIBIC e TCC, que me possibilitaram chegar até aqui, e pela orientação e importantes contribuições para o desenvolvimento da presente pesquisa. À prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Simone Carnáuba Torres pela coorientação e apoio durante essa jornada.

Aos professores Dr. Ruskin Freitas, Dr.<sup>a</sup> Lúcia Hidaka e Dr.<sup>a</sup> Juliana Oliveira, pelos ensinamentos e contribuições para o desenvolvimento da presente pesquisa no momento da Qualificação e Defesa da mesma. Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da UFAL, pelo conhecimento passado. Ao Prof. Me. Rafael Neves pelo auxílio na elaboração do Plano de Mestrado. E em especial, a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Lúcia Hidaka e a Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Manuella Andrade, pelas caronas que alegravam os meus dias! À Luciane Prado pela sempre cordial assistência e compreensão aos mestrandos do interior, como eu.

À minha turma, composta por pessoas incríveis, que tive a alegria de conhecer. Em especial a Ana, pois sempre guardarei no coração aquele primeiro dia de aula quando não sabia qual ônibus me levaria para casa e Você ficou do meu lado até tudo se resolver, também sou grata pela amizade que construímos desde então; a Jéssica, pois sua amizade, otimismo e zelo, digno de irmã mais velha, trouxe paz nos momentos difíceis e por desbravarmos juntas o ENVI-met; a Lara, pois nossa amizade e companheirismo tornaram a jornada mais leve, e as coronas tornaram meus dias mais felizes; a Bia, por sua amizade e bons conselhos sobre a vida; e ao Wellington, por sua amizade e apoio.

Agradeço a CAPES pela concessão da bolsa de estudos que me permitiu estudar durante o desenvolvimento da presente pesquisa.

## RESUMO

O estudo dos parâmetros urbanísticos frente à expansão urbana horizontal e vertical se torna imprescindível, devido ao potencial de otimizar o aproveitamento dos recursos naturais adequados ao clima local, princípio do urbanismo bioclimático. A ausência de planejamento urbano prévio provoca a perda de qualidade de vida no meio ambiente urbano, seguido de diversos impactos ambientais, como: ilhas de calor, enchentes, efeito *smog*, entre outros. Diante desse cenário, a presente pesquisa teve como objetivo analisar a influência do adensamento urbano por meio da verticalização no ambiente térmico urbano, com base em parâmetro urbanístico tradicional (reco progressivo), a partir do lote como unidade mínima de planejamento, tomando como estudo de caso a cidade de Arapiraca, localizada no semiárido alagoano, no período quente/ seco. Isso foi possível por meio de simulações computacionais de cenários urbanos hipotéticos (pesquisa preditiva), com uso do *software* ENVI-met 4.0. A partir das estratégias bioclimáticas adequadas ao clima local, foram elaborados 18 modelos, com norte igual a 0° e 45°, sob o conceito da porosidade e rugosidade, condicionantes climáticos que possuem estreita ligação com a geometria do cânion urbano (relação H/W), a partir do tipo de tecido urbano que apresenta tendência à verticalização na cidade. A análise do desempenho térmico se deu mediante dados de temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos ventos e do índice PMV. Os resultados obtidos indicaram que o sentido de incidência da ventilação natural oblíquo às edificações (N=45°) apresentou condições de sensação térmica mais amenas. No que tange o reco progressivo, os cenários em que foi utilizado apenas o reco inicial apresentaram melhores condições de sensação térmica urbana, devido a maior área de sombra gerada pelas edificações verticalizadas, o que coincide com a principal estratégia bioclimática identificada para o clima local: o sombreamento. Contudo, na análise quanto dos ventos, o uso do reco progressivo demonstrou desempenho climático superior quanto à porosidade e rugosidade da malha urbana. Portanto, evidenciou-se a importância do urbanismo bioclimático como ferramenta para o planejamento urbano.

Palavras-chave: Clima Urbano. Urbanismo Bioclimático. Verticalização. Simulação Computacional.

## ABSTRACT

The study of urban parameters in the face of horizontal and vertical urban expansion becomes essential, due to the potential to optimize the use of natural resources appropriate to the local climate, the principle of bioclimatic urbanism. The absence of prior urban planning causes a loss of quality of life in the urban environment, followed by several environmental impacts, such as: heat islands, floods, smog effect, among others. In view of this scenario, this research aimed to analyze the influence of urban density through verticalization in the urban thermal environment, based on a traditional urban parameter (progressive retreat), from the lot as a minimum planning unit, taking as a study of the case of Arapiraca, located in the semi-arid region of Alagoas, in the hot / dry period. This was made possible through computer simulations of hypothetical urban scenarios (predictive research), using the ENVI-met 4.0 software. In view of the bioclimatic strategies appropriate to the local climate, 18 models were developed, with north equal to 0 ° and 45 °, under the concept of porosity and roughness, climatic conditions that have a close connection with the geometry of the urban canyon (H / W ratio) , based on the type of urban fabric that tends to verticalize in the city. The analysis of thermal performance was performed using data on air temperature, radiant temperature, wind speed / direction and the PMV index. The results obtained indicated that the direction of incidence of natural ventilation oblique to the building (N = 45 °) presented milder thermal sensation conditions. Regarding the progressive setback, the scenarios in which only the initial setback was used presented better conditions of urban thermal sensation, due to the greater shadow area generated by the verticalized buildings, which coincides with the main bioclimatic strategy identified for the local climate: the shading. However, in the analysis of the winds, the use of progressive retreat showed superior climatic performance in terms of porosity and roughness of the urban fabric. Therefore, the importance of bioclimatic urbanism as a tool for urban planning became evident.

Keywords: Urban Climate. Bioclimatic Urbanism. Verticalization. Computational Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Escalas climáticas urbanas.....	28
Figura 2 - Escalas espaciais verticais .....	29
Figura 3 - Perfil do vento a partir da influência do tipo de rugosidade.....	31
Figura 4 – Movimento do ar sobre edifícios .....	32
Figura 5 – Movimento do ar sobre edifícios .....	33
Figura 6 - Diferentes formas urbanas para uma mesma densidade populacional .....	34
Figura 7 - Efeito da vegetação na temperatura do ar no período diurno e noturno.....	41
Figura 8 - Efeito da radiação solar com base na relação H/W igual a 1 (a) e 4 (b).....	42
Figura 9 – Fator de céu visível (FVC).....	44
Figura 10 – Esquematização dos materiais e métodos da dissertação.....	49
Figura 11 – Área urbana de Arapiraca (A), Área urbana e rural de Arapiraca (B) e localização do município no estado de Alagoas (C).....	50
Figura 12 – Localização (A), relevo (B) e clima de Arapiraca/ AL (C).....	51
Figura 13 - Atual processo de verticalização em Arapiraca.....	56
Figura 14 – Padrão recorrente de ocupação, com base no desenho das quadras, lotes, vias e passeios.....	62
Figura 15 – Modelo da quadra dos cenários urbanos hipotéticos .....	63
Figura 16 – Modelo da quadra dos cenários urbanos hipotéticos .....	64
Figura 17 - Configuração inicial dos modelos dos cenários hipotéticos .....	70
Figura 18 - <i>Simple forcing</i> e os dados de temperatura do ar e umidade do ar.....	72
Figura 19 – Localização dos 4 pontos para extração de dados das variáveis climáticas e da linha de corte no modelo padrão dos cenários urbanos hipotéticos .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros construtivos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL (2001) .....	23
Tabela 2 – Dados adotados na elaboração do modelo para os cenários urbanos hipotéticos...	63
Tabela 3 - Materiais utilizados na elaboração dos modelos .....	64
Tabela 4 - Parâmetros construtivos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL (2001) e do Código de Urbanismo e Edificações do município de Maceió/ AL (2007).....	66
Tabela 5 - Dados climáticos de 26 de novembro de 2015.....	69
Tabela 6 - Dados de entrada para simulação computacional no <i>software</i> ENVI-met.....	71
Tabela 7 – Classificação do índice PMV.....	73
Tabela 8 – Dados de Temperatura Radiante às 09h nos 4 pontos ao redor da quadra central .	84
Tabela 9 – Dados de Temperatura Radiante às 15h nos 4 pontos ao redor da quadra central .	91
Tabela 10 – Dados de Temperatura Radiante às 21h nos 4 pontos ao redor da quadra central	99
Tabela 11 – Dados da velocidade dos ventos às 15h.....	111
Tabela 12 – Dados do índice PMV às 09h .....	117
Tabela 13 – Dados do índice PMV às 15h .....	122
Tabela 14 – Dados do índice PMV às 21h .....	127

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Temperatura média mensal do ar de Arapiraca .....	51
Gráfico 2 - Umidade relativa média mensal do ar de Arapiraca .....	52
Gráfico 3 - Dados climáticos para o dia 26/11/2015 de temperatura e umidade relativa do ar	70
Gráfico 4 – Dados de Temperatura Radiante às 09h .....	85
Gráfico 5 – Dados de Temperatura Radiante às 15h .....	92
Gráfico 6 – Dados de Temperatura Radiante às 21h .....	99
Gráfico 7 – Dados de velocidade dos ventos às 15h .....	112
Gráfico 8 – Dados do índice PMV às 09h .....	118
Gráfico 9 – Dados do índice PMV às 15h .....	123
Gráfico 10 – Dados do índice PMV às 21h .....	128

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Valor do albedo de materiais presentes no ambiente urbano. ....	39
Quadro 2 - Rosas dos ventos com médias mensais de frequência e direção dos ventos em Arapiraca. ....	53
Quadro 3 - Estratégias bioclimáticas propostas pela NBR 15220-3 e pelas metodologias da Carta Bioclimática de Givoni (1992) adaptada <sup>5</sup> e o Método Mahoney Nebuloso <sup>6</sup> (MMN) para a cidade de Arapiraca. ....	54
Quadro 4 - Mapa cronológico das primeiras edificações verticalizadas de Arapiraca. ....	55
Quadro 5 - Edificações verticalizadas presentes no perímetro entre o Arapiraca <i>Garden Shopping</i> e a Avenida Deputada Ceci Cunha. ....	57
Quadro 6 - Caracterização de cada tipo de tecido urbano de Arapiraca. ....	59
Quadro 7 - Dados de remembramento de 2 e 3 lotes, segundo o número de pavimentos. ....	67
Quadro 8 - Cenários hipotéticos elaborados a partir da porosidade. ....	67
Quadro 9 – Temperatura do ar dos modelos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações. ....	75
Quadro 10 – Temperatura do ar dos modelos de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações. ....	77
Quadro 11 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 09h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°) ....	79
Quadro 12 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 09h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°) ....	80
Quadro 13 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 09h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). ....	81
Quadro 14 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 09h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). ....	83
Quadro 15 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°) ....	86
Quadro 16 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°) ....	87
Quadro 17 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). ....	88

Quadro 18 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	90
Quadro 19 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°) .....	93
Quadro 20 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°) .....	94
Quadro 21 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	95
Quadro 22 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	97
Quadro 23 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	100
Quadro 24 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	102
Quadro 25 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	103
Quadro 26 – Perfis e mapas de velocidade/ direção dos ventos às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	105
Quadro 27 – Perfis e mapas de velocidade/ direção às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	106
Quadro 28 – Perfis e mapas de velocidade/ direção às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	108
Quadro 29 – Perfis e mapas velocidade/ direção dos ventos às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	110
Quadro 30 – Mapas Do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	114
Quadro 31 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	114
Quadro 32 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	116

Quadro 33 – Mapas 2D do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	119
Quadro 34 – Mapas do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	119
Quadro 35 – Mapas do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	121
Quadro 36 – Mapas 2D do índice PMV às 21h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	124
Quadro 37 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°). .....	124
Quadro 38 – Mapas do índice PMV às 21h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°). .....	126
Quadro 39 – Mapas 2D do índice PMV às 9h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	129
Quadro 40 – Mapas 2D do índice PMV às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	130
Quadro 41 – Mapas 2D do índice PMV às 21h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente). .....	131

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICU	Ilhas de Calor Urbano
H	Altura dos Edifícios
W	Espaçamentos entre os Edifícios
TO	Taxa de Ocupação
CA	Coefficiente de Aproveitamento
SA	Superfície de Água
ARB	Área Arborizada
MI	Ministério da Integração Nacional
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
PIBIC	Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
PET	Índice de Temperatura Fisiológica Equivalente
UCL	Camada Intra-Urbana
UBL	Camada Limite Urbana
Zg	Rugosidade
FCV	Fator de Céu Visível
PMV	Índice de Voto Médio Predito
Rf	Recuo Frontal
Rp	Recuo Posterior
Rl	Recuo Lateral
REF	Cenário hipotético sem uso do recuo progressivo, edificações com 1 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
RI-05	Cenário hipotético sem uso do recuo progressivo, edificações com 5 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
RI-10	Cenário hipotético sem uso do recuo progressivo, edificações com 10 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
RI-15	Cenário hipotético sem uso do recuo progressivo, edificações com 15 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
RP-05	Cenário hipotético com uso do recuo progressivo, edificações com 5 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
RP-10	Cenário hipotético com uso do recuo progressivo, edificações com 10 pavimentos, Norte = 0°/ 45°

RP-15	Cenário hipotético com uso do recuo progressivo, edificações com 15 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
R-RI	Cenário hipotético sem uso do recuo progressivo, edificações com 5, 10 e 15 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
R-RP	Cenário hipotético com uso do recuo progressivo, edificações com 5, 10 e 15 pavimentos, Norte = 0°/ 45°
OMM	Organização Mundial de Meteorologia

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1	Objetivos.....	24
1.2	Estrutura da Dissertação .....	24
<b>2</b>	<b>CLIMA URBANO E O PLANEJAMENTO DAS CIDADES.....</b>	<b>25</b>
<b>2.1</b>	<b>Clima e o Meio Ambiente Urbano.....</b>	<b>28</b>
2.1.1	Rugosidade e Porosidade.....	30
2.1.2	Densidade Construída.....	33
2.1.3	Uso do Solo .....	35
2.1.4	Orientação.....	35
2.1.5	Permeabilidade Superficial do Solo Urbano .....	36
2.1.6	Propriedades Termodinâmicas dos Materiais Constituintes da Estrutura Urbana .....	37
2.1.7	Tamanho da Estrutura Urbana (em extensão horizontal e altura) .....	40
2.1.8	Áreas Verdes.....	40
<b>2.3</b>	<b>Adensamento Urbano e Parâmetros Urbanísticos .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4</b>	<b>O Uso de Simulações Computacionais para Análise do Clima Urbano .....</b>	<b>45</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusões do Capítulo .....</b>	<b>48</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>49</b>
3.1.1	Descrição do objeto de estudo .....	49
<b>3.2</b>	<b>Métodos .....</b>	<b>60</b>
3.2.1	Elaboração dos Cenários Hipotéticos .....	61
3.2.2	Dados de entrada para simulação no <i>software</i> ENVI-met.....	69
3.2.3	Simulação Computacional dos Cenários Hipotéticos.....	72

3.2.4 Análise da relação entre os Parâmetros Urbanísticos Quantificados para os Cenários Hipotéticos e as Variáveis Climáticas .....	72
<b>3.3 Conclusões do Capítulo .....</b>	<b>73</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>4.1 Análise do desempenho dos cenários quanto à temperatura do ar .....</b>	<b>75</b>
<b>4.2 Análise do desempenho dos cenários quanto à temperatura radiante .....</b>	<b>78</b>
<b>4.3 Análise do desempenho dos cenários quanto à ventilação natural .....</b>	<b>104</b>
<b>4.4 Análise do desempenho dos cenários quanto ao índice PMV .....</b>	<b>113</b>
<b>4.5 Conclusões do Capítulo .....</b>	<b>132</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>133</b>
<b>5.1 Limitações da pesquisa e apontamentos para trabalhos futuros .....</b>	<b>135</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE A – Parâmetros urbanísticos presentes em legislação de uso e ocupação do solo de cidades brasileiras .....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>APÊNDICE B – Gráficos de velocidade dos ventos dos cenários urbanos hipotéticos (N=0°/45°) .....</b>	<b>147</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O relatório da Organizações das Nações Unidas, intitulado *Perspectivas da Urbanização Mundial para 2018: Destaques* (ONU, 2019), afirmou que mais pessoas vivem em áreas urbanas do que em áreas rurais, com 55,3% da população mundial residindo em áreas urbanas. No Brasil, o último censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), constatou que a população urbana já corresponde a 84,36% de seu total (IBGE, 2010).

O crescimento populacional é um dos indutores de todo o ciclo de modificações no clima urbano, pois leva ao adensamento e à verticalização das áreas urbanas, o que afeta ainda mais as condições climáticas (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018). Concomitantemente, a vivência nas cidades tem sido caracterizada pela perda da qualidade de vida, acompanhada de diversos impactos ambientais (como as ilhas de calor, efeito *smog* fotoquímico<sup>1</sup>, enchentes, entre outros) decorrentes dos padrões de produção e consumo (BARBIRATO; TORRES; BARBOSA, 2015). Assim, um dos grandes desafios dos centros urbanos é conciliar crescimento e desenvolvimento urbano e econômico com o equilíbrio entre a geração de riqueza e qualidade de vida e ambiental, visto que as áreas urbanas possuem suas próprias condições intrínsecas ambientais de luz, paisagem, geomorfológicas etc., e por isso geram um clima tipicamente urbano (HIGUERAS, 1998).

De acordo com Barakat *et al.* (2017), o principal problema é o *design* urbano contemporâneo não responsivo ao conforto térmico humano e à eficiência energética. Para Givoni (1998), através de políticas urbanas e do desenho urbano, pode-se interferir no clima de determinada localidade, promovendo o conforto térmico dentro e fora das edificações. A legislação que trata do uso e ocupação do solo é um exemplo de política urbana que regula, por meio de parâmetros urbanísticos, a ocupação do meio ambiente urbano. Nesse contexto,

A legislação de uso e ocupação do solo já prevê alguns parâmetros construtivos que limitam e regulam a ocupação do solo, e até estipulam taxa mínima de permeabilidade em alguns casos. No entanto, esses parâmetros pouco se baseiam em estudos climáticos e projeções de seus impactos no microclima local, levando muitas vezes a propostas que não auxiliam na preservação das condições climáticas adequadas, regulando somente a ocupação ordenada do solo (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018, p.178).

---

<sup>1</sup> O efeito *smog* fotoquímico é a poluição atmosférica, sobretudo em áreas urbanas, por ozônio e outros compostos originados por reações fotoquímicas, reações químicas causadas pela luz solar (LEMOS, 2010).

O planejamento urbano deve estar fundamentado na bioclimatologia, que consiste no princípio de adaptação dos elementos construídos ao meio ambiente a partir de considerações climáticas, e apresenta significativa contribuição para o alcance da sustentabilidade urbana, baseando-se no aproveitamento dos recursos passivos (naturais) de climatização dos espaços edificados (BARBIRATO; TORRES; BARBOSA, 2015). Higuera (2006) reforçou o papel da bioclimatologia no planejamento das cidades ao difundir o conceito de urbanismo bioclimático.

Diante disso, acerca do urbanismo bioclimático, a literatura especializada aponta o modelo de cidade compacta como ideal para o alcance da sustentabilidade urbana, visto que o modelo de malha urbana dispersa, segundo Barbirato, Torres e Barbosa (2015), gera problemas ambientais em face ao espalhamento da estrutura urbana, eliminando coberturas vegetais nativas, aumentando demandas por consumo de energia, exigindo intenso uso de veículos para transporte de mercadorias e pessoas (aumentando a poluição do ar através da emissão de gases provenientes de combustíveis fósseis), afetando, também, a elevação da impermeabilização do solo natural decorrente da pavimentação excessiva (exercendo sérios danos ao ciclo hidrológico, causando enchentes, impactando o clima urbano).

No modelo de cidade compacta o adensamento urbano deve ser estimulado de forma planejada e utilizando o uso misto do solo urbano, pois as áreas adensadas implicam na otimização de infraestrutura urbana, na diversidade de usos e na redução do tempo de deslocamento, que por sua vez, diminui o consumo de combustíveis fósseis e diminui a emissão de gases poluentes provenientes de veículos automotores (DUARTE, 2012; SILVA JÚNIOR, 2016).

Com base no modelo de cidade compacta, **torna-se imprescindível o estudo de sua aplicabilidade a partir das especificidades de cada cidade, em relação ao clima urbano local e as características da forma urbana**, pois desta forma é possível contribuir para uma intervenção mais consciente na organização do espaço (MENDONÇA; DANNI-OLIVEIRA, 2007). A partir disso,

(...) evidencia-se a importância da investigação de parâmetros de forma e morfologia urbana para o alcance de diretrizes relacionadas com o controle do adensamento construtivo urbano. Para isso, torna-se imprescindível o conhecimento das especificidades climáticas de cada localidade, fundamentados na climatologia urbana (TORRES, 2017, p.71).

Caso contrário, “um arranjo de alta densidade sem o planejamento necessário pode criar uma série de problemas, incluindo também aspectos ambientais” (GUSSON, 2014, p.5). Como é o caso das ilhas de calor urbano (ICU). O fenômeno das ilhas de calor tem sido observado em diversas cidades do mundo, de grande ou médio porte, e corresponde à diferença dos valores

de temperatura do ar do meio urbano e rural. A ICU se apresenta, predominantemente, no período noturno, mas também pode ocorrer durante o dia.

Ao tratar do adensamento urbano, o processo de verticalização é um ponto de importante relevância, pois exercem influência sobre o microclima urbano, ao passo que o aumento da altura das edificações gera sombreamentos, reduz o acesso solar, aumenta a absorção de ondas longas e modifica o comportamento do vento devido aos obstáculos em que se configuram as construções (KLEEREKOPER; VAN ESCH; SALCEDO, 2012). Logo, é imprescindível o estudo, fundamentado na adequação climática, de parâmetros urbanísticos que visem o adensamento urbano a partir da verticalização no meio urbano.

Nogueira *et al.* (2018) apontou que estudos do microclima urbano deveriam ser mais utilizados como ferramenta para o planejamento urbano e desenho dos edifícios, uma vez que geram subsídios que orientam decisões que vão impactar a qualidade de vida da população. Vale ressaltar que, de acordo com Ugeda Júnior e Amorim (2016), as cidades crescem de forma diversificada, mesmo que muitos problemas sejam comuns. A variação de intensidade, de frequência de ocorrência e da população atingida confere, à cada cidade, particularidades e especificidades próprias, com maior ou menor grau de risco e de impactos à qualidade ambiental e à qualidade de vida da população.

É preocupante que,

(...) as cidades brasileiras, salvo raras exceções, passaram por expansão territorial desprovida de processos de planejamento urbano, principalmente, aqueles capazes de prever situações de longo prazo. Deste modo, se observa um crescimento desordenado em um número significativo de cidades. A gestão urbana, na maioria das vezes, se restringe à correção dos problemas gerados pelo crescimento desordenado. Associando-se a ausência de planejamento à descontinuidade administrativa, verifica-se que as cidades se desenvolvem de maneira caótica, sem seguir um plano estratégico. As motivações para tal crescimento são quase que exclusivamente econômicas, e o interesse financeiro, visando à maximização do lucro, é o que dá as diretrizes básicas para o crescimento urbano sem se considerar as consequências dessa forma de agir (UGEDA JÚNIOR, AMORIM, 2016, p. 168).

Portanto, é imprescindível a adoção dos conceitos do urbanismo bioclimático no processo do planejamento urbano refletido nas diretrizes urbanísticas contidas nos planos, códigos e leis. A presente pesquisa se insere nesse contexto, de analisar a influência do processo de urbanização no clima urbano, com fim de subsidiar a identificação de soluções para a adequação da forma urbana às características geográficas locais.

Visto que no planejamento urbano se busca prevê o crescimento ordenado das cidades, estudos com base em cenários hipotéticos utilizam modelos matemáticos, como o de Oke (1981), que trata sobre a influência da razão entre a altura dos edifícios (H) e o espaçamento

(W) entre eles no fluxo de radiação de onda longa, e a influência do fator de visão do céu no aumento da temperatura do ar. A nível nacional, Duarte (2000) desenvolveu um modelo matemático para análise do clima urbano a partir da taxa de ocupação do solo (TO), o coeficiente de aproveitamento (CA), superfície de água (SA) e área arborizada (ARB).

Com o avanço da tecnologia, modelos matemáticos foram utilizados no desenvolvimento de ferramentas computacionais “para facilitar a utilização das formulações físicas e matemáticas referentes à análise de fenômenos da atmosfera urbana” (TORRES, 2017, p.45). Assim,

(...) a possibilidade de trabalhar com simulações computacionais que mostrem diversas alternativas de organização dos espaços urbanos – fundamentadas em critérios ambientais, como o conforto térmico dos ambientes urbanos – pode ser útil na demonstração das dinâmicas do microclima urbano em busca do conforto térmico (BARBIRATO; TORRES; BARBOSA, 2015).

Dentre os programas de simulação computacional, destaca-se o ENVI-met, que é adotado em pesquisas que tratam da análise do clima urbano em escala microclimática. O ENVI-met corresponde a uma ferramenta computacional fundamentada em um modelo tri-dimensional de clima urbano que simula as relações entre a estrutura urbana e o ambiente, oferecendo várias possibilidades de aplicação e associações, permitindo a simulação do ambiente térmico urbano (BRUSE, 2019).

Portanto, através das simulações computacionais geradas com o programa ENVI-met é possível fundamentar pesquisas e analisar parâmetros construtivos, a fim de legitimar mudanças na organização da morfologia urbana, de forma a proporcionar qualidade de vida no meio ambiente citadino, como também, minimizar ou até evitar impactos ambientais comumente noticiados em telejornais por todo o país, como por exemplo: as ilhas de calor, enchentes, efeito *smog* fotoquímico, deslizamentos etc.

A partir do princípio de estudar o clima urbano, a fim de constituir as bases para um planejamento urbano sustentável e produzir mecanismos que legislam sobre o uso e ocupação do solo na malha urbana, adotou-se como estudo de caso a cidade de Arapiraca/ AL. Nas últimas três décadas, o município de Arapiraca registrou um crescimento urbano de 78% (PREFEITURA DE ARAPIRACA, 2011), contudo o Plano Diretor do município, aprovado em 23 de janeiro de 2006 com o advento do Estatuto das Cidades pelo Decreto nº 5.790/2006, não passou por revisão desde então, e nem se criou instrumentos jurídicos para regulamentar mecanismos presentes no plano, como a Lei de Uso e Ocupação do Solo, Código de Edificações e Urbanismo, Código do Meio Ambiente e Lei de Zoneamento.

Os parâmetros construtivos presentes no atual Código de Edificações e Urbanismo estão presentes na Tabela 1:

Tabela 1 - Parâmetros construtivos do Código de Obras e Edificações de Arapiraca/ AL (2001)

ESPECIFICAÇÃO	METRAGEM DETERMINADA (m)
Recuo Frontal	3,0m
Recuo Lateral com Abertura	1,5m
Recuo Posterior	1,5m

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Os parâmetros construtivos presentes no Código de Edificações e Urbanismo valem para todo o município, apesar do Plano Diretor indicar seu macrozoneamento. Diante da omissão dos gestores públicos quanto à definição de parâmetros urbanísticos de ocupação, o meio ambiente urbano de Arapiraca se encontra vulnerável à perda de qualidade de vida urbana, acompanhada de impactos climáticos, decorrentes dos padrões construtivos regidos pelo mercado imobiliário. Essa é uma realidade comum não só em Arapiraca, mas em grande parte das cidades brasileiras de pequeno e médio porte.

Portanto, justifica-se o objeto de estudo da presente pesquisa pela necessidade de integração entre os princípios da climatologia urbana e o urbanismo bioclimático ao planejamento urbano, com fim de otimizar o aproveitamento de recursos naturais através de parâmetros urbanísticos, que norteiam a ocupação do solo urbano. Acerca dessa temática, foi importante levantar pesquisas já realizadas no município, como: o estudo da intensidade e direção predominante de ventos e precipitação para aplicação em projetos de arquitetura (NUNES, SILVA, BARBOSA, 2019), o estudo das estratégias bioclimáticas adequadas ao clima local (SILVA, 2019), o estudo da influência da verticalização no comportamento microclimático (BRANDÃO, SILVA, BARBOSA, 2019), o estudo do adensamento urbano no desempenho climático dos espaços urbanos e nos padrões de aproveitamento das estratégias bioclimáticas a partir da quadra como unidade mínima de planejamento (TORRES, 2017).

Vale ressaltar que a presente pesquisa se apresenta como uma continuação de estudos anteriores realizados pela autora, como colaboradora e depois bolsista pelo Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PIBIC), pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), aliado ao Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), intitulado “Verticalização e Microclimas: estudo de cenários em fração urbana na cidade de Arapiraca-AL”, no qual se avaliou possíveis impactos do atual Código de Obras e Edificações de Arapiraca (2001) frente à verticalização.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral do trabalho consiste em analisar a influência da verticalização no ambiente térmico urbano, com base na adoção do recuo inicial e recuo progressivo, parâmetros urbanísticos tradicionais, adotando como estudo de caso a cidade de Arapiraca/AL, localizada no agreste alagoano, a partir do lote como unidade mínima de planejamento.

Para isso, foi necessário delimitar os seguintes objetivos específicos:

- Compreender a influência da forma urbana na conformação do microclima, especialmente sob os aspectos da porosidade e rugosidade;
- Avaliar a influência do recuo inicial e recuo progressivo no desempenho microclimático no cânion urbano, por meio de simulação computacional no *software* ENVI-met.
- Analisar a influência da orientação de incidência dos ventos predominantes na fração urbana quanto ao conforto térmico;
- Analisar a aplicabilidade do modelo de cidade compacta em cidade de clima semiárido, com base no urbanismo bioclimático, para o período quente/ seco.

## 1.2 Estrutura da Dissertação

A dissertação está organizada em 5 capítulos. O primeiro capítulo faz uma introdução à temática em estudo, apresentando a problemática abordada e os objetivos da pesquisa. O segundo capítulo se trata de uma revisão de literatura quanto às questões sobre o clima urbano e o planejamento das cidades, em que foram pontuados os principais conceitos do tema da pesquisa. No terceiro capítulo, materiais e métodos, foram elencados os procedimentos seguidos durante a pesquisa a partir do objetivo traçado. O quarto capítulo corresponde aos resultados e discussões, com a análise do desempenho térmico dos modelos urbanos hipotéticos simulados em função do parâmetro urbanístico proposto pela presente pesquisa. Por fim, o quinto capítulo abordou as considerações finais, com o diagnóstico do resultado geral obtido, as limitações da pesquisa e as sugestões de trabalhos futuros.

## 2 CLIMA URBANO E O PLANEJAMENTO DAS CIDADES

O processo de urbanização, que ocorre com a substituição da paisagem natural por equipamentos urbanos em decorrência da ampliação e do crescimento da malha urbana, provoca notáveis mudanças no clima local, fazendo com que o clima da cidade se revele diferente do clima do campo circundante (SOBREIRA *et al.*, 2011). Desta forma, clima urbano é denominado como o sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização (MONTEIRO, 1976).

A partir do processo de urbanização, o clima citadino tem sido caracterizado pelo aumento da temperatura do ar, diminuição da umidade relativa do ar, modificação da direção do vento, aumento da pluviosidade e pela alteração da composição química da atmosfera (FREITAS, 2005). A razão preponderante segundo a qual áreas urbanas se tornam desnecessariamente desconfortáveis se deve ao fato de que a questão de conforto em espaços abertos recebe pouca atenção por parte de planejadores urbanos (ELIASSON, 2000). Com o intuito de reverter esse quadro,

Para garantir condições de habitabilidade no meio urbano, deve-se adotar o uso racional dos recursos naturais e diminuir os impactos negativos referentes aos resíduos inerentes ao processo de produção do espaço. Dentre os diversos aspectos que podem ser analisados para o cumprimento deste escopo, destacam-se (...) a abordagem sobre a necessidade de desenvolvimento de estratégias para a minimização do consumo de energia (entradas) e as estratégias para minimizar os impactos negativos referentes às modificações climáticas decorrentes do processo de urbanização, como acúmulo de calor (saídas) (TORRES, 2017, p.53).

O equilíbrio entre entradas e saídas (*inputs e outputs*) no sistema urbano pode ser subsidiado pelo uso racional de energia a partir do aproveitamento dos recursos naturais de climatização – base conceitual da bioclimatologia arquitetônica e urbana (BARBIRATO; TORRES; BARBOSA, 2015).

A bioclimatologia, segundo Oliveira (1988), envolve biologia (estudo das percepções e reações humanas) e a climatologia (estudo do meio com o que o homem interage). A climatologia urbana “constitui uma subdivisão da Meteorologia e da Geografia e corresponde ao campo disciplinar de estudo da espacialização e evolução dos elementos e fenômenos atmosféricos” (TORRES, 2017, p.22). Segundo com Higuera (2009), os objetivos do urbanismo bioclimático são: planejar sob critérios ambientais com o fim de estabelecer uma gestão eficiente de recursos materiais e energéticos; reduzir os impactos no ar, solo e água das emissões urbanas e melhorar a qualidade de vida dos moradores.

Diante disso, pesquisas acerca da adequação da forma urbana ao clima local têm ganhado destaque. Como exemplo, tem-se a pesquisa de Brandão (2009), que buscou gerar uma metodologia de avaliação da ambiência térmica urbana para orientar o planejamento das cidades, como também, buscou testar a hipótese de que os parâmetros urbanísticos tidos como tradicionais (taxa de ocupação, coeficiente de aproveitamento e recuos) são suficientes para que se determine a ambiência térmica do ambiente urbano. Como conclusão, o autor propôs equações de regressão cuja função consiste em relacionar ocupação urbana e variáveis meteorológicas locais e constatou, também, que parâmetros urbanísticos denominados avançados, que respeitam os princípios da bioclimatologia, devem ser incorporados no planejamento urbano.

Silva (2012) buscou analisar a influência da legislação urbana no microclima de um bairro central da cidade de Juiz de Fora/MG, com o fim de contribuir para um planejamento sustentável no município. Os estudos elaborados basearam-se nas análises de três configurações urbanas: a configuração real levantada *in loco*, o máximo de ocupação permitida pela legislação vigente e o máximo permitido pela proposta de alteração desta Lei. A partir do uso de simulações computacionais, os resultados obtidos da ventilação, temperatura e umidade relativa do ar indicaram que a área atual é capaz de, segundo a ocupação máxima permitida para a área, comportar maior densificação urbana, dependendo de soluções arquitetônicas para garantir níveis aceitáveis de conforto térmico.

Gusson (2014) analisou o efeito da densidade construída sobre o microclima urbano, por meio da construção de diferentes cenários paramétricos, considerando os possíveis padrões de ocupação de quadra, com diferentes tipologias de edifícios: o bloco perimetral, o edifício lâmina e o edifício torre, para a cidade de São Paulo. Com base em comparações entre os levantamentos de campo e as simulações computacionais, concluiu-se que numa mesma densidade construída, os arranjos apresentam comportamentos distintos, e dentre os casos estudados, o cenário torre apresentou as menores temperaturas do ar, nos períodos diurno e noturno, provavelmente devido ao sombreamento mútuo entre os edifícios, que contribui para o menor aquecimento das superfícies e, conseqüentemente, menor aquecimento do ar no entorno imediato.

Gaal (2017) teve como objetivo analisar o impacto da legislação urbana, que trata do uso e ocupação do solo, e da geometria urbana no microclima de um cânion urbano no município de Campinas/ SP. A autora comprovou haver uma forte relação entre o fator  $H/W$ , que é a proporção entre a altura das edificações ( $H$ ) e a largura das vias ( $W$ ), e índices de conforto térmico no cânion. Werneck (2018) estudou estratégias para mitigação das ilhas de

calor urbana (ICU) em espaços públicos de Brasília/ DF, levando em consideração o uso de materiais de alta refletância e emitância térmica e de vegetação, com o fim de analisar o impacto dos mesmos na temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante. Os resultados mostraram que a estratégia que combinou pavimentos com uso de materiais de alta refletância e emitância térmica e sombreamento com arborização respondeu melhor à variação da temperatura média radiante.

Torres (2017) investigou o impacto da forma urbana e do adensamento construtivo no desempenho climático do ambiente citadino e nos padrões de aproveitamento das estratégias bioclimáticas. Para isso, utilizou-se de parâmetros urbanísticos tradicionais e avançados para frações urbanas na cidade de Arapiraca/ AL. Concluiu que é imprescindível a adoção de parâmetros urbanísticos avançados, como a porosidade da malha urbana e o índice de densidade arbórea, baseando-se na adoção da quadra como elemento mínimo de planejamento urbano, de forma a favorecer o desempenho ambiental urbano.

Barbosa (2018) estudou a influência da verticalização na sensação térmica urbana, levando em consideração o modelo bioclimático de cidade compacta, no município de Maringá/ PR. Para isso, a autora avaliou se o aumento da altura dos edifícios em determinada fração urbana selecionada, mantendo o parcelamento e o uso de ocupação do solo, interferiria no conforto térmico urbano através da análise do índice de temperatura fisiológica equivalente (PET). A autora concluiu que a verticalização tem efeito positivo no conforto térmico a nível urbano, desde que princípios do urbanismo bioclimático sejam respeitados.

Em todas as pesquisas aqui mencionadas foi utilizado como método o uso de simulação computacional com o *software* ENVI-met, que será tratado mais adiante. Portanto, visto que

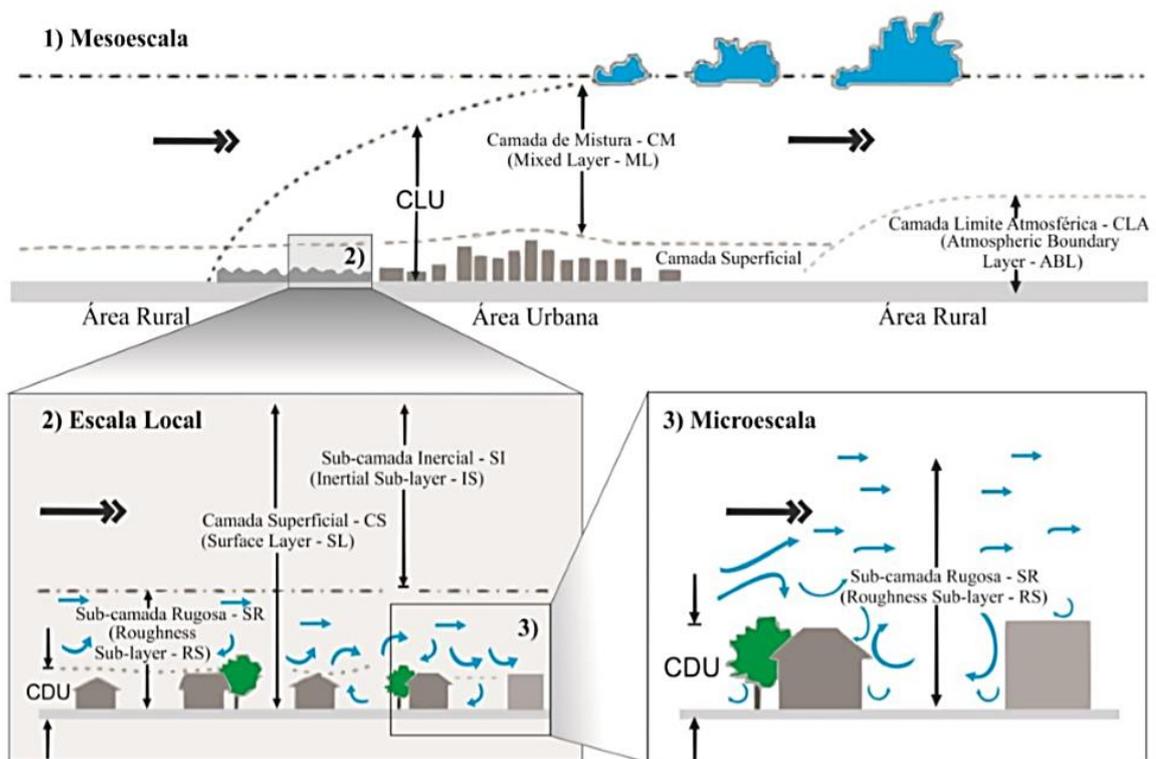
O desenho urbano e o planejamento, ao regulamentarem aspectos urbanísticos, definem questões físicas, legais e jurídicas que têm desdobramentos nas diretrizes construtivas para as edificações e nas condições ambientais arquitetônico-urbanísticas, com repercussões na qualidade do ambiente citadino e no conforto térmico (TORK; TIBIRIÇÁ; TIBIRIÇÁ, 2017, p.330).

Para a adoção da bioclimatologia no processo de planejamento urbano e na revisão de instrumentos reguladores do uso e ocupação do solo urbano é imprescindível entender a relação entre o clima e o meio ambiente urbano, conforme será abordado a seguir.

## 2.1 Clima e o Meio Ambiente Urbano

Os principais elementos do clima, pontuados por Oliveira (1988), são: a temperatura, a umidade do ar, os ventos, as precipitações e a duração de exposição ao sol. Já os mais significativos fatores modificadores do clima são: a altitude, a latitude, a radiação solar (intensidade e ação), o regime dos ventos (direção e frequência), o regime das precipitações, a distância de massas de água significativas, a vegetação e o relevo.

No estudo do clima urbano, o conceito de escalas espaciais auxilia no entendimento das formas pelas quais os elementos da superfície urbana interagem com as camadas atmosféricas adjacentes (BRITTER; HANNA, 2003). Oke (2004) definiu diferentes escalas climáticas urbanas (extensão horizontal) e limites da camada atmosférica influenciados por cada escala (extensão vertical). As escalas climáticas urbanas horizontais são classificadas segundo Oke (2006) conforme a Figura 1:



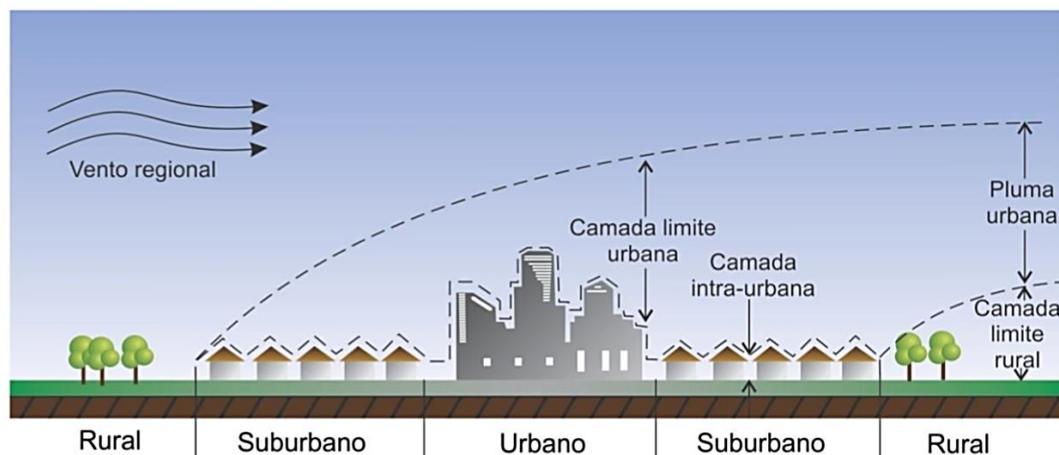
**Figura 1 - Escalas climáticas urbanas**

Fonte: Rossetti (2013), adaptado de Oke (2006)

A **mesoescala** incorpora a influência integrada da cidade no clima urbano, e abrange dezenas de quilômetros de extensão, dependendo da dimensão da cidade estudada. A **escala local** inclui os efeitos climáticos decorrentes da forma da paisagem, tal como as características

topográficas do relevo, mas exclui os efeitos microclimáticos de cobertura de solo, tamanho e disposição dos edifícios etc., e abrange de um a vários quilômetros. A **microescala** é a escala típica do microclima urbano, está relacionada com as dimensões individuais dos elementos urbanos (edifício, árvores, estradas, ruas, pátios, jardins etc.), e varia de um metro a centenas de metros (OKE, 2006). Tendo em vista que na microescala “toda superfície e objeto tem seu próprio microclima, como também o tem em sua vizinhança imediata” (OKE, 2006, p.3, tradução nossa), a presente pesquisa se insere nessa climática urbana.

As escalas espaciais verticais se dividem em camada intra-urbana (*UCL – urban canopy layer*) e a camada limite urbana (*UBL – Urban Boundary Layer*). A *UCL* fica abaixo do nível das coberturas da estrutura urbana e compreende microclimas criados por edifícios, estradas e vegetação, da camada limite urbana, enquanto a *UBL* fica acima do último nível das coberturas, que é uma integração dos microclimas urbanos sobre uma grande área (OKE, 1976, 1995), conforme ilustra a Figura 2.



**Figura 2 - Escalas espaciais verticais**  
 Fonte: Oke (1978), adaptado por Nogueira (2011)

É importante ressaltar que, numa situação em que determinada cidade contribua para o aquecimento do clima na camada limite urbana, a sombra de edificações verticalizadas na camada intra-urbana pode gerar temperaturas locais menores que as encontradas em áreas abertas (OKE, 1979). Assim, o efeito da urbanização difere entre as camadas *UCL* e *UBL*.

Contudo,

A magnitude de cada escala urbana não está de acordo com aquelas comumente dadas em livros didáticos. As escalas são conferidas pelas dimensões das características morfológicas que compõem uma paisagem urbana. Isso enfatiza a necessidade de descrever adequadamente as propriedades das áreas urbanas que afetam a atmosfera (OKE, 2006, p.9, tradução nossa).

Para Torres (2017), o conceito de morfologia urbana corresponde à combinação de três elementos principais da estrutura urbana: *o plano*, delimitado pelo conjunto de vias de circulação, parques, vazios urbanos e projeção de áreas construídas; *o construído*, delimitado pelo conjunto de edifícios construídos diferenciados pela sua tipologia e volume; e *os usos do solo*, delimitado pelo conjunto de diferentes utilizações do espaço para as funções urbanas – residenciais, industriais, residenciais, públicas, semipúblicas ou privadas.

As características morfológicas básicas mais importantes que compõe a paisagem urbana são:

(...) a *estrutura urbana* (dimensões dos edifícios e espaços entre elas, a largura das ruas e o espaçamento das ruas), a *cobertura urbana* (construída, pavimentada, com vegetação, solo nu, água), o *tecido urbano* (construção e materiais naturais) e o *metabolismo urbano* (calor, água e poluentes devido à atividade humana) (OKE, 2006, p.9, tradução nossa).

Nesse sentido, a morfologia urbana pode alterar o microclima urbano. Oliveira (1988) elenca características da forma urbana que atuam como condicionantes climáticos, com o intuito de auxiliar no processo de planejamento urbano sustentável, que tem por objetivo a redução de impactos ambientais e o equilíbrio entre *inputs* e *outputs*. As características são: a) rugosidade e porosidade, b) densidade construída, c) uso do solo, d) orientação, e) permeabilidade superficial do solo urbano, f) propriedades termodinâmicas dos materiais constituintes da estrutura urbana, g) tamanho da estrutura urbana (em extensão horizontal e altura) e h) áreas verdes. A seguir essas características são comentadas detalhadamente.

### 2.1.1 Rugosidade e Porosidade

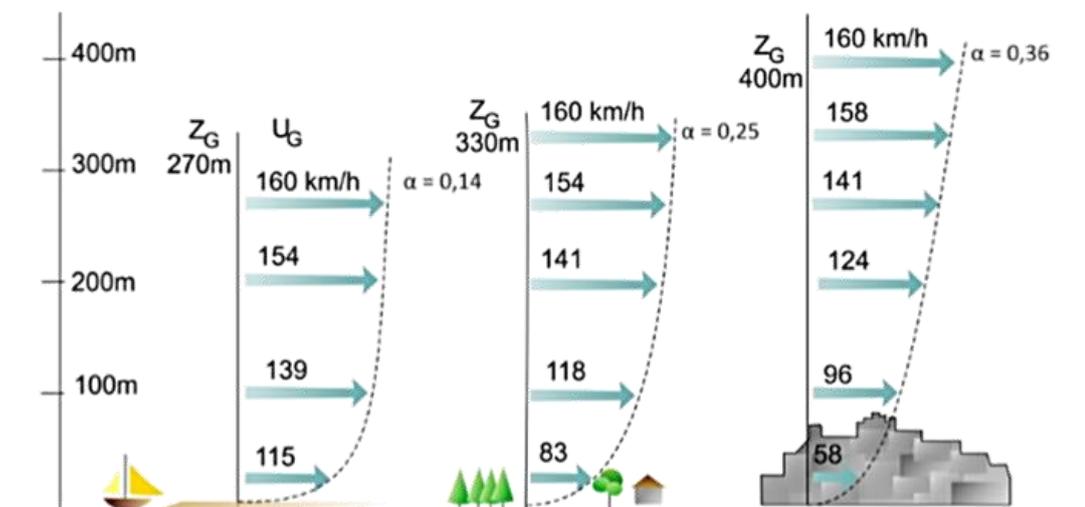
A rugosidade e porosidade são características da forma urbana que influenciam na permeabilidade dos ventos dentro da estrutura urbana. Sobre os ventos, Oliveira (1988) afirmou que o movimento das massas de ar é governado por três princípios básicos: a inércia, a diferença de pressão e a fricção.

O ar tem **inércia** e, uma vez em movimento, tem a tendência de continuar na mesma direção, até ser desviado por alguma força ou barreira. Quanto à **diferença de pressão**, o maior aquecimento e, conseqüentemente maior dilatação da massa de ar de uma determinada região, baixa a sua densidade e cria uma corrente ascendente – essa zona é chamado de baixa pressão. O menor aquecimento, junto a uma maior pressão de vapor, conseqüentemente maior densidade de ar noutra região, cria uma zona de alta pressão. A diferença de pressão entre ambas regiões dá origem ao deslocamento da massa de ar da zona de baixa pressão para a de alta pressão.

Quanto à **fricção**, no movimento das massas de ar, ao se atritarem com a superfície do solo, tanto reduz a velocidade desse movimento, quanto altera sua forma de deslocamento – deixando de ser lamelar (em lâminas) para se tornar turbilhonar (OLIVEIRA, 1988).

Quanto menor a velocidade dos ventos, maior será o tempo necessário para deslocar os poluentes da atmosfera urbana, e quanto mais rugosa for a superfície urbana, maior será o seu atrito como também, maior será a turbulência e menor a velocidade do vento.

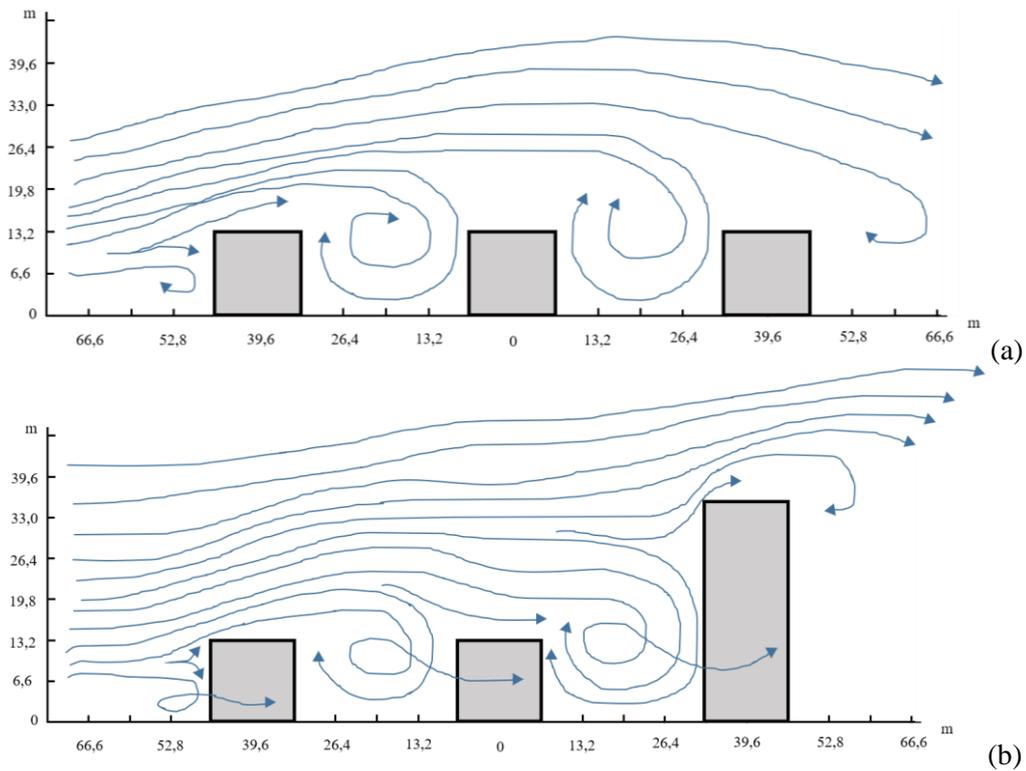
Oke (1996) define a rugosidade ( $Z_G$ ) de uma estrutura urbana como um parâmetro que expressa a morfologia geométrica da superfície, cujo conceito significa a medida da rugosidade aerodinâmica da superfície, relacionada à altura dos elementos, como também à forma e distribuição da densidade destes, afetando diretamente a velocidade das massas de ar que alcançam a estrutura urbana. “A rugosidade interfere, portanto, no perfil vertical do vento, conhecido como gradiente de vento” (TORRES, 2017, p.37), ver Figura 3.



**Figura 3 - Perfil do vento a partir da influência do tipo de rugosidade**

Fonte: Gandemer e Guyot (1976), adaptado por Nogueira (2011)

A Figura 4 demonstra o comportamento dos ventos frente às edificações de mesma altura (a) e de alturas diferentes (b). O edifício se torna uma barreira a ser vencida pela corrente de ar, e a sua forma de deslocamento deixa de ser lamelar para se tornar turbilhonar, o que acarreta a diminuição da velocidade dos ventos e na alteração de sua direção.

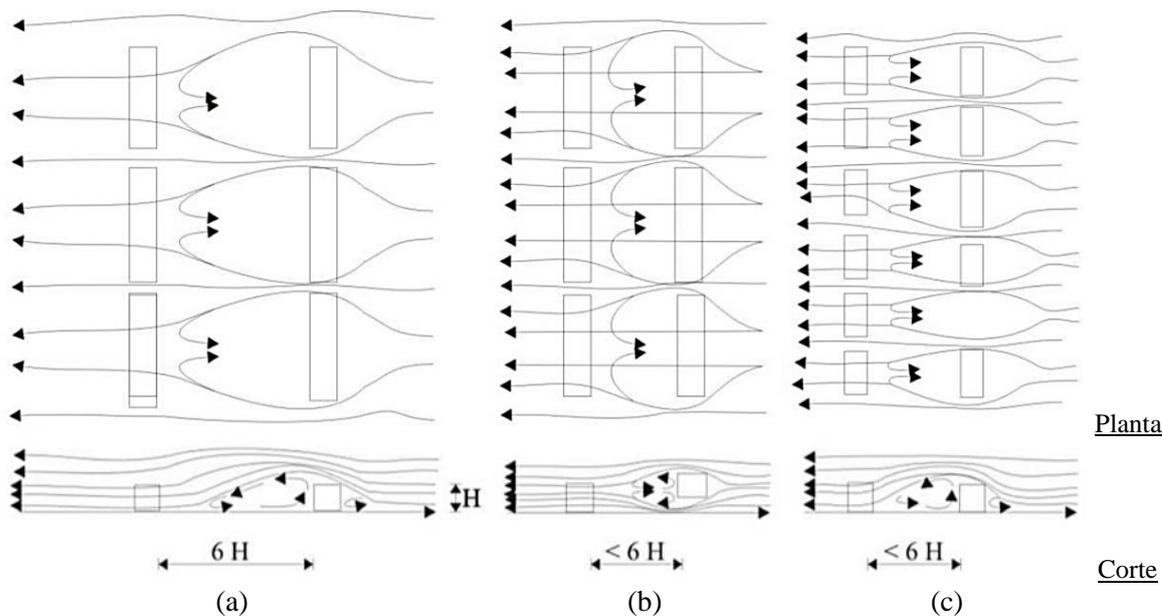


**Figura 4 – Movimento do ar sobre edifícios**

Fonte: Villas Boas (1979), adaptado pela Autora

A porosidade é compreendida como a maior ou menor permeabilidade aos ventos que uma estrutura urbana possa apresentar (OLIVEIRA, 1988). Para Torres (2017), a porosidade é determinada pela taxa de penetração de ventos na composição urbana e está relacionada diretamente com a capacidade das edificações e arranjos construtivos para permitir a dissipação dos ventos através de sua própria estrutura.

Villas Boas (1983) afirmou que as estruturas porosas são muito mais efetivas do que as opacas (não porosas) no sentido de favorecer a ventilação cruzada nas estruturas a sotavento. Segundo o autor, a ventilação cruzada nos edifícios a sotavento pode ser maximizada se eles estão situados a uma distância igual ou maior que  $6H$  dos edifícios a barlavento (ver Figura 5-a), que esta distância pode ser reduzida com uso de pilotis (ver Figura 5-b), e que esta distância pode também ser reduzida em um grupo de edifícios se são deixados vários espaços entre os edifícios situados a barlavento, criando assim um conjunto de obstáculos com alta porosidade (ver Figura 5-c).



**Figura 5 – Movimento do ar sobre edifícios**  
 Fonte: Villas Boas (1979), adaptado por Souza (2006)

Em relação à porosidade e os parâmetros urbanísticos,

A porosidade urbana é determinada pelos afastamentos entre edifícios, a taxa de ocupação, a existência de espaços vazios e a largura das vias. A diminuição da porosidade da malha urbana (redução de índices que definem afastamentos mínimos) entre o edifício e o limite do lote reduzem a velocidade dos ventos (TORRES, 2017, p.174).

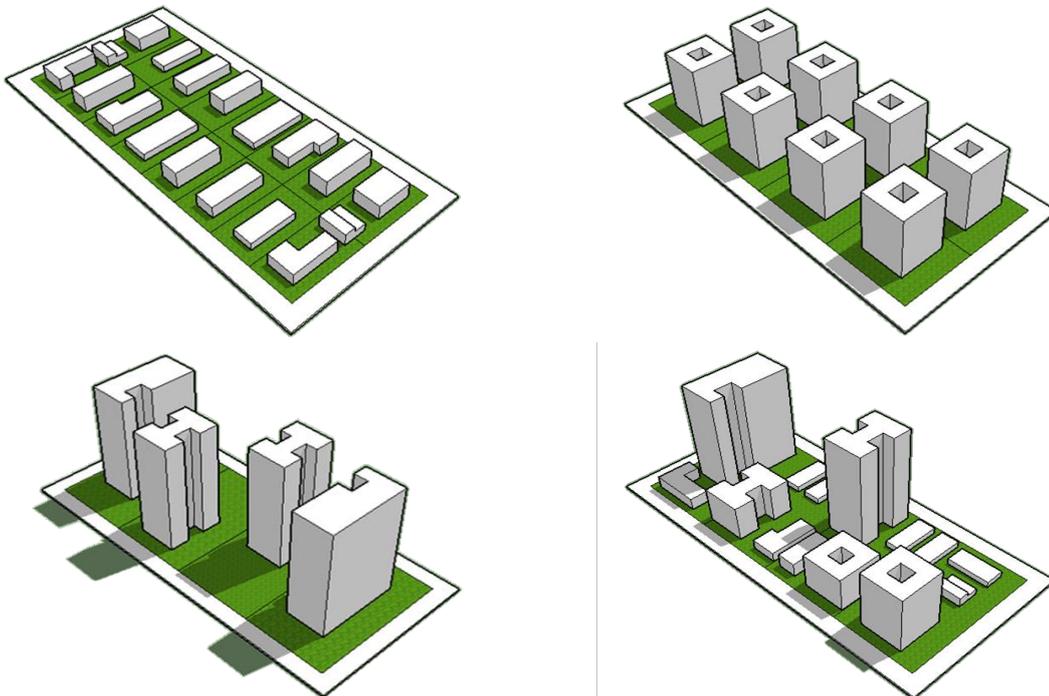
Para Romero (2011), quanto menor a porosidade da malha urbana, maior a compacidade do tecido, maior é a redução da radiação solar direta por sombreamento e maior o aumento da radiação difusa, devido às inter-reflexões entre as construções, sendo também maior a retenção de radiação de onda longa no espaço urbano. Assim, regiões não porosas acumulam mais calor devido às propriedades térmicas dos materiais, necessitando de maior ventilação para realizar trocas térmicas. Já regiões com maior porosidade são mais bem ventiladas do que as pouco porosas, e nas muito porosas há melhores trocas térmicas, renovação do ar e possibilidade de ventilação cruzada, o que é o ideal para regiões quentes (ROMERO, 2011).

### 2.1.2 Densidade Construída

Acerca da densidade construída, “com a consolidação do processo de urbanização e a passagem definitiva de um meio rural para o meio urbano, inicia-se um novo ciclo de transformações - o adensamento construtivo” (FREITAS, 2005, p.16). Diante disso,

A forma urbana desempenha importante papel para a aplicação de estratégias bioclimáticas nos espaços urbanos. Isso porque a densidade populacional indica o grau de compacidade de uma área urbana, e diferentes formas urbanas podem responder a um mesmo padrão de densidade com diferentes configurações de espaços abertos e, conseqüentemente, distintas condições microclimáticas (BARBIRATO; TORRES; BARBOSA, 2015, p.51).

A Figura 6 ilustra como uma mesma densidade populacional pode gerar diferentes formas urbanas, que podem ter o potencial de auxiliar no aproveitamento dos recursos naturais, como também, possibilitar a preservação de espaços verdes no meio ambiente urbano.



**Figura 6 - Diferentes formas urbanas para uma mesma densidade populacional**

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020

Nesse contexto, surge a seguinte discussão: deve-se adotar o modelo de cidade dispersa ou o modelo de cidade compacta? Quanto ao modelo de cidade dispersa,

Em abordagens sobre a sustentabilidade urbana, a literatura especializada aponta que a malha urbana dispersa gera problemas ambientais, face ao espalhamento da estrutura urbana, eliminando florestas, aumentando a demanda por consumo de energia, exigindo o intenso uso de veículos para o transporte de mercadorias e pessoas (que acarretam a poluição do ar através da emissão de gases provenientes de combustíveis fósseis nos diversos meios e redes de transportes), afetando, também a elevação da impermeabilização do solo natural decorrentes da pavimentação excessiva (exercendo sérios danos ao ciclo hidrológico, causando enchentes, impactando também no clima urbano) (TORRES, 2017, p.69-70).

No modelo de cidade compacta, a proximidade e a diversidade dos usos levam à diminuição da necessidade de grandes deslocamentos, e assim, haveria menos carros nas vias, o que leva a um menor gasto de energia e a uma, por conseguinte, menor produção de poluição,

em suas diversas categorias (FREITAS, 2005). A cidade compacta, assim, permite: a diminuição do consumo de materiais, como energia e água (equilíbrio de *inputs* e *outputs*); a otimização de infraestrutura urbana; e o aumento da coesão social.

A literatura especializada aponta o modelo de cidade compacta como ideal, pois contribui para um planejamento sustentável (ROGERS, 2001; ACSELRAD, 2009; SILVA JUNIOR, 2016). Para isso,

(...) as pesquisas fundamentadas no urbanismo bioclimático devem subsidiar o processo de planejamento urbano, através do estudo de parâmetros urbanísticos, definidos na legislação das cidades, do Plano Diretor à Lei de Uso e Ocupação do Solo, pois os mesmos agem diretamente sobre a densidade urbana e determinam os limites de adensamento de uma determinada área, interferindo, ou não, no aproveitamento da ventilação natural e na determinação de espaços livres urbanos. (TORRES, 2017, p.64).

Portanto, a presente pesquisa parte do modelo de cidade compacta para o desenvolvimento dos cenários urbanos hipotéticos, com base no adensamento por meio da verticalização, de forma a analisar sua aplicabilidade em cidade de clima semiárido.

### 2.1.3 Uso do Solo

Para Oliveira (1988), há uma estreita correlação entre o uso do solo e a distribuição das temperaturas dentro das estruturas urbanas, configurando a ilha de calor. Concentrar numa só área ou zona urbana indústrias, comércio e prestação de serviços e as áreas em geral, com alto índice de concreto, é concentrar também nessas áreas os subprodutos dessas atividades: a radiação – a solar e a produzida pelas atividades antropogênicas – e os poluentes atmosféricos – partículas e gases, para citar só o que interfere diretamente no clima urbano (OLIVEIRA, 1988).

### 2.1.4 Orientação

Considerando que o “**traçado viário** é fruto da disposição das edificações, das ruas e das avenidas” (FREITAS, 2005, p.87), sua orientação em relação à radiação solar e à direção predominante dos ventos tem o potencial de otimizar as condições climáticas locais. Assim, a orientação se torna um condicionante do clima citadino de relevante importância.

De acordo com Achour-Younsia e Kharratb (2016), a orientação das ruas se mostra crucial na avaliação do conforto térmico ao ar livre, pois a orientação Norte-Sul, perpendicular à direção predominante do vento, permite que a luz solar se infiltre durante um longo período

do dia, especialmente no verão; enquanto a direção Leste-Oeste, paralela à direção predominante do vento, gera condições mais favoráveis em relação à distribuição da ventilação natural sobre a superfície urbana e, portanto, auxilia na dissipação de qualquer superaquecimento ocorrido durante o dia. Contudo, estudos recentes têm mostrado 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 (TORK; G. TIBIRIÇÁ; B. TIBIRIÇÁ, 2017).

Nesse sentido, é imprescindível o estudo prévio da orientação do traçado viário, visto que em cidades de clima quente e seco, quando a ventilação natural não for desejada (devido às ocorrências de massas de ar com temperaturas muito elevadas ao longo do ano), é indicado ruas estreitas para evitar a incidência direta da radiação solar durante o dia e a penetração dos ventos quentes, otimizando as condições de conforto térmico local (TORRES, 2017). Já em cidades de clima quente e úmido, as ruas devem ser largas para permitir a ventilação do tecido urbano. A orientação das ruas deve possibilitar o sombreamento, para oferecer ao pedestre caminhos sombreados. As dimensões dos lotes devem ser mais largas que compridas e perpendiculares aos ventos predominantes. O alinhamento das edificações não deve ser muito rígido, a fim de permitir a circulação do ar de forma abundante (GIVONI, 1998).

#### 2.1.5 Permeabilidade Superficial do Solo Urbano

A permeabilidade superficial do solo urbano está relacionada com a capacidade de infiltração das águas da chuva. A impermeabilização do solo modifica a drenagem natural, levando à formação de uma outra distribuição das águas, podendo vir a acentuar a carga de outras bacias mais distantes. Sob intensas precipitações, as superfícies pavimentadas podem provocar alagamentos (FREITAS, 2005, p.90).

O processo de urbanização provoca a impermeabilização da superfície do solo urbano que acarreta: na redução da umidade do ar e da evaporação na área urbana, decorrente da pouca absorção das águas pluviais pela superfície do solo; no acúmulo da radiação térmica na estrutura urbana que não é perdida por evaporação, gerando o aquecimento dos espaços, massa edificada e pessoas; na elevação das temperaturas do ar que também geram baixa pressão atmosférica, concentrando massas úmidas e carreando precipitações; e na ocorrência de inundações (OLIVEIRA, 1988).

### 2.1.6 Propriedades Termodinâmicas dos Materiais Constituintes da Estrutura Urbana

No contexto da termodinâmica, segundo Gartland (2010), é importante ter ciência de quatro processos de radiação diferentes que ocorrem na superfície terrestre: a radiação solar global, que corresponde à energia radiada pelo sol – onda curta (é variável de acordo com a hora do dia, com a estação do ano, nível de poluição e nebulosidade); a radiação solar refletida (onda curta), que é a quantidade de energia que é refletida a partir de uma superfície, de acordo com a refletância do material (propriedade relacionada com a cor do material- quanto mais claro, próximo do branco maior a refletância); a radiação atmosférica, que corresponde ao calor emitido pelas partículas presentes na atmosfera – onda longa (poluição, nuvens, vapor d'água); e a radiação da superfície (onda longa) é o calor radiado a partir de uma superfície (depende da temperatura superficial e da emissividade do material).

De acordo com Torres (2017), o balanço de energia se baseia na primeira lei da termodinâmica que afirma que a energia nunca é perdida. Assim, para qualquer superfície na Terra, toda a energia absorvida por meio de radiação ou através do calor antropogênico, vai para algum lugar, podendo aquecer o ar (troca de calor sensível – mudança de temperatura), ou ser evaporada com a umidade (troca de calor latente – mudança de estado físico), podendo ainda ser armazenada nos materiais em forma de calor.

Acerca disso, Gartland (2010), especificou que o **calor antropogênico** corresponde ao calor produzido pelo homem, que é gerado no meio urbano por edifícios, pessoas, veículos e equipamentos. A **convecção** corresponde ao processo de troca de calor através de um sólido e um fluido (superfície terrestre e o ar acima dela). A convecção aumenta quando os ventos apresentam alta velocidade e quando as diferenças entre as temperaturas das superfícies e do ar são maiores (este processo é denominado também como troca de calor sensível, pois ocorre com mudança de temperatura entre os elementos). A **evaporação** é o processo de troca de calor onde a energia é transmitida a partir da superfície terrestre em forma de vapor d'água (é denominado também como troca de calor latente, pois além da mudança de temperatura ocorre a mudança de estado físico). A água presente em solos úmidos ou superfícies molhadas se transforma em vapor quando é aquecida pelo sol ou por outras fontes (o vapor d'água é transportado para atmosfera levando a energia solar).

Desta forma, a radiação de determinado comprimento de onda incidente sobre uma superfície pode ser transmitida, refletida ou absorvida; que corresponde às propriedades termodinâmicas dos materiais. De acordo com Freitas (2005), a superfície do solo é extremamente modificada em função da substituição da cobertura vegetal pelos volumes

edificados e pelas vias de circulação. As propriedades termodinâmicas dos materiais constituintes da estrutura urbana influenciam o clima da seguinte forma:

A energia solar total (ganhos) é convertida em uma parcela que é dissipada (perdas) e outra que fica armazenada internamente. Os materiais utilizados na construção, em especial o concreto e o asfalto, absorvem parte do calor em seu interior, consequência de sua massa térmica. Esse calor retido é devolvido ao ambiente principalmente no período noturno (atraso térmico). Assim, nas áreas adensadas, a configuração dos cânions urbanos, pouco adequada à dissipação de calor, permite que a energia calorífica armazenada pelas estruturas urbanas durante o dia seja dissipada à noite, favorecendo o aquecimento noturno (GOMES; LAMBERTS, 2009, p.79).

Cada material presente na estrutura urbana possui propriedades importantes que influenciam nesse processo, o albedo e a emissividade.

O albedo de superfícies urbanas está diretamente relacionado à sua capacidade de absorver energia ou refleti-la para as superfícies adjacentes, influenciando sobre as condições microclimáticas e de conforto térmico em nível do pedestre no espaço aberto (KRÜGER; GONZALEZ, 2016, p. 89).

O valor do albedo, propriedade dos materiais que indica sua capacidade de refletir a radiação solar (TORRES, 2017), se dá em porcentagem (%). Segundo Torres (2017), quando expostos ao sol, materiais de alto albedo refletirão mais a radiação solar incidente, e, portanto, mais baixas serão suas temperaturas superficiais.

A emissividade corresponde a capacidade de uma superfície emitir calor. “A emissividade (valor entre 0 e 1) da maioria dos materiais não metálicos pode variar de 0,8 a 0,95 e de materiais metálicos pode variar de 0,1 a 0,6” (TORRES, 2017, p.30).

De maneira geral, a radiação incidente sobre determinada superfície pode ser transmitida, refletida ou absorvida. (TORRES, 2017). O Quadro 1 exhibe alguns materiais presentes no ambiente urbano e os valores do albedo e emissividade:

Quadro 1 - Valor do albedo de materiais presentes no ambiente urbano.

<b>SUPERFÍCIE</b>	<b>ALBEDO (%)</b>	<b>EMISSIVIDADE</b>
RUA COM ASFALTO	05 – 20	0,95
PAREDE		
Concreto	10 – 35	0,71 – 0,90
Tijolo	20 – 40	0,90 – 0,92
Pedra	20 – 35	0,85 – 0,95
Madeira	-	0,90
TELHADOS		
Piche e cascalho	8 – 18	0,92
Telha	10 – 35	0,90
Ardósia	10	0,90
Sapê/ palha/ folhagem	15 – 20	-
Chapa ondulada	10 – 16	0,13 – 0,28
JANELA – VIDRO CLARO ZENIT		
Ângulo zenital menor que 40°	8	0,87 – 0,94
Ângulo zenital de 40° a 80°	9 – 52	0,87 – 0,92
PINTURAS		
Brancas, caiadas	50 – 90	0,85 – 0,95
Vermelhas, marrom	10 – 35	-
Verdes	20 – 35	0,85 – 0,95
Pretas	2 – 15	0,90 – 0,98

Fonte: Oke (1987), adaptado pela Autora.

Vale destacar que,

As elevadas temperaturas das superfícies pavimentadas provocam também a elevação da temperatura do ar e de outras superfícies do entorno. Essas características de aquecimento e a transmissão desse para o ambiente são agravadas quando a forma urbana não favorece o desprendimento do calor (FREITAS, 2005, p. 89).

Na contemporaneidade, tem-se discutido abordar as propriedades termodinâmicas dos materiais constituintes da estrutura urbana nas legislações urbanísticas, e isso não só em coberturas, mas também nas fachadas das edificações. No entanto, é imprescindível estudar o efeito do aumento do albedo no clima local, e nesse processo se deve considerar a temperatura do ar combinada com índices de conforto humano (EMMANUEL; FERNANDO, 2007), visto que

(...) embora o potencial do efeito de aumento do albedo na redução das temperaturas de superfície seja indiscutível, há um debate sobre a viabilidade e eficácia do uso do albedo como estratégia passiva para redução tanto do estresse térmico no nível do pedestre como do consumo de energia em climatização em edifícios. Há ainda a influência do clima local e da morfologia urbana sobre o impacto efetivo de alterações no albedo, os quais regulam os ganhos de calor e os fenômenos de trocas térmicas e radiantes com a atmosfera e objetos do entorno. A importância de se obter uma melhor compreensão dos efeitos de alterações no albedo sobre o microclima urbano está em permitir uma avaliação mais abrangente das possíveis vantagens e desvantagens dessa estratégia no ambiente urbano (KRÜGER; GONZALEZ, 2016, p.91).

Os autores ainda frisaram “a necessidade de se identificar os fatores urbanísticos (orientação de fachada e de eixo da caixa de rua, razão de aspecto do cânion urbano ou relação

H/W) que mais fortemente influenciam seu uso efetivo e quais regiões e condições são mais propícias ou não para seu uso” (KRÜGER; GONZALEZ, 2016, p.91).

#### 2.1.7 Tamanho da Estrutura Urbana (em extensão horizontal e altura)

No que se refere ao tamanho da estrutura urbana, sua extensão determina a quantidade de fontes produtoras de calor e de poluentes no sistema urbano (OLIVEIRA, 1988). Contudo, no que se refere às temperaturas urbanas, a relação entre o tamanho da cidade e a diferença de temperatura rural/ urbana não é linear, pois em cidades de pequeno porte também são encontradas diferenças significantes na temperatura do ar.

#### 2.1.8 Áreas Verdes

A vegetação é a primeira a ceder espaço à presença humana, através de sua substituição por espaços edificados e por caminhos que vão ligá-los entre si (FREITAS, 2005). Nisso, a “substituição da cobertura vegetal pela impermeabilização do solo diminui a qualidade ambiental” (FREITAS, 2005, p.16).

Sobre as áreas verdes,

Não é frequente estudar a localização, espécie e tamanho das árvores e da vegetação, em estudos e no planejamento urbano. Mas estes são os elementos mais completos para se adaptar e proteger os espaços livres, para manter o equilíbrio do ecossistema urbano e favorecer a composição atmosférica, a velocidade do ar ou a umidade ambiental (HIGUERAS, 1998, p.18, tradução nossa).

De acordo com Higuera (1998), os benefícios das áreas verdes no espaço urbano possuem ação na: a) composição atmosférica, b) umidade do ambiente, c) velocidade do ar, d) radiação solar e e) proteção contra ruído.

Portanto, quanto maior o índice de áreas verdes na estrutura urbana, maior a troca térmica entre essas áreas e menor a temperatura do ar no espaço urbano (OLIVEIRA, 1988). É importante ressaltar que, no período diurno as áreas verdes tendem a permanecer mais resfriadas que no período noturno, pois devido à menor perda de calor, elas permanecem mais mornas, como ilustra a Figura 7.

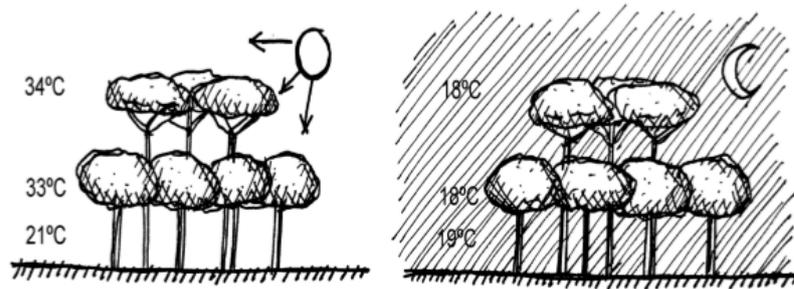


Figura 7 - Efeito da vegetação na temperatura do ar no período diurno e noturno

Fonte: Romero (2000), adaptado por Barbosa (2002)

### 2.3 Adensamento Urbano e Parâmetros Urbanísticos

A partir da compreensão de que o modelo de cidade compacta é o mais compatível com os princípios do urbanismo bioclimático, na busca pela sustentabilidade urbana, é preciso planejar o crescimento e desenvolvimento de cada cidade, no que tange o uso e ocupação do solo urbano. Num contexto global de urbanização crescente e de transformações acentuadas no espaço das cidades, destacam-se processos peculiares à dinâmica das grandes cidades brasileiras, particularmente o ritmo acelerado de densificação e verticalização desse crescimento, diante de frágeis instrumentos regulatórios (SCUSSEL, SATTLER, 2010).

Nesse contexto,

A legislação de uso e ocupação do solo já prevê alguns parâmetros construtivos que limitam e regulam a ocupação do solo, e até estipulam taxa mínima de permeabilidade em alguns casos. No entanto, **esses parâmetros pouco se baseiam em estudos climáticos e projeções de seus impactos no microclima local**, levando muitas vezes a propostas que não auxiliam na preservação das condições climáticas adequadas, regulando somente a ocupação ordenada do solo (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018, p.178, **grifo nosso**).

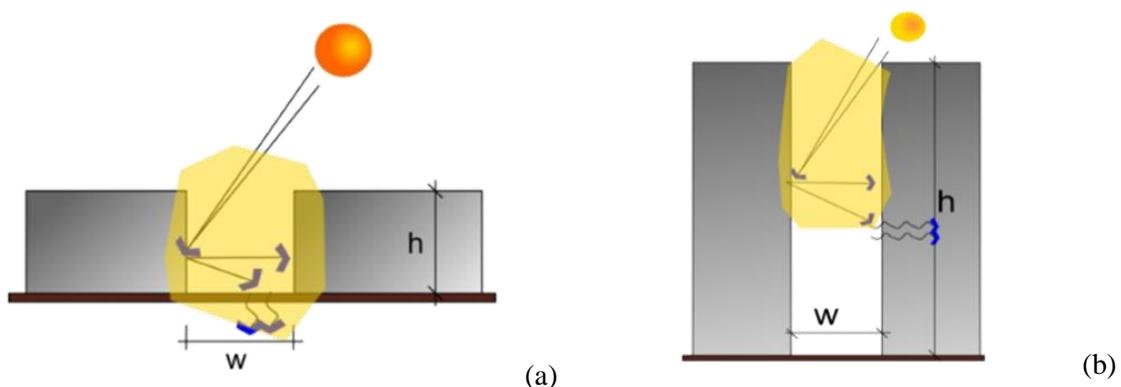
Ao tratar de adensamento, o processo de verticalização urbana é um ponto de importante relevância. Explorações a respeito da produção vertical são necessárias, uma vez que definem paisagens urbanas e trazem novos valores de moradia, localização, segurança e infraestrutura (MAUÁ; GUADANHIM; KANASHIRO, 2017). O processo de verticalização era observado apenas nas grandes metrópoles, contudo, atualmente são verificados na maioria das médias e grandes cidades brasileiras (MORAIS; SILVA; MEDEIROS, 2007). É imprescindível o estudo, fundamentado na adequação climática, de parâmetros urbanísticos que visem o adensamento urbano a partir da verticalização no meio urbano.

Para isso, torna-se necessário compreender de que forma as edificações verticalizadas influenciam no clima urbano, pois conformam a geometria urbana de cada cidade. Sobre isso, é importante destacar que,

A geometria urbana é um dos fatores geralmente relacionados com a formação de ilhas de calor urbanas. Sua variação nos ambientes urbanos pode influenciar no aumento ou na diminuição de valores de temperatura do ar em relação aos dados medidos nos arredores da cidade, na velocidade e direção dos ventos, na forma de recebimento de radiação por ondas curtas e na liberação de calor através de ondas longas (NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2016, p. 74).

A relação entre edificações verticalizadas e o clima urbano pode ser avaliada por meio da relação entre a altura e a largura da via (relação  $H/W$ ), do cânion urbano e o fator de céu visível (FCV). A relação  $H/W$  é a proporção entre a altura das edificações ( $H$ ) e a largura das vias ( $W$ ). O impacto da incidência de radiação solar próximo à superfície urbana é proporcional à relação  $H/W$  (ROMERO, 2001). O espaço urbano com relação  $H/W$  igual a 1, corresponde a uma área de densidade média, no caso de relação  $H/W$  igual ou maior a 4 (quatro), a área possui alta densidade.

De acordo com Nogueira (2011), numa área de densidade média, grande parte da radiação refletida incide em outros edifícios ou na superfície do solo, enquanto em áreas de alta densidade, a maior parte da absorção toma lugar muito acima do nível do solo, ver Figura 8.



**Figura 8 - Efeito da radiação solar com base na relação  $H/W$  igual a 1 (a) e 4 (b)**

Fonte: Romero (2001), adaptado por Nogueira (2011)

O cânion urbano é compreendido como uma composição formada por uma rua margeada por edificações verticalizadas (NICHOLSON, 1975; TORRES, 2017). Sobre os cânions urbanos,

Os efeitos de aquecimento e resfriamento relacionados aos cânions urbanos são distintos para as condições diurnas e noturnas. Durante o dia, o sombreamento das edificações pode provocar uma diminuição na quantidade de radiação que atinge o solo e, conseqüentemente, o ar próximo ao nível da rua (GOMES; LAMBERTS, 2009, p.78).

No período noturno, os cânions urbanos correspondem a uma variável relevante na produção de ilhas de calor urbanas noturnas devido à perda de calor por radiação de onda longa, resultado da energia absorvida pelos edifícios, provenientes da radiação solar incidente durante o dia (NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2016).

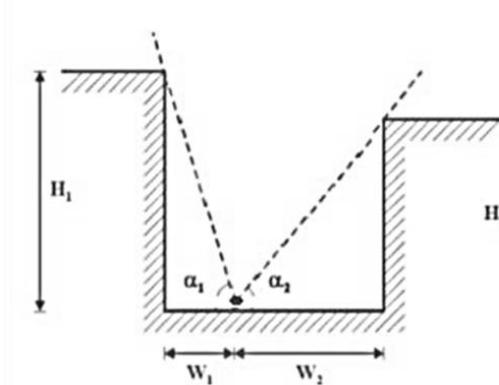
O microclima do cânion sofre influência de fatores como: as propriedades termodinâmicas dos materiais que constituem sua superfície, pois determinam a quantidade de radiação solar a ser absorvida/ refletida/ emitida (KRÜGER; GONZALEZ, 2016; ALCHAPAR; PEZZUTO; CORREA, 2018); a orientação em relação à radiação solar e à direção predominante dos ventos, por ter o potencial de otimizar o aproveitamento desses recursos naturais locais e, assim, beneficiar as condições climáticas urbana (TORK; G. TIBIRIÇÁ; B. TIBIRIÇÁ, 2017); a geometria do cânion, a partir da relação entre a altura média das edificações e a largura das vias (relação H/W) e do fator de céu visível (NAKATA-OSAKI; SOUZA; RODRIGUES, 2016); e a presença de vegetação, que proporciona sombreamento e beneficia as condições de temperatura do ar e umidade relativa do ar (MINELLA; KRÜGER, 2017; SHINZATO; DUARTE, 2018).

Visto que os cânions urbanos exercem um grande papel na radiação solar, ventilação e conforto térmico ao ar livre (OKE, 1987), considera-se a temperatura do ar, a velocidade/direção das massas de ar e os índices de conforto térmico para a análise de seu desempenho térmico. Os índices de conforto térmico tentam expressar a integração dos fatores térmicos ambientais e do equilíbrio térmico do corpo humano (BARBOSA, 2018). Dentre os índices de conforto térmico externo, tem-se o Voto Médio Estimado (*Predicted Mean Vote - PMV*) e a Temperatura Fisiológica Equivalente (*Physiological Equivalent Temperature - PET*).

O PMV, baseado no modelo de conforto de Fanger (1972), pode ser aplicado em ambientes internos e externos. Assim, a presente pesquisa adotará o índice PMV, que prevê o valor médio das taxas de desconforto fornecidas por pessoas, em condição de atividade e vestimenta (LAMBERTS, 1997). Na escala do PMV, 0 é a condição mais próxima de conforto,  $PMV > 0$  até 4, equivale a uma condição de calor, e  $PMV < 0$  até -4, de frio.

De acordo com Souza *et al.* (2010, p.156), “o FVC é uma estimativa da área visível do céu a partir de um ponto de observação na malha urbana e está relacionado com diversos processos ambientais urbanos (ver Figura 9). É também chamado de fator de forma ou de configuração”. O valor do FVC varia de 0 (zero) a 1, sendo o valor 1 correspondente a uma área sem qualquer obstáculo que se interponha entre o ponto escolhido e o céu (TORRES, 2017). Oke (1981) concluiu que quanto mais obstruído é um local no meio urbano, menor é a capacidade de troca térmica radiativa, o que dificulta a irradiação térmica do calor, contribuindo

para o aquecimento noturno – daí a compreensão da ilha de calor como fenômeno tipicamente noturno.



**Figura 9 – Fator de céu visível (FVC)**

Fonte: Oke (1988)

Portanto, reconhecendo a verticalização como um processo tendencial dos centros urbanos, torna-se imprescindível o estudo dos parâmetros urbanísticos, pois:

A legislação de uso e ocupação do solo já prevê alguns parâmetros construtivos que limitam e regulam a ocupação do solo, e até estipulam taxa mínima de permeabilidade em alguns casos. No entanto, esses parâmetros pouco se baseiam em estudos climáticos e projeções de seus impactos no microclima local, levando muitas vezes a propostas que não auxiliam na preservação das condições climáticas adequadas, regulando somente a ocupação ordenada do solo (MUNIZ-GÄAL *et al.*, 2018, p.178).

Os parâmetros urbanísticos se distinguem entre tradicionais e avançados, e de acordo com Freitas (2005), os parâmetros urbanísticos não podem ser utilizados universalmente, pois dependem de muitos condicionantes, como visto anteriormente.

Os parâmetros urbanísticos tradicionais, segundo Brandão (2009), são:

- Coeficiente de Aproveitamento (CA): é o fator que, multiplicado pela área do terreno, define a área máxima computável admitida nesse mesmo terreno. Este é o fator que determina a densidade construtiva de uma determinada área.
- Taxa de Ocupação (TO): é dada pela razão entre a área de projeção da edificação ou edificações sobre o plano horizontal e a área do lote ou terreno. A taxa de ocupação dá uma ideia da porcentagem de cobertura do solo. Quando baixas taxas de ocupação são combinadas com altos coeficientes de aproveitamento, incentiva-se a verticalização das edificações.
- Gabarito: ou altura máxima de edificação, limita-se diretamente à altura do edifício.
- Afastamentos mínimos: ou recuos mínimos, determinam a distância da borda do terreno a partir da qual se pode edificar. Pode ser fixo de acordo com o tipo da divisa (frontal, posterior, lateral) ou progressivo, variando de acordo com a altura da edificação.

- Taxa de permeabilidade: determina a porcentagem do terreno que deve ser deixada livre de construções ou impermeabilização.

Os parâmetros urbanísticos tradicionais mais comumente utilizados no planejamento de cidades com porte semelhante ao objeto de estudo da presente pesquisa são: o recuo inicial, recuo progressivo, gabarito, taxa de ocupação coeficiente de aproveitamento e taxa de permeabilidade.

Apesar das cidades apresentarem climas, morfologias e níveis de desenvolvimento urbano diferentes, elas apresentam parâmetros urbanísticos muito semelhantes. Isso demonstra que, na elaboração dos planos e código urbanísticos, não há um estudo pautado pelos princípios do urbanismo bioclimático. Nisso, é possível perceber, também, a fragilidade do Código de Edificações do município de Arapiraca, que apresenta como único parâmetro urbanístico os valores mínimos de recuo. Assim, em seu processo de verticalização, o uso e ocupação do solo urbano da cidade se encontra a mercê do mercado imobiliário. Na presente pesquisa, será adotado como recorte o seguinte parâmetro urbanístico: o recuo progressivo.

Como parâmetros urbanísticos avançados, tem-se (MARTINS, BONHOMME, ADOLPHE, 2013; TORRES, 2017):

- Compacidade: consiste na relação entre a área de envoltória exterior dos edifícios na malha e o volume destes elevado à 2/3 de potência.
- Rugosidade absoluta: consiste na razão entre a soma das alturas ponderadas pela sua superfície e a superfície total do tecido urbano considerado (construído e não construído).
- Porosidade: é relação dos volumes úteis abertos com o conjunto de volumes do tecido urbano considerado.
- Prospecto médio: relação da altura média ponderada pela largura da rua.

O uso de parâmetros urbanísticos avançados ainda não está presente na maioria das legislações que regem sobre o uso e ocupação do solo urbano de muitas cidades brasileiras, contudo, cidades como Recife e São Paulo já vem implementando alguns desses parâmetros.

## **2.4 O Uso de Simulações Computacionais para Análise do Clima Urbano**

Diante da necessidade de se planejar a cidade com base no urbanismo bioclimático, “as ferramentas de simulação computacional do ambiente citadino representam um grande avanço, pois são capazes de prever o impacto da urbanização de múltiplas alternativas de projeto urbano

sobre o clima urbano antes de sua implementação” (FAVRETTO; SOUZA, 2019, p.144, tradução nossa).

Nesse contexto, pesquisas recentes relacionadas com análise do clima urbano na escala microclimática têm adotado a ferramenta computacional ENVI-met para análise do comportamento de diversas variáveis climáticas (TORRES, 2017). Diferente de outros *softwares* de análise do clima urbano, o ENVI-met está baseado não só nas leis da dinâmica dos fluidos, como também nas leis da termodinâmica. De acordo com Bruse (2019), criador do programa, o ENVI-met é capaz de oferecer uma análise de alta resolução dos fluxos de calor e energia provenientes do ambiente para qualquer posição dentro do domínio do modelo. Utilizando sofisticados modelos biometeorológicos, tais como Temperatura Equivalente Fisiológica (PET) ou Índice Universal de Clima Termal (UTCI), a sensação térmica global de uma pessoa em pé no ambiente virtual pode ser calculada para qualquer cenário.

Possui também a capacidade de estimar as condições do vento em qualquer ponto do espaço do modelo ou nas fachadas dos edifícios, levando em conta continuamente os efeitos das condições térmicas, vegetação ou padrões climáticos no campo de fluxo. Isso é efetuado a partir do cálculo do vento tridimensional e da turbulência em condições complexas é um módulo integrado do *software* ENVI-met. Leonardo é um *software* integrado que oferece uma ampla gama de opções de visualização, desde simples mapas em 2D até trajetórias de fluxo 3D.

No Leonardo também é possível coletar dados de variáveis climáticas em cada célula de grade<sup>2</sup> do cenário simulado, na altura desejada, funcionando como um *data logger* externo, que é um equipamento capaz de registrar de dados de temperatura, umidade do ar, ponto de orvalho e luminosidade para ambientes internos. Os dados podem ser extraídos em forma de planilha de programas como o EXCEL, da *Microsoft*, quando poderão ser editados e analisados.

Diversos artigos internacionais e nacionais utilizaram, em seu método, o *software* como ferramenta de simulação computacional. A exemplo, tem-se a pesquisa de Li, Wang, Wong (2016), que analisou parâmetros como densidade do edifício, taxa de ocupação, proporção do lote verde, área do pavimento, altura do edifício, com base em variáveis climáticas (temperatura do ar, radiação solar, temperatura média de radiação e velocidade do vento) e no índice PET, em três cenários urbanos para Nanjing, China.

---

<sup>2</sup> A célula de grade corresponde a unidade em 3D com 2 dimensões horizontais (x e y) e uma dimensão vertical (z), para elaboração do modelo principal. Quanto menor a célula de grade, maior a resolução do modelo. Por outro lado, tornar as células da grade pequenas significa que são necessárias mais células para cobrir uma determinada área. (BRUSE, 2020).

Alchapar, Pezzuto, Correa (2018) também utilizaram o *software* ENVI-met ao analisar a influência da vegetação e do albedo em cânion urbano de duas cidades latino-americanas: Mendoza, Argentina e Campinas, Brasil. Como resultado, observou que o aumento da vegetação poderia diminuir 2,0 °C da temperatura média em Mendoza, enquanto em Campinas, até 5,0 °C. Sobre o albedo, observou-se que os cenários com alto albedo em superfícies horizontais e baixo albedo em superfícies verticais registraram menores valores de temperatura do ar em todos os cenários nas duas cidades. Em alta densidade, a estratégia de aumentar o albedo é prejudicial durante o período de verão, pois o fator de céu visível diminui, devido à altura das edificações, o que prende a radiação solar refletida devido à alta refletância das superfícies.

Com uso do ENVI-met como ferramenta computacional, Muniz-Gäal *et al.* (2018) buscou analisar como a legislação de uso e ocupação do solo interfere no microclima e no conforto térmico do pedestre. Para isso um cânion urbano da cidade de Campinas foi estudado por meio de simulações computacionais de cenários estabelecidos a partir da variação da taxa de ocupação (TO), coeficiente de aproveitamento (CA) e orientação do cânion, e comparou-se o conforto térmico proporcionado por cada cenário através do índice PET. Os resultados mostraram que o aumento da relação H/W amplia o sombreamento do cânion e reduz a variação da sensação de conforto diária. Com relação à orientação do cânion, verificou-se que aqueles orientados paralelamente à direção predominante dos ventos têm o potencial de resfriamento das superfícies intensificado pelo aumento de sua velocidade.

Nogueira *et al.* (2018) também utilizou o *software* ENVI-met no estudo do adensamento urbano por meio da verticalização em Guaxuma, um bairro litorâneo de Alagoas, com base na influência de parâmetros urbanísticos que tratam do recuo progressivo e do gabarito (relação H/W), e verificou que o aumento da relação H/W no cânion urbano, aliado à correta orientação das vias, resultaria em uma melhor permeabilidade da ventilação natural, enquanto que a diminuição da relação H/W com edificações cuja fachadas apresentam materiais de baixo albedo ocasiona o aumento da temperatura do ar.

Portanto, diversos estudos utilizaram o método de simulação computacional no estudo do clima urbano, com uso do *software* ENVI-met, com o fim de avaliar os efeitos da **atmosfera** (GUSSON, DUARTE, 2016; FAVRETTO, SOUZA, 2019), **vegetação** (ALCHAPAR, PEZZUTO, CORREA, 2018; SHINZATO, DUARTE, 2018), **arquitetura** (ROMERO, 2011; CARFAN, GALVANI, NERY, 2012; TALEB, ABU-HIJLEH, 2013; BARBIRATO, TORRES, BARBOSA, 2015; MUNIZ-GÄAL, PEZZUTO, CARVALHO, MOTA, 2018; NOGUEIRA, ARAÚJO, BITTENCOURT, RESTAINO, 2018) e **materiais** (YANG, ZHAO,

BRUSE, MENG, 2013; KRÜGER, GONZALEZ, 2016). Considerando a aplicabilidade do *software* ENVI-met no estudo do clima urbano, a presente pesquisa adotou, em seu método, o uso dessa ferramenta computacional.

## 2.5 Conclusões do Capítulo

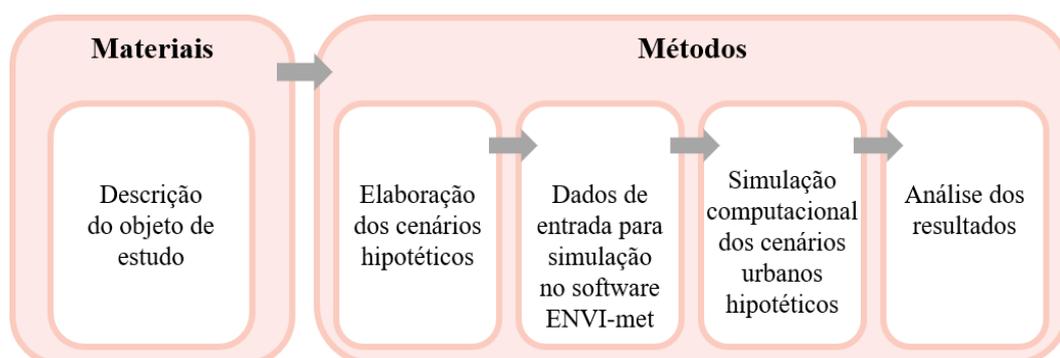
O presente capítulo buscou construir as bases teóricas, a partir de artigos internacionais/nacionais, livros e teses, sobre o clima e as características da forma urbana que condicionam o microclima das cidades, e nisso compreender: o fenômeno do adensamento urbano por meio da verticalização e dos parâmetros urbanísticos que regem o uso e ocupação do solo urbano como também, a adoção de simulação computacional de cenários urbanos, que é a pesquisa preditiva.

Assim, fica evidente a necessidade de considerar os princípios do urbanismo bioclimático no planejamento das cidades, por meio do estudo do microclima. Ao considerar a verticalização como um processo tendencial nos centros urbanos, é essencial estudar seus efeitos no microclima urbano, especialmente em cidade de clima semiárido, como é o caso de Arapiraca/ AL, a fim de analisar a influência dos parâmetros urbanísticos na otimização do aproveitamento dos recursos naturais locais adequados às estratégias bioclimáticas para a cidade.

O uso de simulações computacionais para estudo do microclima urbano com base em cenários urbanos hipotéticos tem sido o método adotado por inúmeros pesquisadores em todo o mundo, e torna possível planejar a cidade a longo prazo, a partir da malha urbana já existente e das variáveis climáticas locais. Nesse processo, tem-se utilizado o *software* ENVI-met. No entanto, trata-se de um programa que necessita de dados climáticos muito específicos, o que na realidade das cidades brasileiras dificulta seu acesso, a exemplo do valor da umidade específica do ar a 2500m (g/kg)<sup>2</sup>, em que foi necessário adotar o de Natal, região mais próxima que possui esse dado, o que implica na precisão da simulação. Contudo, o uso dessa ferramenta evidencia o estudo do microclima citadino como a chave na busca pela sustentabilidade urbana.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente capítulo será apresentada a cidade de Arapiraca, que constitui o objeto de estudo da presente pesquisa, assim como serão discutidos os métodos adotados conforme os objetivos traçados. A Figura 10 ilustra a organização do presente capítulo de maneira objetiva:



**Figura 10 – Esquematização dos materiais e métodos da dissertação**

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

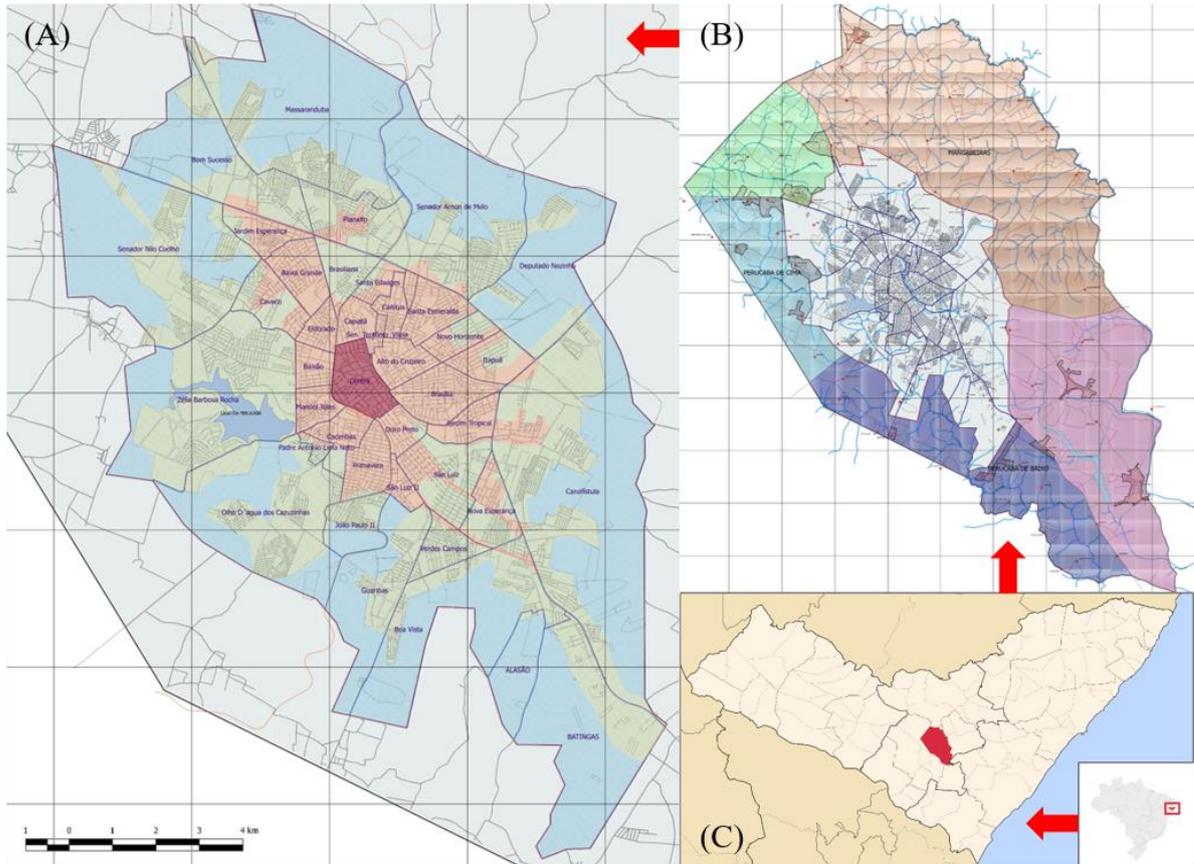
#### 3.1 Materiais

A presente pesquisa adotou como estudo de caso o município de Arapiraca/ AL. A partir disso, torna-se imprescindível compreender as características climáticas da cidade e identificar as estratégias bioclimáticas adequadas. Em seguida, será realizado um estudo das áreas urbanas com tendência à verticalização para escolha do tecido urbano<sup>3</sup> para elaboração dos modelos de cenários urbanos hipotéticos.

##### 3.1.1 Descrição do objeto de estudo

Arapiraca, segundo maior município do estado de Alagoas (Figura 11), possui uma área de 356,179km<sup>2</sup>, densidade demográfica de 600,83 hab/km<sup>2</sup> e 214.006 habitantes (IBGE, 2010). Segundo dados do IBGE (2010), a população urbana e rural de Arapiraca corresponde a 181.481 e 32.525 de habitantes, respectivamente. De acordo com o Plano Diretor (2005), a área territorial urbana da cidade é de 34,63 Km<sup>2</sup>, enquanto a área territorial rural é de 375,37 Km<sup>2</sup>, totalizando 410Km<sup>2</sup> de área territorial do município. Assim, a densidade populacional urbana de Arapiraca corresponde a 5.240 hab/ Km<sup>2</sup>.

<sup>3</sup> Tecido urbano são grupos de edifícios, espaços abertos, lotes e ruas, que formam um todo coeso, porque foram todos construídos ao mesmo tempo ou dentro das mesmas restrições, ou porque foram submetidos a um processo comum de transformação. (MOUDON, 1997, p.7, tradução nossa).

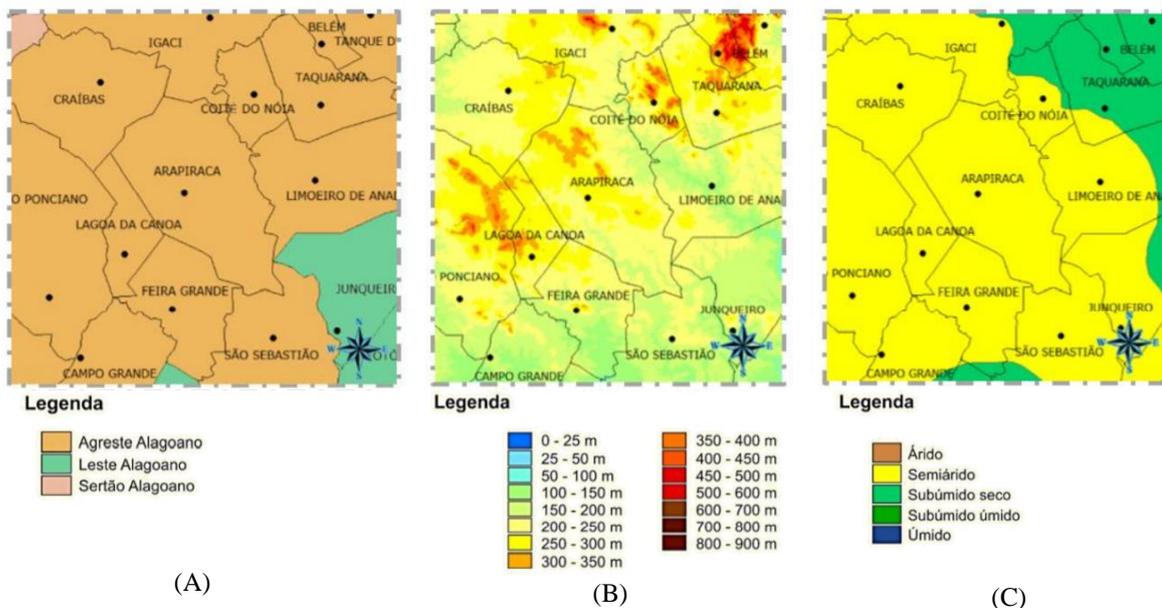


**Figura 11 – Área urbana de Arapiraca (A), Área urbana e rural de Arapiraca (B) e localização do município no estado de Alagoas (C)**

Fonte: <https://geo.arapiraca.al.gov.br>, adaptada pela autora, 2020

Arapiraca está localizada na mesorregião do Agreste (Figura 12a), que corresponde à região de transição entre a costa úmida e o interior semiárido do Nordeste brasileiro, segundo IBGE (2010), ver Figura 12. De acordo com Silva (2019), o relevo arapiraquense apresenta poucas elevações, com altitudes principalmente entre 200 e 300 metros (Figura 12b). O clima da região é o semiárido<sup>4</sup> (Figura 12c). De acordo com pesquisas acerca do clima de Arapiraca, ele se constitui misto, caracterizado pelo verão quente/ seco e inverno quente/ úmido. A presente pesquisa está concentrada no período quente/ seco.

<sup>4</sup> A região do Semiárido Brasileiro foi atualizada em 2017 pelo Ministério da Integração Nacional, através da Portaria nº 196. Para caracterização do clima semiárido foram adotados os seguintes critérios: 1. Precipitação pluviométrica média anual inferior a 800 milímetros; 2. Índice de aridez de até 0,5 calculado pelo balanço hídrico que relaciona as precipitações e a evapotranspiração potencial, no período entre 1961 e 1990; 3. Risco de seca maior que 60%, tomando-se por base o período entre 1970 e 1990.

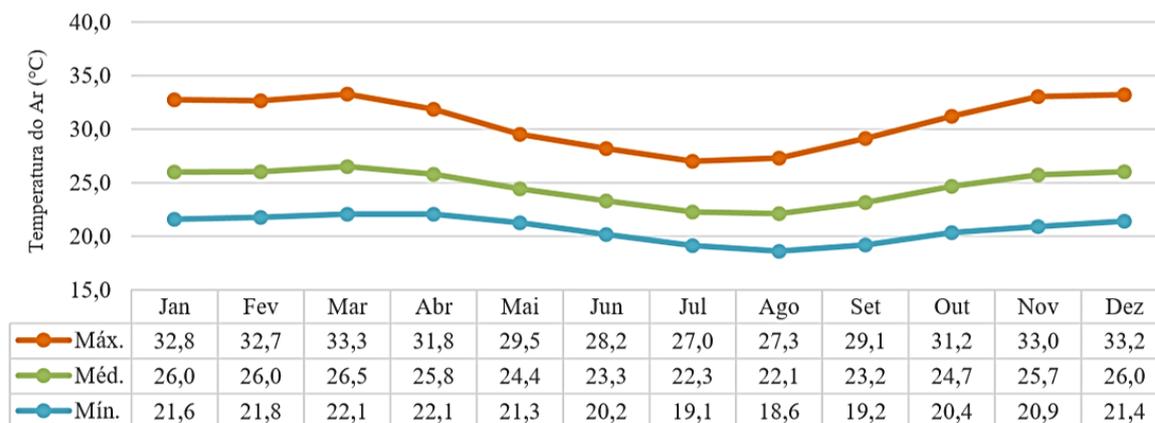


(A) (B) (C)

**Figura 12 – Localização (A), relevo (B) e clima de Arapiraca/ AL (C)**

Fonte: Silva, 2019

Os meses de abril a setembro (outono e inverno ou estação das chuvas) apresentam as menores temperaturas médias, enquanto de outubro a março (primavera e verão ou estação seca) as temperaturas do ar são mais elevadas (SILVA, 2019), ver Gráfico 1.



**Gráfico 1 - Temperatura média mensal do ar de Arapiraca**

Fonte: Silva, 2019

Silva (2019) ainda afirmou que nos meses secos (setembro a março) ocorrem as maiores amplitudes térmicas devido à baixa umidade do ar (ver Gráfico 2), com valores médios acima dos 10°C e com maiores valores se aproximando de 12°C. Nos meses de chuva (abril a agosto) ocorrem as menores amplitudes térmicas, com valores médios próximo 8°C.

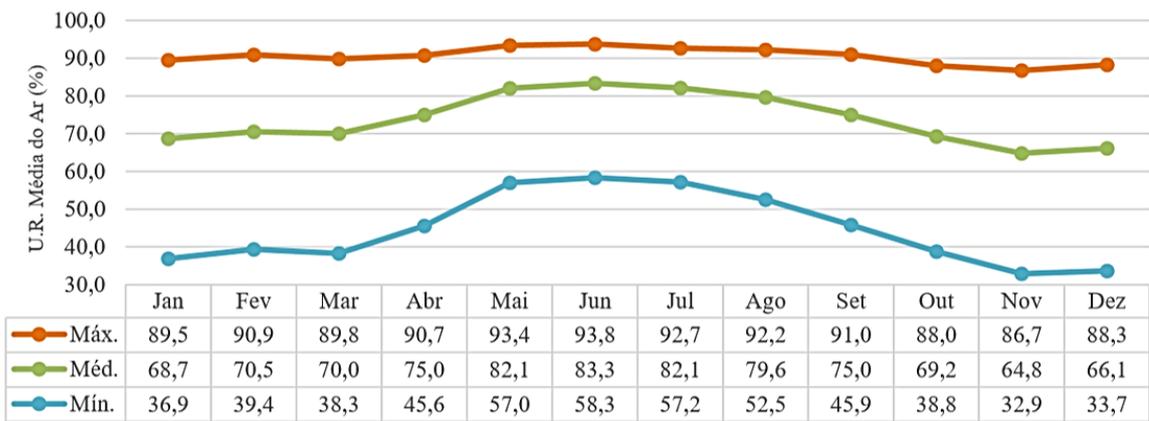
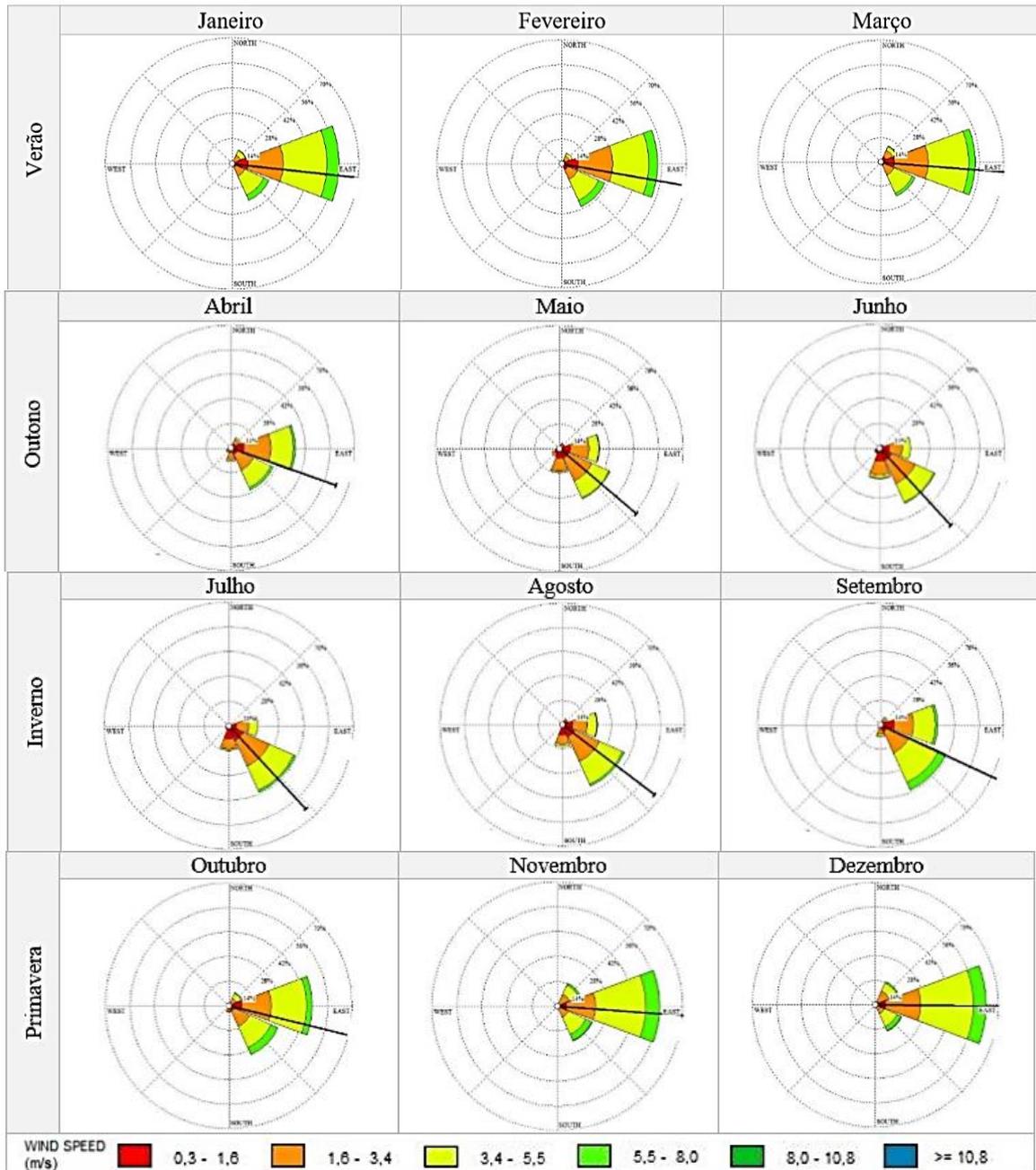


Gráfico 2 - Umidade relativa média mensal do ar de Arapiraca  
 Fonte: Silva, 2019

Sobre a ventilação natural em Arapiraca, a direção predominante dos ventos é a leste enquanto a secundária é a sudeste. Silva (2019) constatou por meio das rosas dos ventos mensais que, apesar da direção leste ser a predominante ao longo do ano, há uma alteração no comportamento da ventilação ao longo dos meses. Os ventos vindos da direção leste são mais frequentes nos meses do período seco (outubro a abril). Já nos meses do período úmido (maio a setembro), a direção predominante dos ventos é a sudeste, ver Quadro 2.

Quadro 2 - Rosas dos ventos com médias mensais de frequência e direção dos ventos em Arapiraca.



Fonte: Silva, 2019.

A autora ainda ressalta que a velocidade do vento ocorre principalmente entre 1,6 a 3,4m/s e de 3,4 a 5,5m/s, contudo, o período em que a ventilação se caracterizou como aragem (0,3 a 1,6m/s) correspondeu a 18,7% das ocorrências, o que configura um período considerável onde a ventilação tem seu potencial de uso comprometido enquanto estratégia bioclimática. Assim, é essencial que o planejamento urbano da cidade vise o estudo da adequação da morfologia urbana à ventilação natural.

Sobre as estratégias bioclimáticas apropriadas para a eficiente adequação de assentamentos construtivos no espaço urbano de Arapiraca, Silva (2019) concluiu que são:

Quadro 3 - Estratégias bioclimáticas propostas pela NBR 15220-3 e pelas metodologias da Carta Bioclimática de Givoni (1992) adaptada<sup>5</sup> e o Método Mahoney Nebuloso<sup>6</sup> (MMN) para a cidade de Arapiraca.

Métodos	NBR 15220-3 (ZB-8)	Givoni	MMN
Diretrizes	Sombreamento	Sombreamento durante todo o ano	Edifícios orientados sobre o eixo N/S (eixo longitudinal L/O) para reduzir a exposição ao sol
	Ventilação cruzada permanente	Ventilação durante todo o ano, principalmente na primavera, verão e inverno	Espaço aberto para penetração de brisa, porém com proteção contra o vento frio/ quente
	-	Resfriamento evaporativo em dias mais quentes da primavera e verão	-

Fonte: Silva (2019), adaptado pela Autora.

A autora ainda mencionou que, após o sombreamento, a ventilação cruzada é a estratégia mais indicada ao longo de todo ano. O espaçamento entre as edificações deve permitir a penetração dos ventos e o uso de plantas livres maximiza os fluxos de vento e a renovação do ar dentro da edificação (SILVA, 2019). Diante das estratégias bioclimáticas apropriadas ao clima de Arapiraca é importante considerar que a ventilação, como estratégia bioclimática, é aplicável até o limite de temperatura do ar externa de 32°C, pois a partir daí os ganhos térmicos por convecção a tornam indesejável (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Nesses casos, a literatura especializada recomenda o uso de espaços verdes para promover melhores condições de conforto térmico no meio ambiente urbano.

Portanto, torna-se imprescindível que o planejamento urbano da cidade vise o estudo da adequação de sua morfologia urbana à ventilação natural, pois o conforto térmico interno em edifícios não condicionados depende muito da variação do clima externo (GIVONI, 1992).

Sobre Arapiraca, Torres (2017) afirmou que,

Devido a sua posição geográfica e a sua atual dinâmica urbana representada pela presença de diversos sistemas urbanos (comércio, hospitais e clínicas especializadas; escolas e instituições de ensino superior, incluindo um *campus* interiorizado da Universidade Federal de Alagoas), a cidade vem assumindo uma grande importância regional no contexto urbano de Alagoas, pois vem atuando como centro de convergência populacional (TORRES, 2017, p.17).

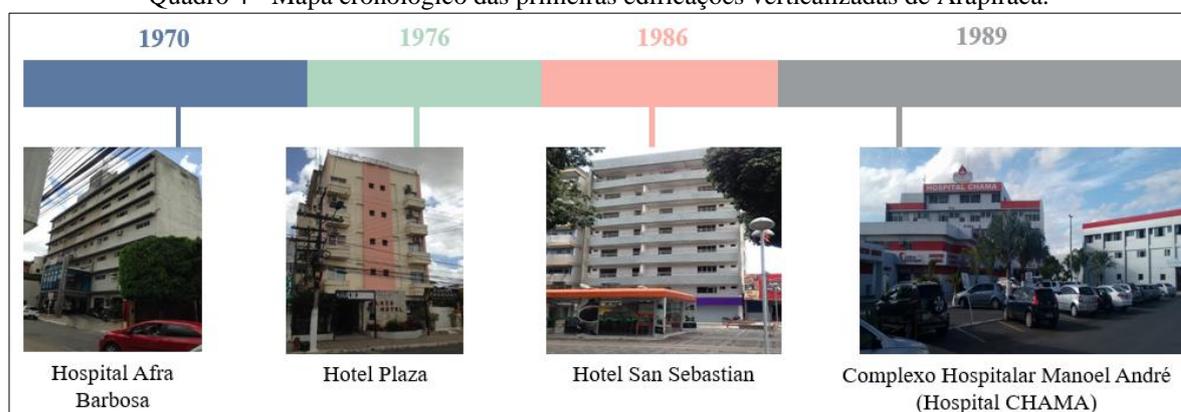
<sup>5</sup> A Carta Bioclimática de Givoni (1992) foi desenvolvida com base em países de clima temperado, assim, tornou-se necessário a adaptação da Carta original a fim de tornar o método mais sensível à realidade climática brasileira baseadas nas “experiências acadêmicas e profissionais dos especialistas da Comissão de Estudos, bem como alguns aspectos da cultura construtiva típica de cada região brasileira” (RORIZ; GHISI; LAMBERTS, 1999, p. 3).

<sup>6</sup> Inicialmente, havia o Método de Mahoney Tradicional (MMT), criado para concepção de edificações de modo que se adequassem ao clima local, tornando-as, assim, mais eficientes. O MMT consiste em três quadros preenchidos sequencialmente com dados climáticos médios de uma determinada localidade a fim de se obter, ao final do processo, recomendações projetuais compatíveis com o clima local para o partido arquitetônico (HARRIS; YEE, 2011, p. 193). Contudo, o método não se mostrou eficaz em países de clima intermediário. Então, Harris (1999) remodelou o MMT através da Teoria dos Conjuntos Nebulosos, o que resultou no Método de Mahoney Nebuloso (MMN), que é eficaz na interpretação climática de cidades com climas de transição (TORRES, 2017).

Com o desenvolvimento da economia da cidade de Arapiraca, intensificou-se também seu processo de expansão urbana, horizontal e verticalmente. Vale ressaltar que na presente pesquisa se considerou como edificação verticalizada aquela a partir de 3 pavimentos e equipada com elevador.

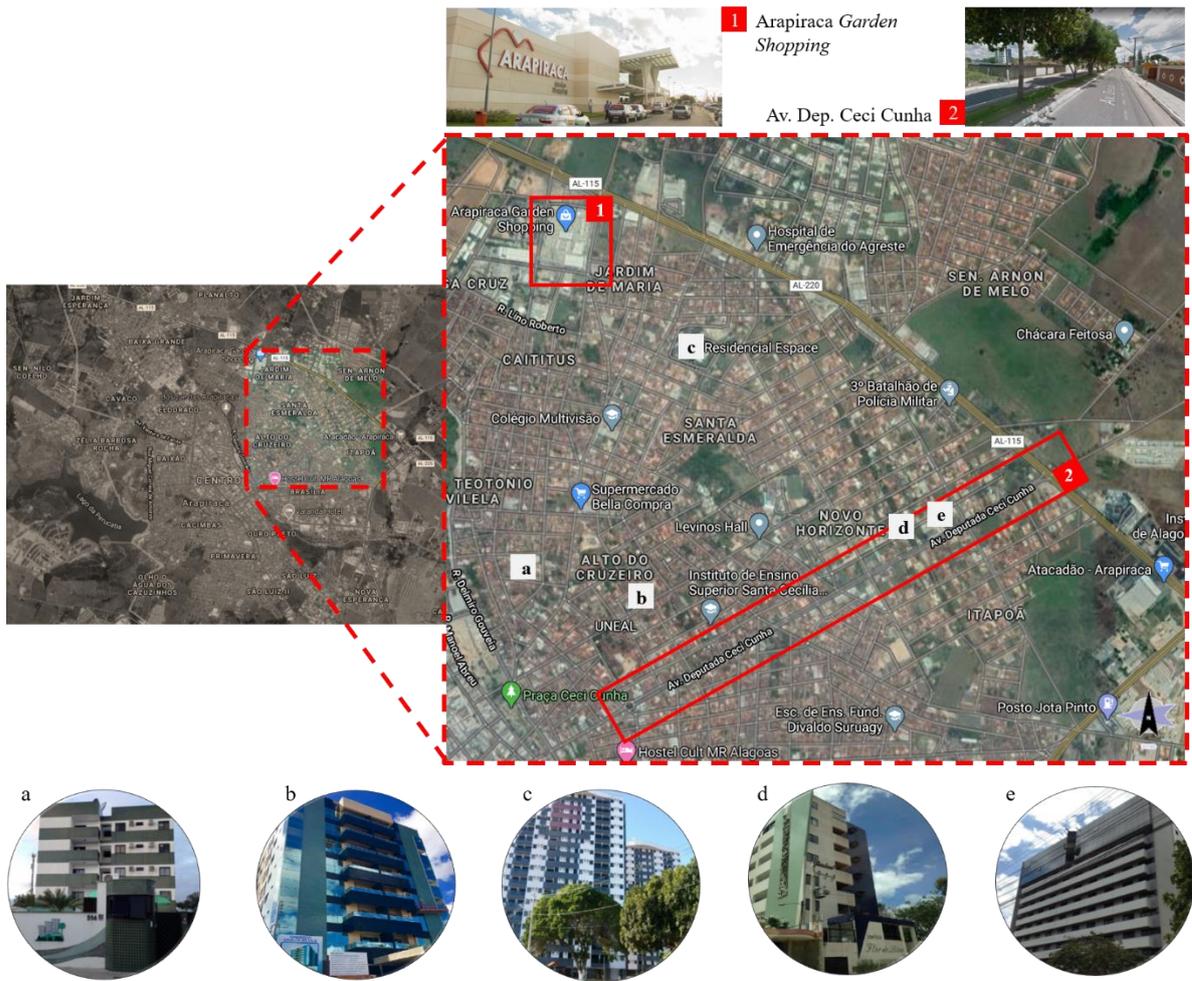
Acerca do processo de verticalização em Arapiraca, inicialmente, ele se deu a partir das seguintes tipologias de edificações: serviços de saúde e serviços de hospedagem. A exemplo, tem-se o Hospital Afra Barbosa, em 1970, e o Complexo Hospitalar Manoel André, em 1989; o Hotel Plaza, em 1976, e o Hotel San Sebastian, em 1986, ver Quadro 4.

Quadro 4 - Mapa cronológico das primeiras edificações verticalizadas de Arapiraca.



Fonte: Elaborado pela Autora, 2020.

Recentemente, observou-se que no perímetro que se configura entre o Arapiraca *Garden Shopping* (Figura 13-1) e a Avenida Deputada Ceci Cunha (Figura 13-2) há uma crescente mudança no uso do solo urbano, com a construção de edificações verticalizadas para atividade residencial e empresarial.

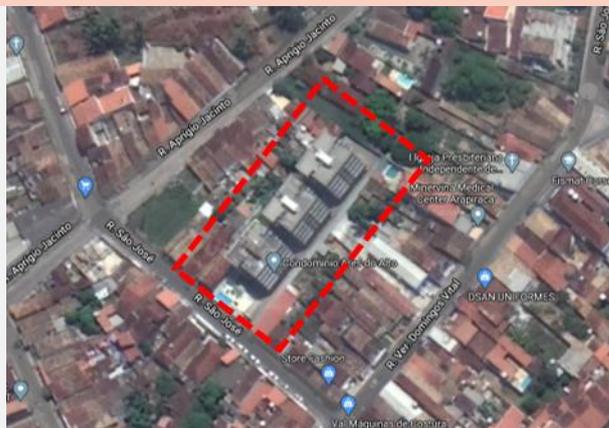


**Figura 13 - Atual processo de verticalização em Arapiraca**  
Fonte: Google Earth, adaptada pela Autora, 2020

Para exemplo da tipologia residencial, tem-se: o Residencial Ares do Alto (2007), composto por 3 edificações com pilotis e mais 4 pavimentos cada (Figura 13a), o Residencial Carlos Silva II (2013) com 7 pavimentos (Figura 13b), o Residencial *Espace* (2011), planejado com 6 torres de 17 pavimentos, das quais 3 já estão finalizadas e uma quarta em construção (Figura 13c); e o Condomínio Residencial Flor de Lótus (2009) com 6 pavimentos (Figura 13d). Como exemplo da tipologia empresarial, tem-se o Edifício Empresarial *Metropolitan* (2012), com 10 pavimentos (Figura 13e). O Quadro 5 pontua a localização dos edifícios citados.

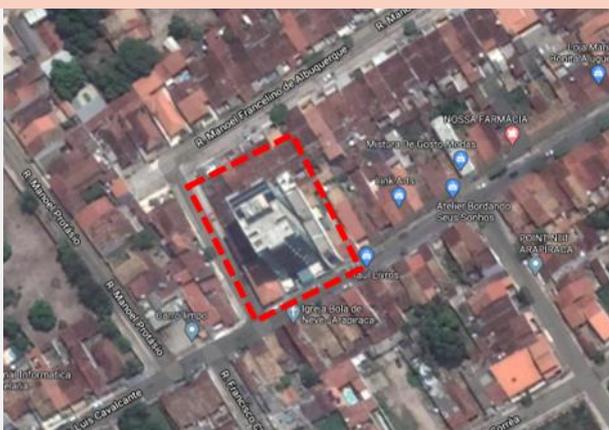
Quadro 5 - Edificações verticalizadas presentes no perímetro entre o Arapiraca *Garden Shopping* e a Avenida Deputada Ceci Cunha.

**RESIDENCIAL ARES DO ALTO**



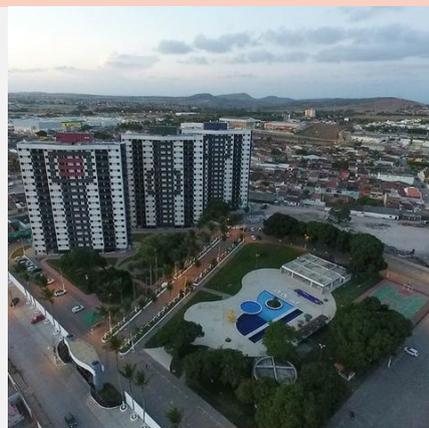
**Localização:** Rua São José, 514. Bairro Alto do Cruzeiro, Arapiraca/ AL.

**CONDOMÍNIO RESIDENCIAL FLOR DE LÓTUS**



**Localização:** Rua Governador Luís Cavalcante, 640. Bairro Alto do Cruzeiro, Arapiraca/ AL.

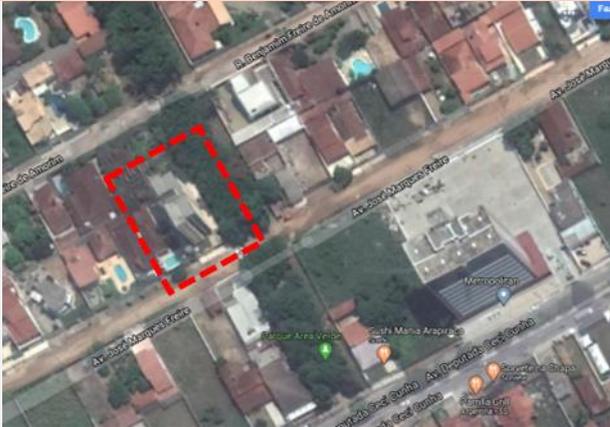
**RESIDENCIAL CARLOS SILVA II**



**Localização:** Rua Estelita de Macedo, 326. Bairro Caititus, Arapiraca/ AL.

(continua)

(continuação)

**RESIDENCIAL *SPACE***

**Localização:** Rua José Marques Freire, 381. Bairro Novo Horizonte, Arapiraca/ AL.

**EDIFÍCIO EMPRESARIAL *METROPOLITAN***

**Localização:** Avenida Deputada Ceci Cunha, 1179. Bairro Novo Horizonte, Arapiraca/ AL.

Fonte: Google Earth, adaptada pela autora, 2020.

Devido à falta da infraestrutura urbana de saneamento básico, o Empresarial *Metropolitan* precisou construir sua própria estação de tratamento de esgoto (ETE). A infraestrutura urbana, no que tange o saneamento básico, ainda não abrange todo o perímetro urbano de Arapiraca, limitando-se a poucos bairros.

Em sua tese, Torres (2017) identificou os tipos morfológicos de tecidos urbanos <sup>3</sup> em Arapiraca, determinados por diferentes padrões de ocupação do solo urbano, com altitudes próximas e determinados pela uniformidade dos padrões construtivos. Segundo a autora, os tipos morfológicos de tecidos urbanos em Arapiraca e suas respectivas características são:

Quadro 6 - Caracterização de cada tipo de tecido urbano de Arapiraca.

**CLASSE TIPOLOGICA****CARACTERÍSTICAS****Horizontal Denso**

Foto: Bairro Brasília

**Horizontal Disperso**

Foto: Bairro Novo Horizonte

**Vertical Alto Disperso**

Foto: Bairro Caititus

**Horizontal Contínuo**

Foto: Bairro Planalto

Quadras com ocupação perimetral e taxa de ocupação do solo elevada. O tecido é caracterizado por com edificações térreas ou de dois pavimentos, residenciais ou de uso misto, localizadas em lotes estreitos. O conjunto edificado apresenta baixa porosidade devido à existência predominante de edificações geminadas e lotes com taxa de ocupação elevada. Este padrão morfológico está presente no Centro da cidade e nos bairros circunvizinhos como, bairro Brasília, Ouro Preto, Cacimbas, Primavera, Capiatã, Eldorado.

O tecido é caracterizado predominantemente por ser horizontal com edificações residenciais individuais e isoladas. Apresenta quadras com ocupação perimetral, os lotes são maiores, a partir de 430m<sup>2</sup>, com taxa de ocupação média ou baixa. Este tipo morfológico pode ser encontrado nos bairros Nova Esperança, Alto do Cruzeiro, Novo Horizonte, em novos loteamentos do bairro Santa Esmeralda e em condomínios fechados como o Ouro Verde, no bairro Arnon de Melo. Em alguns casos, devido à tendência de verticalização local, os lotes estão sendo ocupados pelas primeiras unidades de habitação vertical de até seis pavimentos.

É o tipo de ocupação mais recente em Arapiraca. O tecido é constituído por edificações habitacionais verticais altas (acima de 10 pavimentos), dispostas em quadra de grande dimensão (30.000m<sup>2</sup>), com presença de arborização nos espaços imediatos exteriores. Atualmente, esta tipologia espacial pode apenas ser encontrada no bairro Caititus, representada pelo Condomínio Residencial *Space*.

Constitui o tipo de tecido mais homogêneo, representado por conjuntos de habitação unifamiliar com quadras de ocupação perimetral. Corresponde ao padrão difundido pelo Programa Minha Casa, Minha Vida, encontrado nos bairros da periferia da cidade, como Planalto, Canafístula, Verdes Campos, Olho D'água dos Cajuzinhos. As edificações são térreas, com recuos laterais reduzidos e lotes de pequena dimensão (150m<sup>2</sup>). Apresenta alta tendência ao processo de ocupação total do lote em situações futuras.

Dentre os tipos de tecido urbano em Arapiraca, é possível observar que o tipo Horizontal Disperso e o tipo Vertical Alto Disperso apresentam tendência à verticalização. Contudo, este último é encontrado somente no Condomínio Residencial *Espace*, enquanto o tipo Horizontal Disperso corresponde aos bairros em que está situada a Avenida Deputada Ceci Cunha e seu entorno, perímetro que apresenta atual tendência a se verticalizar, como falado anteriormente. Assim, a presente pesquisa utilizou o Tipo de Tecido Horizontal Disperso para elaboração dos modelos de cenários hipotéticos.

### 3.2 Métodos

A presente pesquisa utilizou o método hipotético dedutivo, que consiste no seguinte processo de investigação: a partir do conhecimento prévio de determinada teoria surge o problema, em seguida a hipótese para solução do mesmo, que sofrerá testes de falseamento por meio de experimentação, para, então, a hipótese se considerar verdadeira (LAKATOS; MARCONI, 2003).

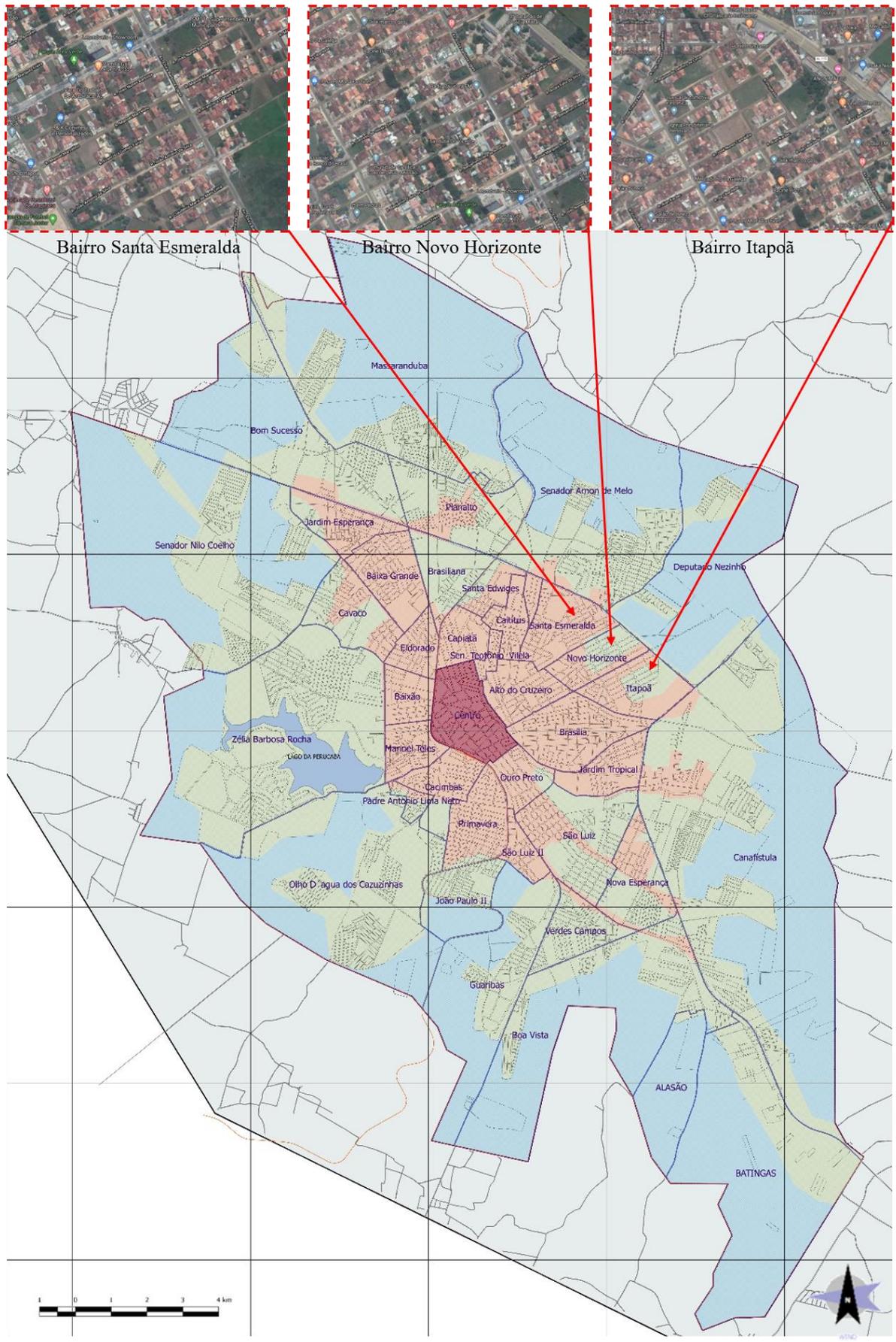
Após o processo de revisão teórica sobre os temas pertinentes à pesquisa, surgiu o seguinte problema: ao considerar o modelo de cidade compacta como ideal, como planejar o adensamento urbano por meio da verticalização em cidade de clima semiárido, considerando os princípios do urbanismo bioclimático? A hipótese levantada busca analisar o efeito do uso do recuo inicial e do recuo progressivo (parâmetros urbanísticos tradicionais) no microclima urbano, considerando aspectos da rugosidade e porosidade na malha urbana, a fim de contribuir para o planejamento urbano da cidade. Isso foi possível por meio do método de pesquisa preditiva, com base em simulações computacionais utilizando o software ENVI-met 4.0, para a simulação de cenários urbanos hipotéticos com o fim de analisar o desempenho térmico dos mesmos.

Desta forma, buscou-se entender a influência da verticalização no ambiente térmico urbano a partir da avaliação do desempenho climático de cenários urbanos hipotéticos. Para tanto, tomou-se o estudo de parâmetros urbanísticos denominados tradicionais (BRANDÃO, 2009), a partir do lote como unidade mínima de planejamento. Vale ressaltar que Arapiraca está situada em uma região de transição entre a costa úmida e o interior semiárido do Nordeste brasileiro, e apresenta o clima misto, caracterizado pelo verão quente/ seco e inverno quente/ úmido. Dessa forma, o planejamento urbano da cidade deve prevê condições climáticas favoráveis para as duas estações do ano. Contudo, a presente pesquisa analisou somente o período quente/ seco.

Com base em modelos de cenários urbanos hipotéticos (pesquisa preditiva), foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos: (1) Descrição do objeto de estudo; (2) Elaboração dos cenários hipotéticos; (3) Dados de entrada para simulação no *software* ENVI-met; (4) Simulação dos cenários hipotéticos; e (5) Análise comparativa do desempenho climático dos cenários hipotéticos, considerando o comportamento da temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos fluxos de ar e o índice PMV, considerando os parâmetros quantificados para cada cenário.

### 3.2.1 Elaboração dos Cenários Hipotéticos

A partir da descrição do objeto de estudo foi possível constatar que o perímetro urbano que se configura entre o entorno da Avenida Deputada Ceci Cunha e o Arapiraca *Garden Shopping* apresenta tendência à verticalização. O perímetro em questão é composto pelos seguintes bairros: Alto do Cruzeiro, Novo Horizonte, Santa Esmeralda, Itapoã, Brasília e Caititus. Para elaboração dos cenários hipotéticos, buscou-se compreender o padrão recorrente de ocupação nessa região, com base no desenho das quadras e dos lotes, e na largura das vias e passeios, por meio de mapa cartográfico atualizado, disponibilizado pela Prefeitura Municipal de Arapiraca/ AL (ver Figura 14).



**Figura 14 – Padrão recorrente de ocupação, com base no desenho das quadras, lotes, vias e passeios**  
Fonte: <https://geo.arapiraca.al.gov.br>, adaptada pela Autora, 2020

Então, constatou-se que o padrão de ocupação mais recorrente é de quadra composta por 30 lotes cuja dimensão é de 12m x 30m, as vias e os passeios possuem 9m e 1,5m, respectivamente (ver Figura 15).



**Figura 15 – Modelo da quadra dos cenários urbanos hipotéticos**

Fonte: Google Maps, adaptado pela Autora, 2020

As dimensões coletadas estão presentes na Tabela 2:

Tabela 2 – Dados adotados na elaboração do modelo para os cenários urbanos hipotéticos

ESPECIFICAÇÃO	DADOS
Quadra	30 lotes
Área de Lote	12m x 30m
Largura das vias	9m
Largura dos passeios	1,5m

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

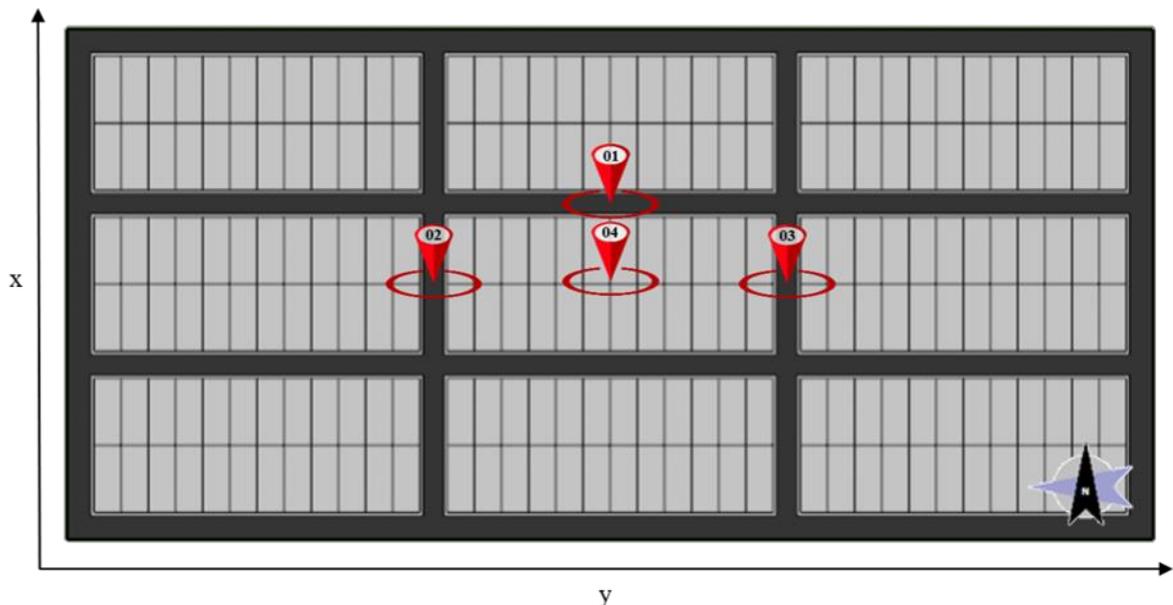
É importante ressaltar que no modelo elaborado os lotes foram totalmente impermeabilizados, e no que tange os materiais de revestimento, foi utilizado asfalto para as vias, concreto cinza para passeios e interior dos lotes, tijolo cerâmica queimado para as edificações e telha cerâmica para as cobertas, pois segue o padrão de construção mais comum na cidade. Na Tabela 3 é possível observar os valores do albedo e emissividade para cada material utilizado na elaboração dos modelos:

Tabela 3 - Materiais utilizados na elaboração dos modelos

REVESTIMENTO	CÓDIGO	ALBEDO	EMISSIVIDADE
Asfalto (vias)	ST	0,20	0,90
Concreto cinza (passeios e interior dos lotes)	PG	0,50	0,09
Parede de tijolo queimado (edificações)	B2	0,40	0,90
Telha cerâmica (coberta)	R2	0,50	0,90

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Para elaboração dos cenários hipotéticos, adotou-se a composição de 9 quadras, a fim de se avaliar o desempenho climático a partir da quadra central, com base na extração de dados climáticos em 4 pontos: o ponto 01 está localizado na frente da quadra central, o ponto 02 está localizado a sotavento da quadra central, o ponto 03, a barlavento da quadra central e o ponto 04 que está localizado no interior da quadra central, como mostra a Figura 16.



**Figura 16 – Modelo da quadra dos cenários urbanos hipotéticos**

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

No perímetro urbano selecionado para estudo, foi identificado o padrão de 30 lotes por quadra, contudo a área máxima de simulação no *software* ENVI-met 4.0 é de 250x250x30 (x,y,z) células de grade. Então, optou-se por diminuir o número de lotes na quadra para se ajustar à área máxima do modelo. Desta forma, cada quadra possui 24 lotes de 12m x 30m, as vias possuem 9m de largura e os passeios, 1,5m. Assim, o cenário hipotético possui 478m x 228m x 87m, cuja área plana é igual a 108.984m<sup>2</sup>.

De acordo com Bruse (2020), o ENVI-met permite dois tipos diferentes de células de grade verticais: um modelo com células de grade equidistante, onde todas as células de grade, exceto as cinco mais baixas, têm uma extensão vertical idêntica; e uma célula de grade

telescópica, determinado em percentagem, onde o tamanho do célula de grade se expande com a altura, o que permite atingir modelos com edificações de alturas mais elevadas. Os cenários verticalizados apresentam alturas que não se encaixam nas 30 células de grade disponibilizados, assim, foi necessário adotar o modo telescópico. No arquivo de configuração dos cenários urbanos a serem simulados deve ser especificado o valor de extensão da célula de grade vertical, que no presente caso foi de 2%. Por usar esse mecanismo foi preciso usar 29 células de grade vertical, das 30 que o programa oferece.

Na presente pesquisa, adotou-se cada célula de grade com a dimensão de 2m x 2m x 3m (x,y,z), para obter precisão na análise dos gráficos simulados. O cenário total possui a seguinte dimensão: 239x114x29. É importante ressaltar que o valor de z corresponde a 3m, pois é equivalente à altura de 1 pavimento. No *nesting grids*<sup>3</sup> foi adotado o valor de 5 células de grade, como especifica a literatura.

A partir do desenho do modelo padrão, tem-se a modelagem das edificações, que se baseou nas estratégias bioclimáticas identificadas por Silva (2019): o aproveitamento do sombreamento e da ventilação natural. Assim, com base nas estratégias bioclimáticas adequadas ao clima de Arapiraca e nos conceitos de porosidade e rugosidade, a presente pesquisa adotou os seguintes parâmetros construtivos: o **recoo inicial** e o **recoo progressivo**.

A modelagem das edificações partiu de dois pressupostos: o modelo de referência e os modelos verticalizados. No modelo de referência as edificações apresentam 1 pavimento com uso dos recuos iniciais indicados na legislação que trata do uso e ocupação do solo urbano em Arapiraca, mais especificamente, no Código de Obras e Edificações (2001). Os modelos verticalizados partem da baixa, média e alta verticalização. A baixa verticalização possui edificações com 5 pavimentos, a média possui edificações com 10 pavimentos e a alta verticalização, 15 pavimentos. O número de pavimentos selecionados corresponde a uma média encontrada nos edifícios da cidade, e, de forma a padronizá-los, adotou-se múltiplos de 5. Vale ressaltar que no modelo de alta verticalização, adotou-se edificações de 15 pavimentos devido a limitação de área do *software* ENVI-met 4.0.

---

<sup>3</sup> O *Nesting Grids* é uma banda de células da grade em torno do núcleo do modelo 3D. No ENVI-met não é possível calcular valores reais para pontos de grade ao longo das bordas (e especialmente não para pontos de grade que são a borda). Assim, apenas suposições simples podem ser usadas para obter valores que podem ser usados no modelo. Essa suposição simples pode ser que os valores sejam constantes nesses pontos da grade (as chamadas condições de limite fechado ou forçado) ou que os valores dos pontos de grade internos sejam copiados para as grades na borda (condições de limite aberto). Um terceiro método também oferecido no ENVI-met é copiar os valores do limite de saída de volta para o limite de entrada (condições de contorno cíclico). Quaisquer que sejam as condições de contorno usadas, o principal problema ainda é que os pontos de grade próximos ou próximos a um limite não podem reagir a influências da mesma maneira que os pontos de grade na parte interna do modelo. Se os limites são fornecidos com valores constantes, eles não podem reagir às coisas que acontecem na parte interna. Dessa forma, o uso do *Nesting Grids* permite ajudar a melhorar os resultados do modelo, ou torná-lo estável (BRUSE, 2020).



Quadro 7 - Dados de remembramento de 2 e 3 lotes, segundo o número de pavimentos.

BAIXA VERTICALIZAÇÃO		MÉDIA VERTICALIZAÇÃO		ALTA VERTICALIZAÇÃO	
5 PAVIMENTOS		10 PAVIMENTOS		15 PAVIMENTOS	
	RF: 4,5m RL: 3,0m AT: 1080m <sup>2</sup> A L: 675m <sup>2</sup> AC: 3375m <sup>2</sup> CA: 3,125 TO: 62,5%		RF: 7,0m RL: 5,5m AT: 1080m <sup>2</sup> AL: 437,5 m <sup>2</sup> AC: 4375m <sup>2</sup> CA: 4,05 TO: 40,5%		RF: 9,5m RL: 8,0m AT: 1080m <sup>2</sup> AL: 250m <sup>2</sup> AC: 3750m <sup>2</sup> CA: 3,47 TO: 23,15%
	RF: 4,5m RL: 3,0m AT: 720m <sup>2</sup> AL: 405m <sup>2</sup> AC: 2025m <sup>2</sup> CA: 2,81 TO: 56,25%		RF: 7,0m RL: 5,5m AT: 720m <sup>2</sup> AL: 227,5m <sup>2</sup> AC: 2275m <sup>2</sup> CA: 3,16 TO: 31,59%		RF: 9,5m RL: 8,0m AT: 720m <sup>2</sup> AL: 100m <sup>2</sup> AC: 1500m <sup>2</sup> CA: 2,08 TO: 13,89%

LEGENDA:  
RF: recuo frontal.  
RL: recuo lateral.  
AT: área terreno.  
AL: área da lâmina.

NP: n° de pavimentos.  
AC: área construída.  
CA: coeficiente de aproveitamento.  
TO: taxa de ocupação.

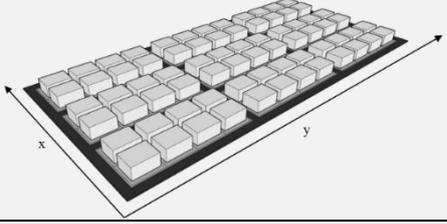
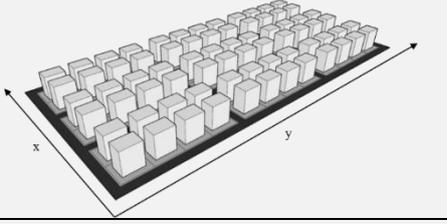
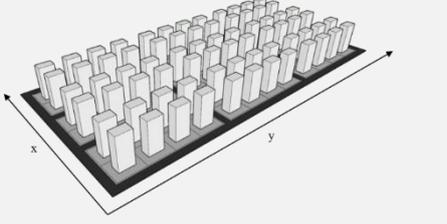
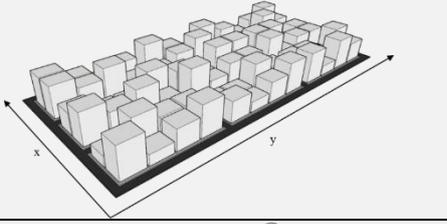
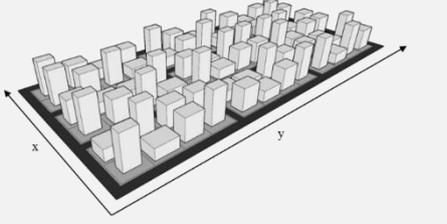
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Desta forma, os seguintes cenários hipotéticos foram elaborados:

Quadro 8 - Cenários hipotéticos elaborados a partir da porosidade.

DESCRIÇÃO DOS CENÁRIOS		MOD.	IMAGENS
REFERÊNCIA SEM VERTICALIZAÇÃO Cenário hipotético com edificações de 1 pavimento em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos iniciais (cenário sem verticalização como referência da situação atual).		REF	
EDIFÍCIOS COM MESMA ALTURA (BAIXA RUGOSIDADE)	RECUO INICIAL (BAIXA POROSIDADE)	BAIXA VERTICALIZAÇÃO Cenário hipotético com edificações de 5 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos iniciais. (cenário com baixa altura, baixa rugosidade e baixa porosidade)	RI-05 
		MÉDIA VERTICALIZAÇÃO Cenário hipotético com edificações de 10 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos iniciais. (cenário com média altura, baixa rugosidade e baixa porosidade)	RI-10 
		ALTA VERTICALIZAÇÃO Cenário hipotético com edificações de 15 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos iniciais. (cenário com edificações altas, baixa rugosidade e baixa porosidade)	RI-15 

(continua)

		(continuação)		
EDIFÍCIOS COM ALTURAS VARIADAS (ALTA RUGOSIDADE)	RECUO PROGRESSIVO (ALTA POROSIDADE)	<p><b>BAIXA VERTICALIZAÇÃO</b> Cenário hipotético com edificações de 5 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos progressivos. (cenário com baixa altura, baixa rugosidade e alta porosidade)</p>	RP-05	
		<p><b>MÉDIA VERTICALIZAÇÃO</b> Cenário hipotético com edificações de 10 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos progressivos. (cenário com média altura, baixa rugosidade e alta porosidade)</p>	RP-10	
		<p><b>ALTA VERTICALIZAÇÃO</b> Cenário hipotético com edificações de 15 pavimentos em todos os lotes da quadra, com aplicação dos recuos progressivos. (cenário com edificações altas, baixa rugosidade e alta porosidade)</p>	RP-15	
		<p><b>RECUO INICIAL (BAIXA POROSIDADE)</b> Cenário hipotético com edificações de alturas variadas (5, 10 e 15 pavimentos), com aplicação dos recuos iniciais. (cenário com alturas variadas, alta rugosidade e baixa porosidade)</p>	R-RI	
		<p><b>RECUO PROGRASSIVO (ALTA POROSIDADE)</b> Cenário hipotético com edificações de alturas variadas (5, 10 e 15 pavimentos), com aplicação dos recuos progressivos. (cenário com alturas variadas, alta rugosidade e alta porosidade)</p>	R-RP	

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Vale ressaltar que, a partir da adequação climática da morfologia urbana aos recursos naturais locais, gerar-se-ão melhores índices de conforto térmico a nível urbano, que promoverá o melhor aproveitamento destes mesmos recursos naturais a nível da edificação. Daí a importância de se planejar a cidade sob os princípios do urbanismo bioclimático.

### 3.2.2 Dados de entrada para simulação no *software* ENVI-met

De acordo com a Organização Meteorológica Mundial (OMM), as Normais Climatológicas são valores médios calculados para um período relativamente longo e uniforme, compreendendo no mínimo três décadas consecutivas. Quando a estação meteorológica não esteve em operação durante o período de 30 anos ou por outra razão qualquer, Normais Provisórias podem ser calculadas. Normais Provisórias são médias de curto período, baseadas em observações que se estendam sobre um período mínimo de 10 anos.

Em Arapiraca, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalou a estação automática (A353), para monitoramento de dados climáticos a cada hora, somente em abril de 2008 (SILVA, 2019). Nesse caso, não há tempo de coleta de dados suficientes para gerar as Normais Climatológicas do município, assim, a presente pesquisa teve como base Normais Provisórias para obtenção dos dados climáticos.

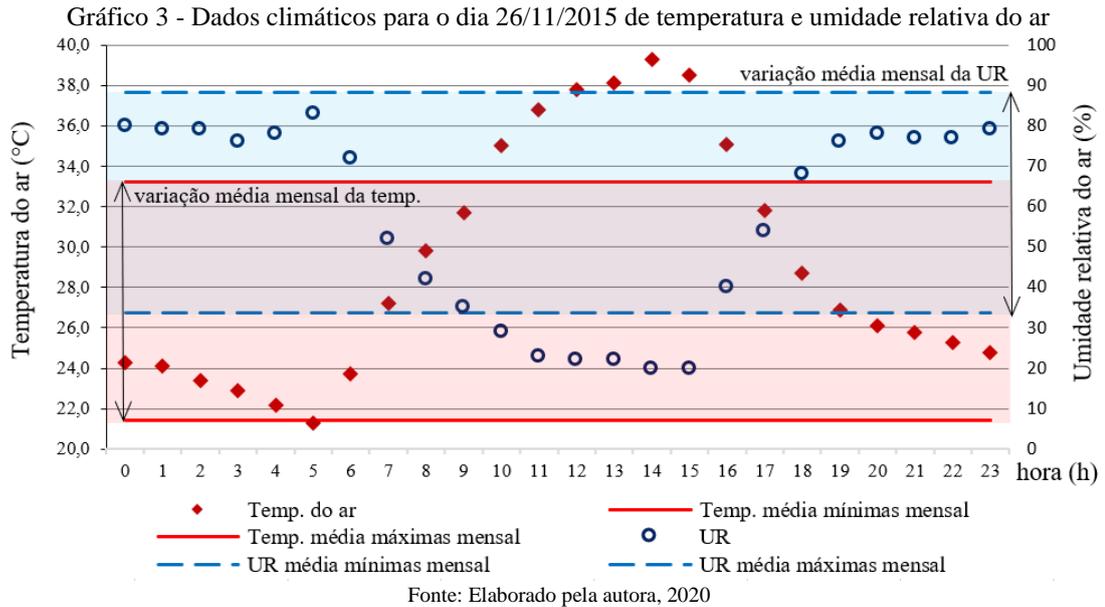
Com base nas Normais Provisórias, a presente pesquisa parte do período quente/ seco. A partir do período quente/ seco, de acordo com os dados de umidade relativa do ar e temperatura do ar, adotou-se o dia com menor valor da média de umidade relativa do ar e maior valor de temperatura do ar. Considerando os dados de um período de 10 anos (2008-2018), analisados por Silva (2019), podemos destacar o dia 26 de novembro de 2015 (Tabela 5).

Tabela 5 - Dados climáticos de 26 de novembro de 2015

TEMPERATURA DO AR (°C)				UMIDADE RELATIVA DO AR (%)			VENTO PREDOMINANTE	
Mín.	Máx.	Méd.	Ampl.	Mín.	Máx.	Méd.	Velocidade (m/s) média do dia	Dir. (°) média do dia
21,3	39,3	29,19	18,0	20	83	56,7	2,7	94,6

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

No período analisado, o dia 26 de novembro de 2015 apresentou a temperatura do ar mais elevada e a menor média de umidade relativa do ar. Os dados climáticos de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o dia adotado estão presentes no Gráfico 3:



A partir disso foi possível identificar os dados climáticos de entrada para simulação computacional no *software*, como mostra a Figura 17:

Change or create model Domain

Number of grids and nesting properties

**Model type: Concept Design**

Main model area:

x-Grids: 239 y-Grids: 114 z-Grids: 29

Nesting grids around main area:

Nr of nesting grids: 5

Set soil profiles for nesting grids

Soil A: [00] Default Unseald Soil (\*\* do no

Soil B: [00] Default Unseald Soil (\*\* do nc

Grid size and structure in main area

Size of grid cell in meter:

dx= 2.00 dy= 2.00 dz= 3.00 (base height)

Method of vertical grid generation:

equidistant (all dz are equal except lowest grid box)

telescoping (dz increases with height)

Telescoping factor (%): 2.00

Start telescoping after height (m): 3.00

Default Wall/ Roof Properties

Wall Material: [B2] Brick wall (burned)

Roof Material: [R2] Roofing: Terracotta

Model area description: A brave new area

Geographic Properties

**Model rotation out of grid north:** 0.00

**Location on earth**

Name of location: ARAPIRACA/ ALAGOAS

Position on earth: Latitude (deg. +N, -S): -9.45

Longitude (deg. -W, +E): -36.39

Reference time zone: Name: GMT/ UTC-2

Reference longitude: -30.00

**Georeference**

Co-ordiante of lower left grid x-value: 0.00

y-value: 0.00

Reference system: <plane>

Reference level above sea level for DEM=0: 0.00

Create new area

Apply changes

Cancel

Figura 17 - Configuração inicial dos modelos dos cenários hipotéticos

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

O restante dos dados de entrada no *software* ENVI-met estão dispostos na Tabela 6:

Tabela 6 - Dados de entrada para simulação computacional no *software* ENVI-met

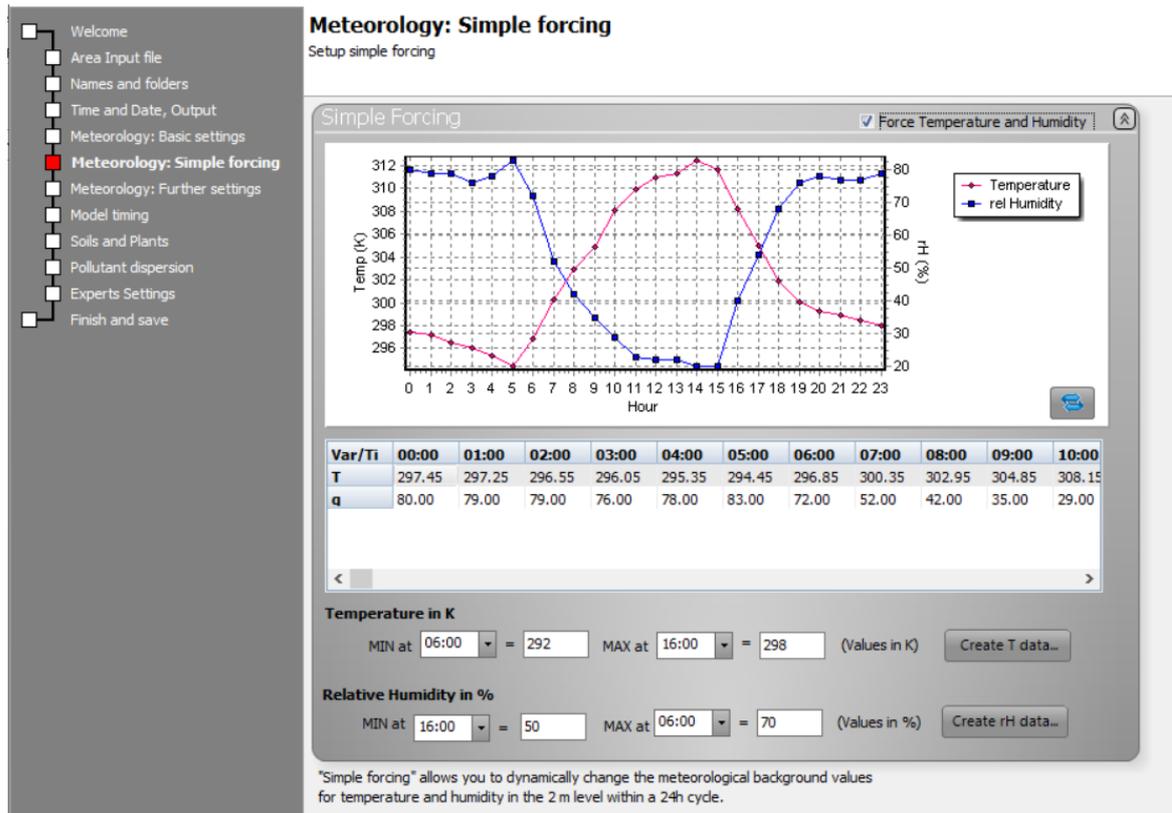
INFORMAÇÕES	DADOS	INFORMAÇÕES	DADOS
Data do Início da Simulação	24/11/2015	Rugosidade	0,1
Hora do Início da Simulação	21:00	Umidade Específica do Ar a 2500m (g/kg) <sup>2</sup>	2,92
Total de Horas Simuladas	52	Temperatura Atmosférica (K)	302,34
Velocidade do Vento a 10m (m/s)	2,7	Radiação Solar	0,92
Direção do Vento	94		

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A hora de início da simulação computacional corresponde às 21h, pois no manual do *software* indica que a simulação deve iniciar em um horário sem radiação solar e de atmosfera estável, e assim, recomenda-se o horário das 21h. A partir disso, tomou-se o dia 24 de novembro de 2015 para início da simulação com o intuito de obter dados climáticos de 2 dias completos e utilizar o segundo dia para análise. Assim, o total de horas simuladas corresponde a 52 horas, resultado da soma das 48 horas dos 2 dias completos e das 4 horas do dia que se considerou somente o período noturno de início da simulação. Para a velocidade do vento a 10m e sua direção, considerou-se a média do dia 26 de novembro de 2015. Os dados da rugosidade da superfície e da radiação solar foram obtidos com base na calibração presente na pesquisa de Torres (2017). A umidade específica do ar a 2500m foi obtida através do site do dep. Ciências Atmosféricas da Universidade de Wyoming<sup>4</sup>, referente a estação de Natal/RN, pois é a estação mais próxima de Arapiraca/ AL. A temperatura atmosférica corresponde a média do dia 26 de novembro de 2015.

O programa oferece duas opções para inserir os dados de entrada de temperatura do ar e umidade relativa do ar: inserir as temperaturas mínima e máxima nos horários de 6:00hr e às 16hr, e o mesmo com a umidade relativa do ar, ou utilizar a ferramenta *simple forcing*. De acordo com Huttner e Bruse (2009), o *simple forcing* define a variação das condições da camada atmosférica diurna de acordo com os dados horários para temperatura do ar e umidade relativa do dia adotado. Diante disso, a presente pesquisa adotou a ferramenta *simple forcing*. Os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar estão dispostos na Figura 18.

<sup>4</sup> Disponível em: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>



**Figura 18 - Simple forcing e os dados de temperatura do ar e umidade do ar**  
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

### 3.2.3 Simulação Computacional dos Cenários Hipotéticos

Para simulação dos cenários urbanos hipotéticos foi utilizado o *software* ENVI-met 4.0, a partir da extensão de área que corresponde a 250x250x30 (x, y,z).

### 3.2.4 Análise da relação entre os Parâmetros Urbanísticos Quantificados para os Cenários Hipotéticos e as Variáveis Climáticas

A análise da relação entre os parâmetros urbanísticos utilizados será com base no desempenho térmico dos cenários urbanos hipotéticos a partir dos dados climáticos de temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos ventos e do índice PMV.

A respeito da temperatura do ar, valores maiores que 32°C são considerados desconfortáveis, em relação ao conforto térmico (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). A velocidade/ direção dos ventos em ambiente externo de clima quente deve ser entre 1 e 1,50m/s (KUKREJA, 1978). A respeito do índice PMV, tem-se a seguinte classificação para análise dos resultados:

Tabela 7 – Classificação do índice PMV

PMV <-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	PMV > 4
Extremamente Frio	Muito Frio	Levemente Frio	Frio	Conforto	Quente	Levemente Quente	Muito Quente	Extremamente Quente

Fonte: Elaborado pela Autora, 2020

### 3.3 Conclusões do Capítulo

A partir dos objetivos propostos pela presente pesquisa foi possível determinar os materiais e métodos específicos a fim de chegar à refutação ou afirmação das hipóteses levantadas. Nesse processo foi necessário elaborar 18 modelos de cenários urbanos hipotéticos simulados no programa ENVI-met, com norte igual a 0°, para analisar a influência da orientação da ventilação predominante perpendicular às quadras e vias, e de 45°, para analisar a influência da orientação da ventilação predominante oblíqua às quadras e vias, a fim de verificar o efeito do sombreamento, a partir da orientação solar, e da penetração dos ventos na malha urbana, com base na direção predominante da ventilação natural.

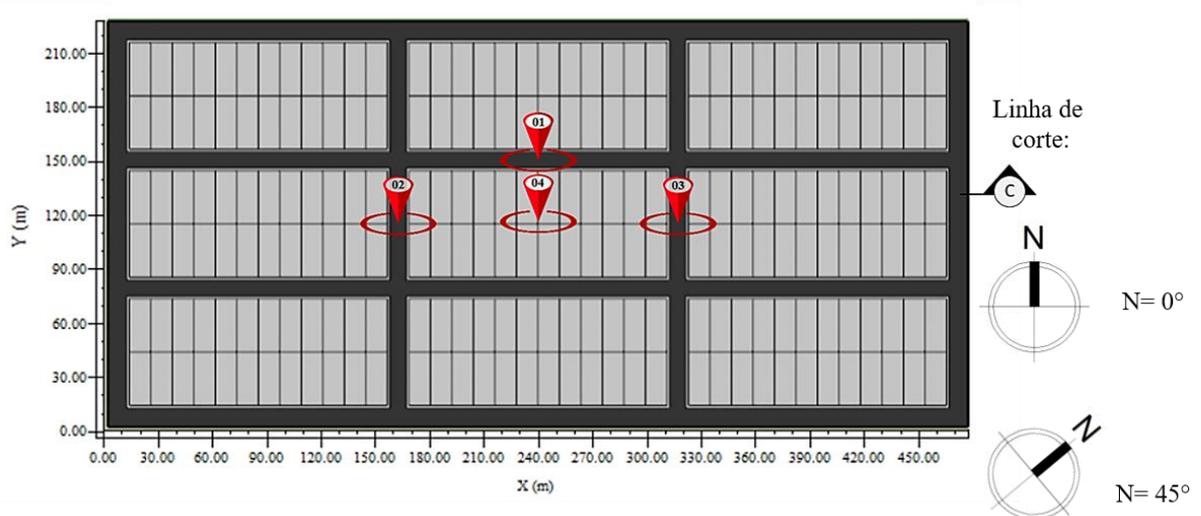
O dia selecionado para simulação dos modelos elaborados corresponde ao período quente/ seco, com base nas Normais Provisórias do período de 10 anos (2008-2018), analisados por Silva (2019). A partir dos dados de umidade relativa do ar e temperatura do ar, adotou-se o dia com menor valor da média de umidade relativa do ar e maior valor de temperatura do ar, que foi 26 de novembro de 2015. Os resultados das simulações geraram arquivos de temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos ventos e do índice PMV; que puderam ser tratados no *software* Leonardo e *Biomet*, ambos integrados ao ENVI-met.

A análise da influência do adensamento urbano por meio da verticalização no microclima de cidade média de clima semiárido se dará com base na relação entre os parâmetros urbanísticos quantificados e o desempenho térmico (a partir dos dados climáticos de temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos ventos e do índice PMV) dos cenários urbanos hipotéticos simulados.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados e discussões obtidos de acordo com o método aplicado. O presente capítulo parte da análise dos dados dos modelos simulados, com base nos conceitos de porosidade e rugosidade, com o intuito de analisar comparativamente a influência da aplicação do recuo inicial e do recuo progressivo no desempenho térmico dos cenários urbanos hipotéticos para a cidade de Arapiraca/ AL, em um dia rigoroso do período quente/ seco. Posteriormente, é discutido os resultados obtidos de acordo com o objetivo proposto.

No interior da quadra central de cada cenário urbano foram selecionados 4 pontos para extração de dados climáticos: o ponto 01 (120,75) está situado paralelo à quadra, o ponto 02 (81,58) a sotavento da quadra, o ponto 03 (159,58) está situado a barlavento da quadra e o ponto 04 (120,57) está interno à quadra. Para análise comparativa, foi adotado os seguintes horários: às 9h, às 15h e às 21h, conforme horários indicados pela Organização Mundial de Meteorologia (OMM), para o dia 26/11/2015. Todos os perfis foram seccionados no centro da quadra, a 131m do eixo y, e os mapas 2D foram gerados com altura de corte de 1,5m (ver Figura 19).



**Figura 19 – Localização dos 4 pontos para extração de dados das variáveis climáticas e da linha de corte no modelo padrão dos cenários urbanos hipotéticos**

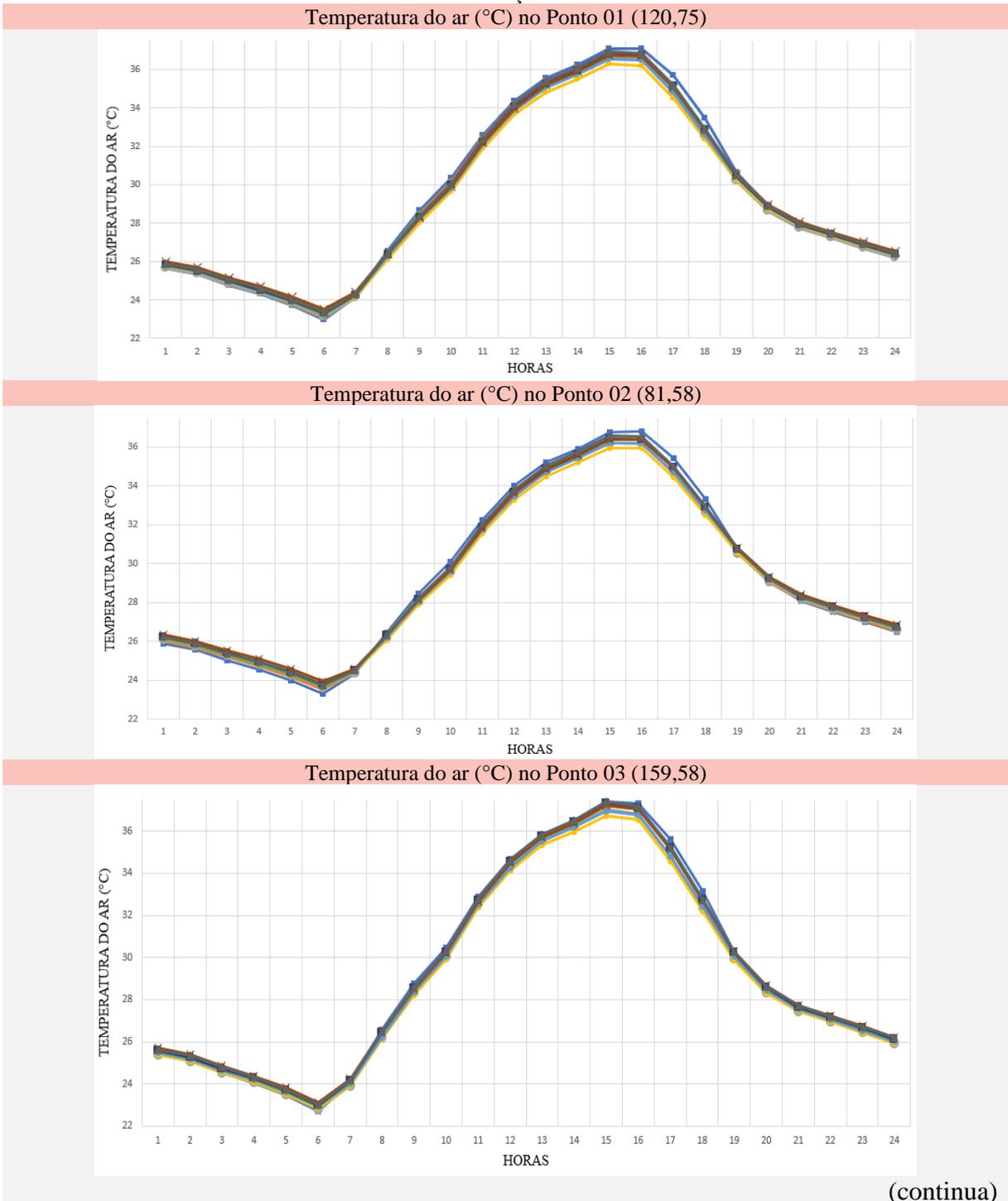
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

A fim de facilitar a análise dos dados climáticos obtidos a partir das simulações computacionais, foram gerados tabelas, gráficos e quadros com os perfis e mapas de temperatura do ar, temperatura radiante, velocidade/ direção dos fluxos de ar e índice PMV, por meio dos *softwares* Leonardo e *Biomet*, interfaces do ENVI-met.

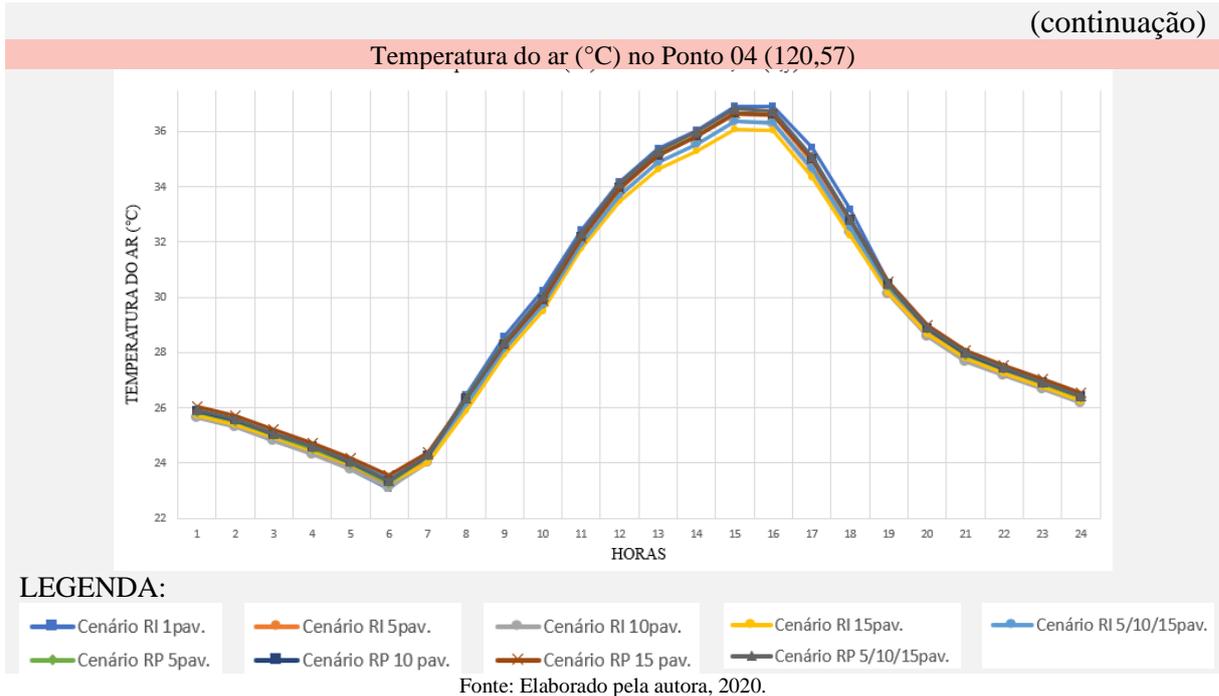
### 4.1 Análise do desempenho dos cenários quanto à temperatura do ar

A partir do tratamento dos dados de temperatura do ar, foi possível observar os resultados obtidos dos cenários urbanos hipotéticos com incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (ver Quadro 9 e 10).

Quadro 9 – Temperatura do ar dos modelos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações.



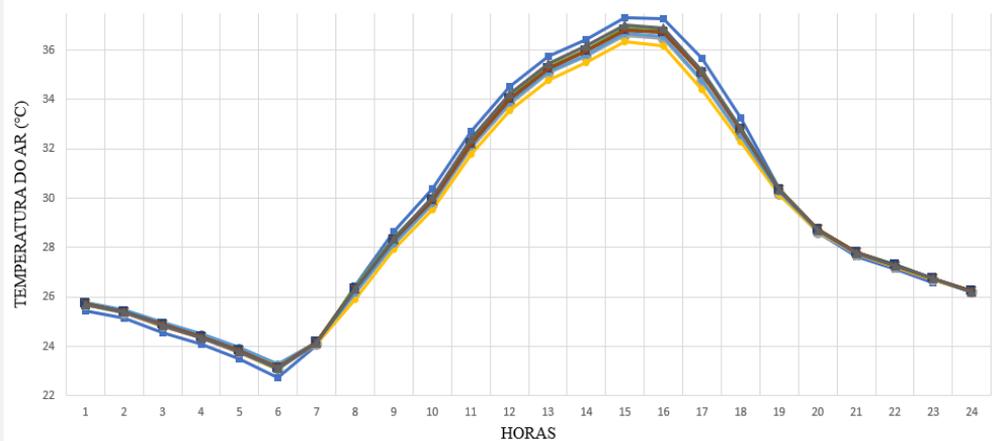
(continua)



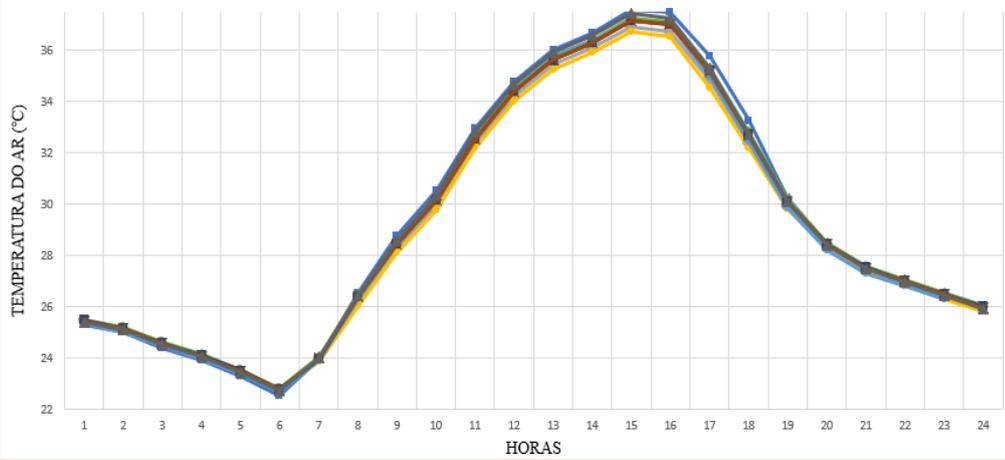
Nos modelos de incidência da ventilação perpendicular às edificações, a temperatura do ar apresentou um mesmo padrão de comportamento nos pontos ao redor da quadra central. Com exceção do ponto 03, no qual a temperatura do ar entre os cenários urbanos hipotéticos apresentou uma variação mais elevada. Contudo as variações observadas foram menores que 1°C, tomando por exemplo o cenário REF às 15h, observou-se uma diferença de 0,22°C, 0,52°C e 0,39°C se compararmos com os pontos 01, 02 e 04, respectivamente.

Nos modelos de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, o mesmo resultado se repete, mas nesse caso, os pontos 02 e 03 apresentam comportamento da temperatura do ar distinto dos demais. Com base no cenário REF às 15h, os pontos 02 e 03 apresentaram 37,49°C e 37,52°C, respectivamente, enquanto os pontos 01 e 04 apresentaram 37,26°C e 37,36°C, o que corresponde a uma diferença de até 0,26°C (ver Quadro 10).

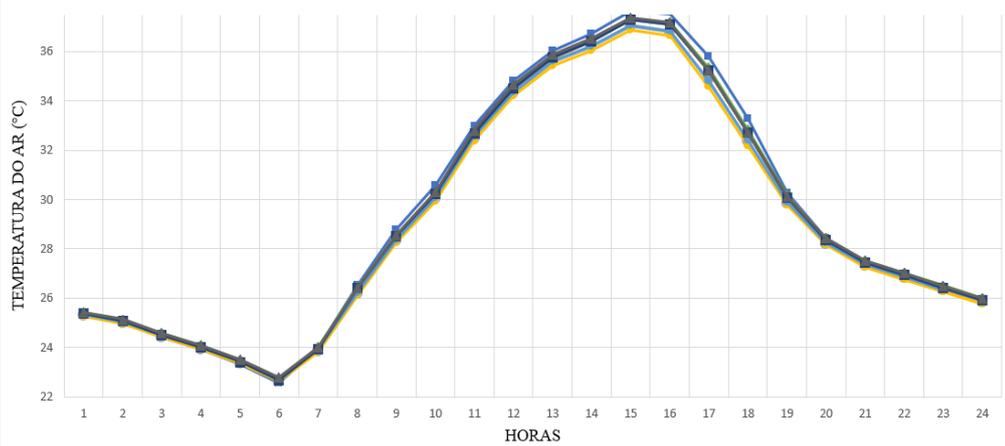
Quadro 10 – Temperatura do ar dos modelos de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações.  
Temperatura do ar (°C) no Ponto 01 (120,75)



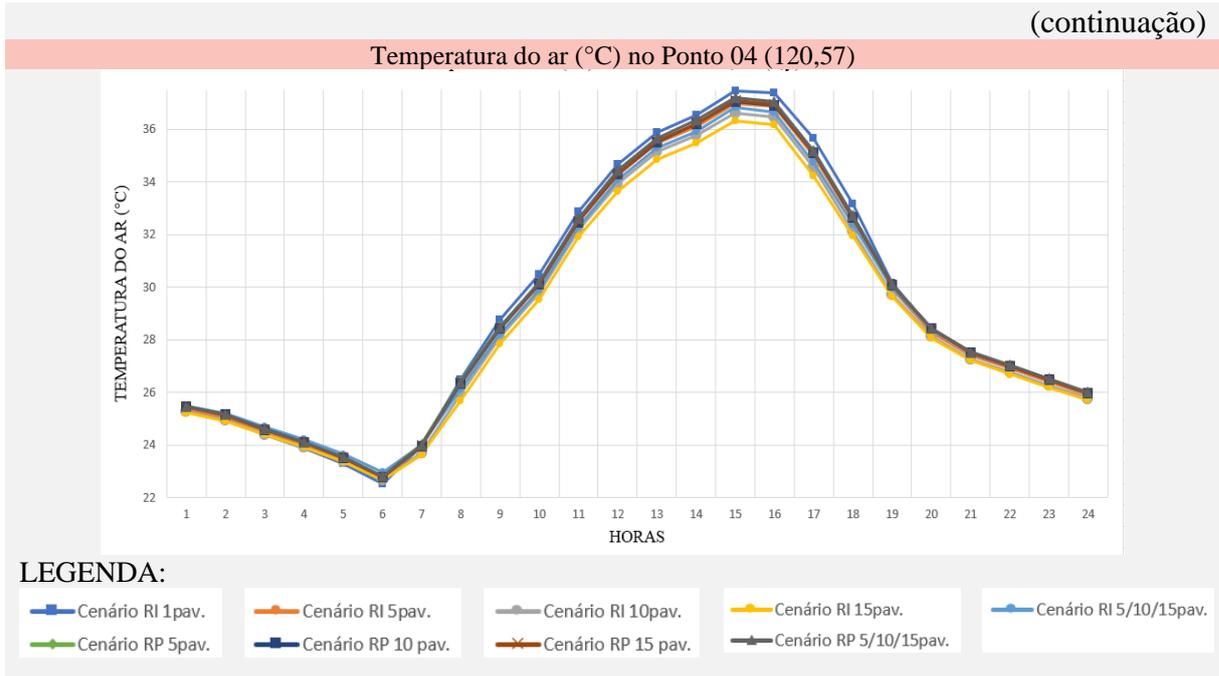
Temperatura do ar (°C) no Ponto 02 (81,58)



Temperatura do ar (°C) no Ponto 03 (159,58)



(continua)

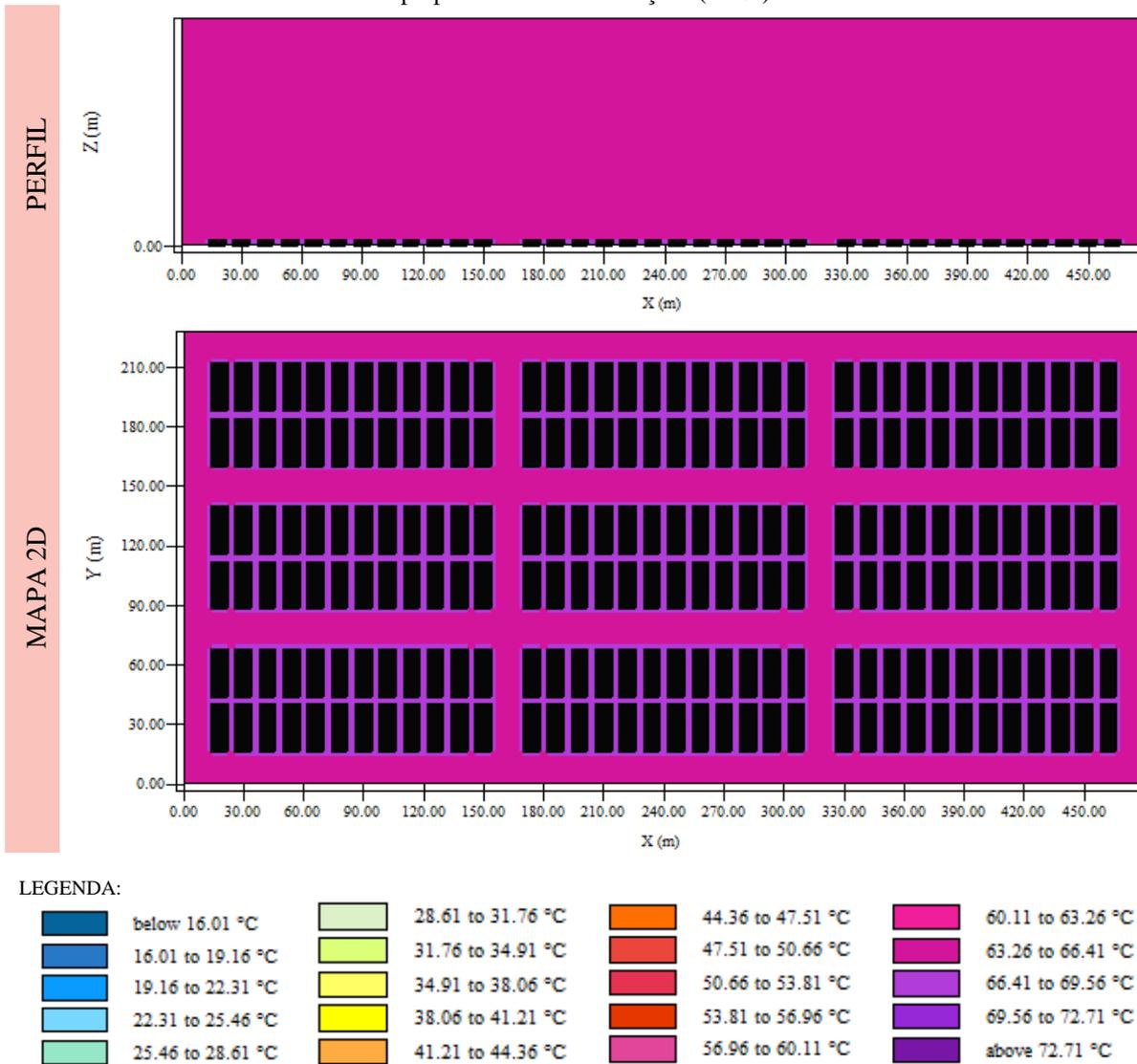


Os resultados obtidos com base na análise da temperatura do ar nos 4 pontos ao redor da quadra central demonstram que não houve mudanças significativas entre os modelos simulados. Nesse caso, para análise do desempenho térmico dos cenários urbanos hipotéticos serão considerados a temperatura radiante, a velocidade/ direção dos ventos e o índice PMV.

#### 4.2 Análise do desempenho dos cenários quanto à temperatura radiante

No Quadro 11 é possível observar o comportamento da temperatura radiante no modelo REF, com edificações de 1 pavimento, de incidência da ventilação perpendicular às edificações. Com base no perfil, é possível observar que na camada superficial, o modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações apresentou temperatura radiante mais elevada, com intervalo de cor que corresponde a 66,41°C a 69,56°C.

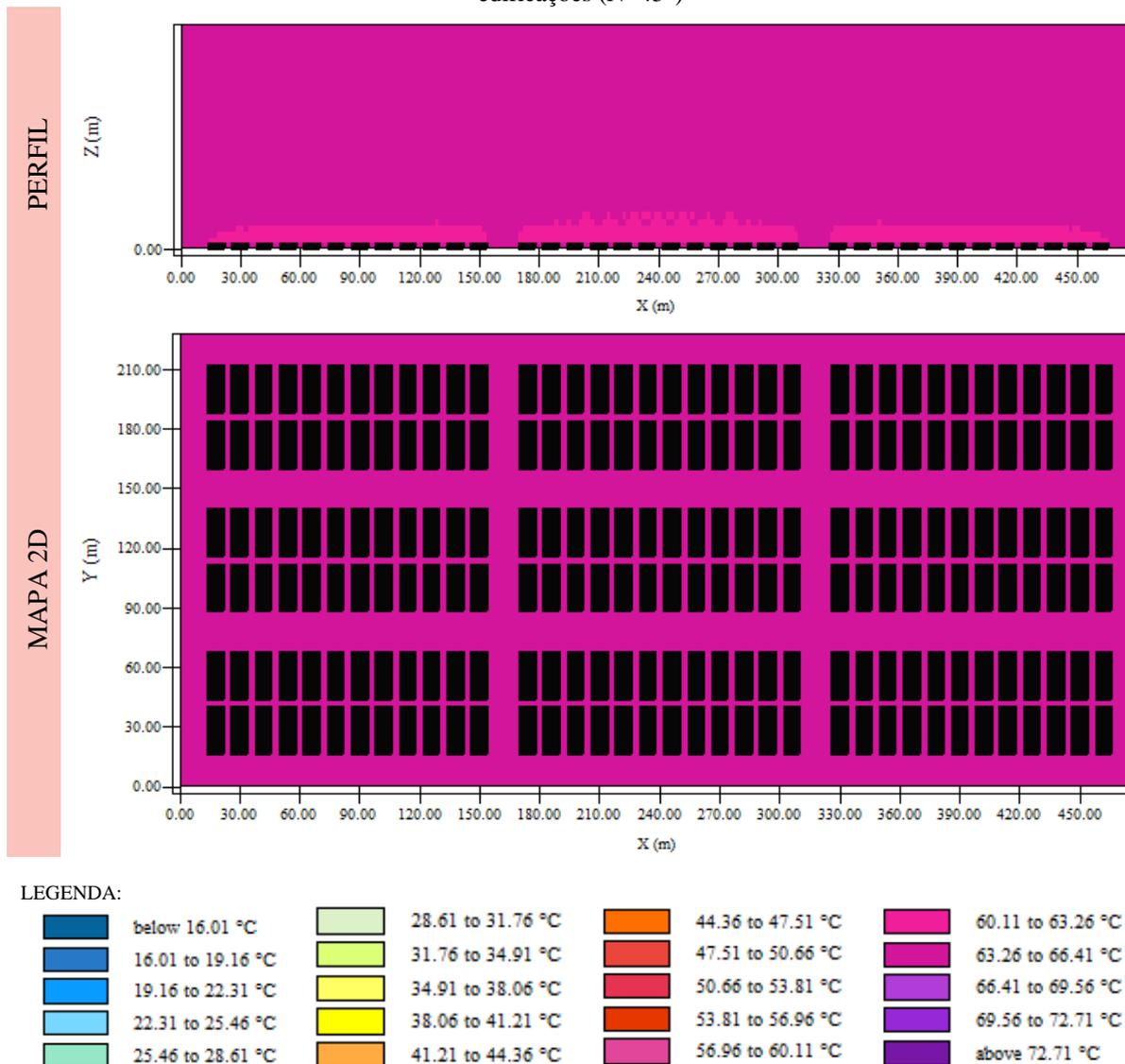
Quadro 11 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O Quadro 12 apresenta o modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações. Nesse caso, a camada superficial apresentou temperaturas radiantes que variam entre 60,11°C a 63,26°C. Ainda acerca desse modelo, é possível observar a formação de bolsões na camada de mistura com temperatura radiante que varia entre 56,96°C a 60,11°C, o que indica a influência da orientação da malha urbana frente à radiação solar e da direção predominante dos ventos.

Quadro 12 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°)

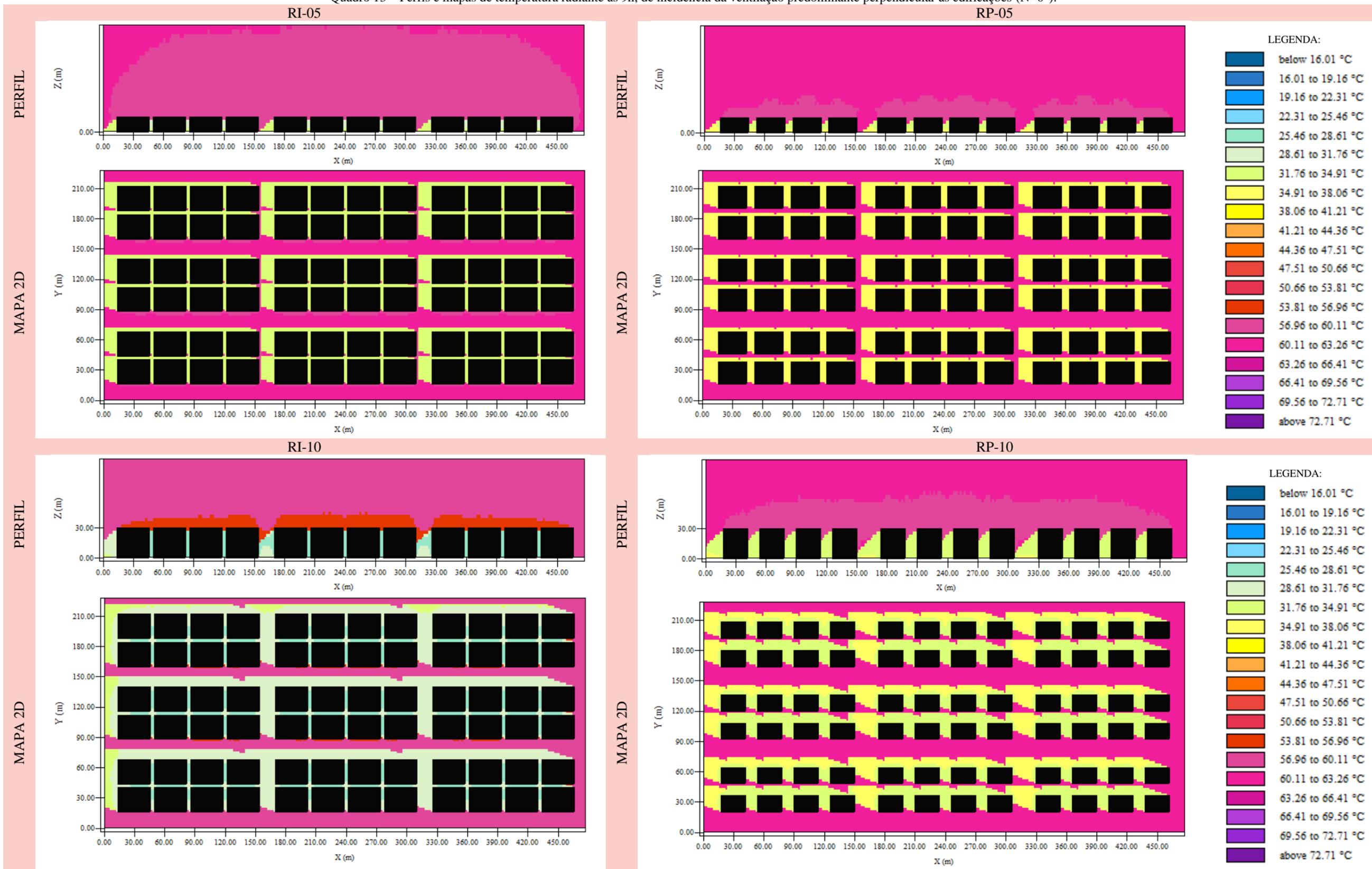


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O mapa do modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações indicam que na malha urbana a temperatura radiante varia entre 63,26°C a 66,41°C, e no interior dos lotes com uso do recuo inicial, varia entre 66,41°C a 69,56°C. No modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações, a temperatura radiante se mostra em um padrão único de variação entre 60,11°C a 63,26°C.

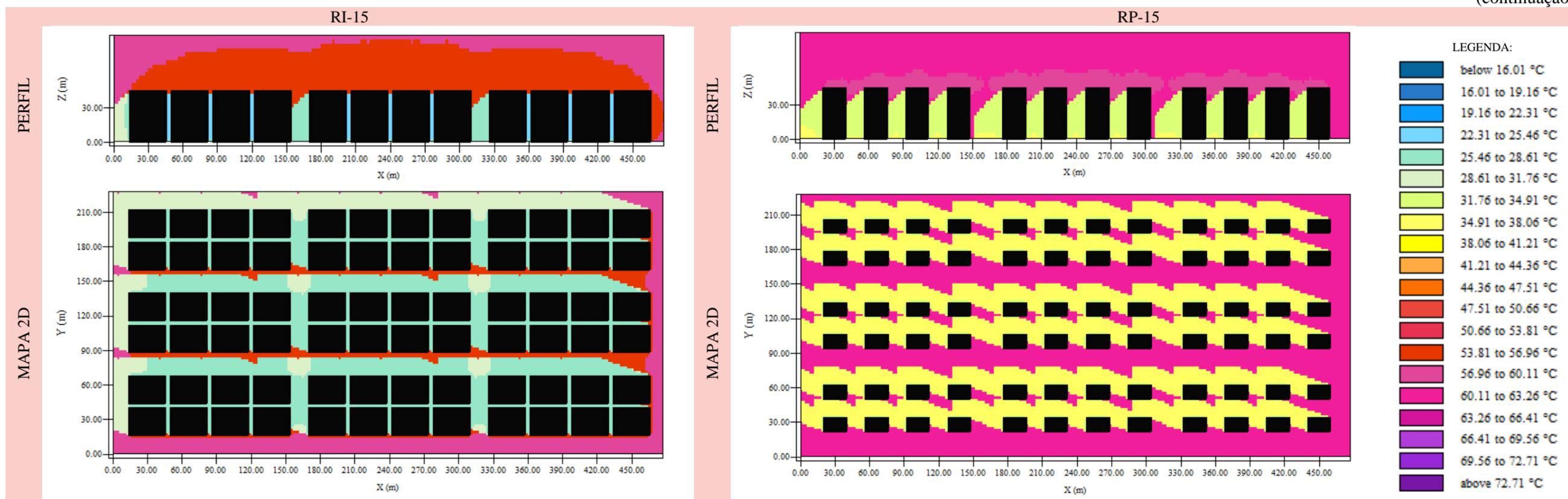
O Quadro 13 apresenta o comportamento da temperatura radiante às 9h dos cenários verticalizados com baixa (5 pavimentos), média (10 pavimentos) e alta (15 pavimentos) verticalização com adoção do recuo inicial e do recuo progressivo, com incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações.

Quadro 13 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

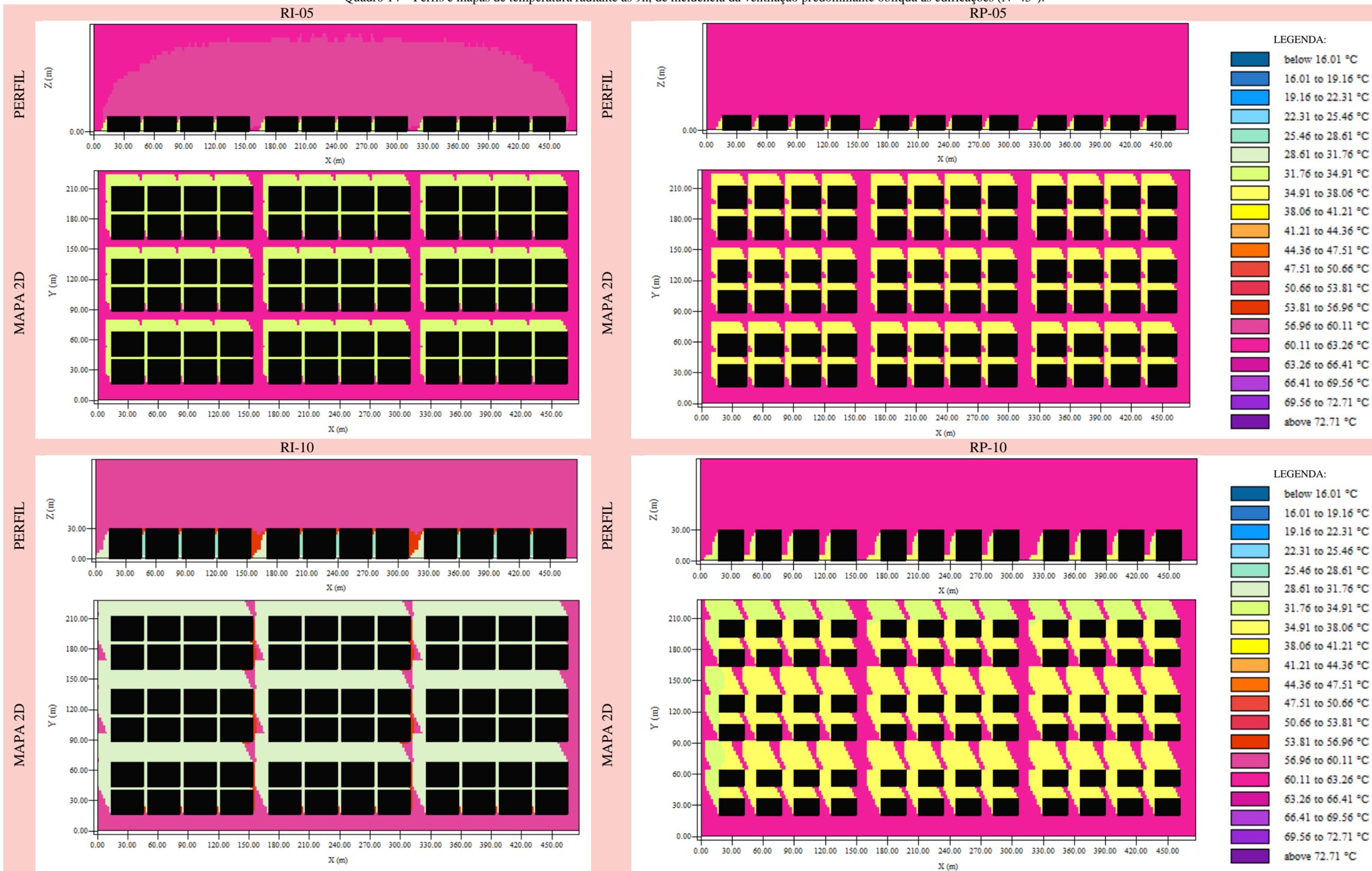
Com base nos perfis é possível observar que o uso do recuo inicial favoreceu a diminuição da temperatura radiante, devido ao efeito do sombreamento gerado pelas edificações. Em contrapartida, na camada de mistura ocorre a formação de bolsões aquecidos, com temperatura radiante que varia entre 53,81°C a 60,11°C. Nos perfis dos modelos em que se adotou o recuo progressivo, a diminuição da área de sombreamento favoreceu o aumento da temperatura radiante na camada superficial, contudo, os bolsões na camada de mistura apresentaram uma extensão menor. A aplicação do recuo progressivo proporcionou uma melhora no fluxo dos ventos na malha urbana, o que auxiliou no processo de dissipação do ar mais aquecido na camada superficial e de mistura.

A partir da análise dos mapas é possível observar que as temperaturas radiantes mais amenas foram encontradas nas áreas de sombra geradas pelas edificações verticalizadas. No modelo RI-05, a temperatura radiante no interior da malha urbana foi de 34,91°C a 38,06°C, já no modelo RI-10, os valores diminuem para 28,61°C a 31,76°C, enquanto que no modelo RI-15, a variação da temperatura radiante na malha urbana correspondeu a 25,46°C até 28,61°C, o que indica que o aumento do número de pavimentos gerou condições térmicas mais amenas devido ao efeito do sombreamento, pois edificações de maior altura, geram sombras de maior área, o que diminui a incidência direta da radiação solar, e com isso diminui os valores de temperatura radiante.

O Quadro 14 apresenta o comportamento da temperatura radiante na malha urbana dos modelos com incidência da ventilação oblíqua às edificações. Nos perfis dos cenários urbanos hipotéticos com uso do recuo inicial e do recuo progressivo, é possível observar que houve uma diminuição da extensão das manchas que correspondem a temperaturas radiantes mais amenas. A incidência da ventilação oblíqua às edificações favoreceu a diminuição dos bolsões de ar aquecido na camada de mistura dos modelos simulados com uso do recuo inicial, já nos modelos com uso do recuo progressivo, não ocorreu a formação de bolsões, o que indica que a orientação das vias e o aumento da porosidade da malha urbana auxiliam no processo de dissipação do ar quente na camada superficial e de mistura.

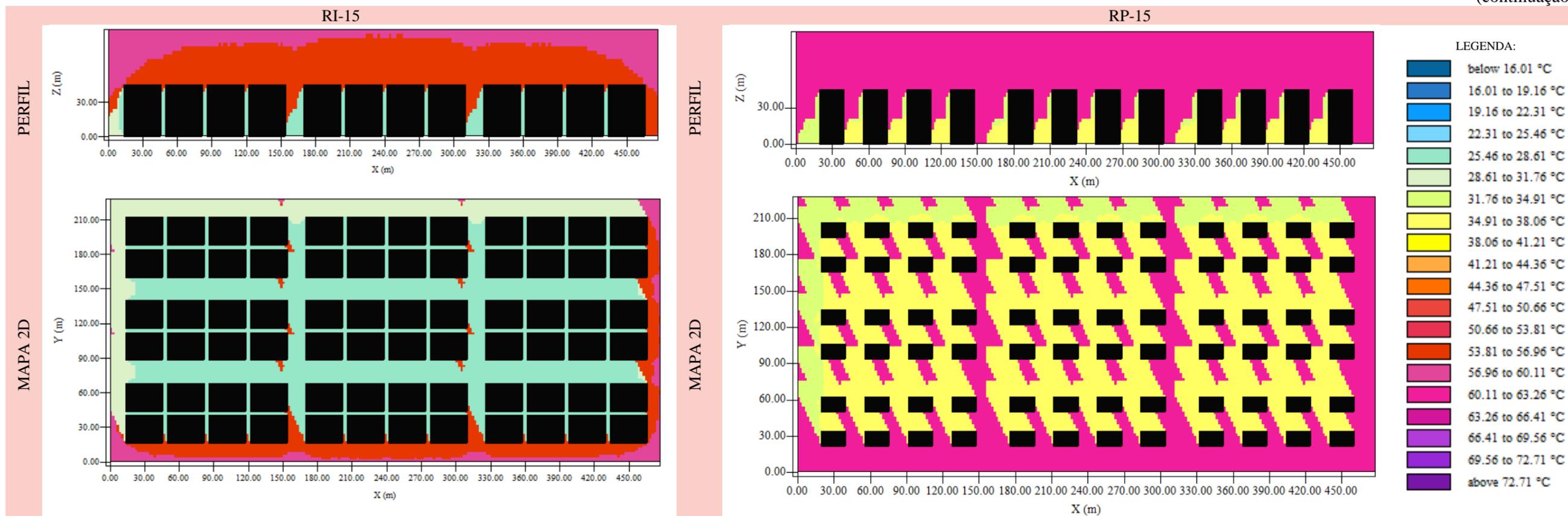
A partir dos mapas dos modelos de incidência da ventilação oblíqua às edificações, é possível observar que as sombras geradas pelas edificações verticalizadas apresentam áreas maiores, contribuindo, para condições térmicas mais amenas. Esse efeito é percebido nos cenários urbanos hipotéticos com uso do recuo inicial e recuo progressivo, entretanto, como no primeiro caso o fator de céu visível é menor, a superfície urbana recebe pouca radiação solar direta, o que favorece na diminuição da temperatura radiante. O efeito do sombreamento se torna mais evidente no modelo RI-15, pois ao redor da quadra central é possível observar temperatura radiante que varia entre 25,46°C a 56,96°C, enquanto no modelo RP-15, a variação de temperatura radiante no mesmo entorno corresponde a 38,06°C a 63,26°C.

Quadro 14 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A Tabela 8 expõe quantitativamente os dados de temperatura radiante no horário das 9h, de acordo com a incidência da ventilação perpendicular às edificações (Norte=0°) e a incidência da ventilação oblíqua às edificações (Norte=45°).

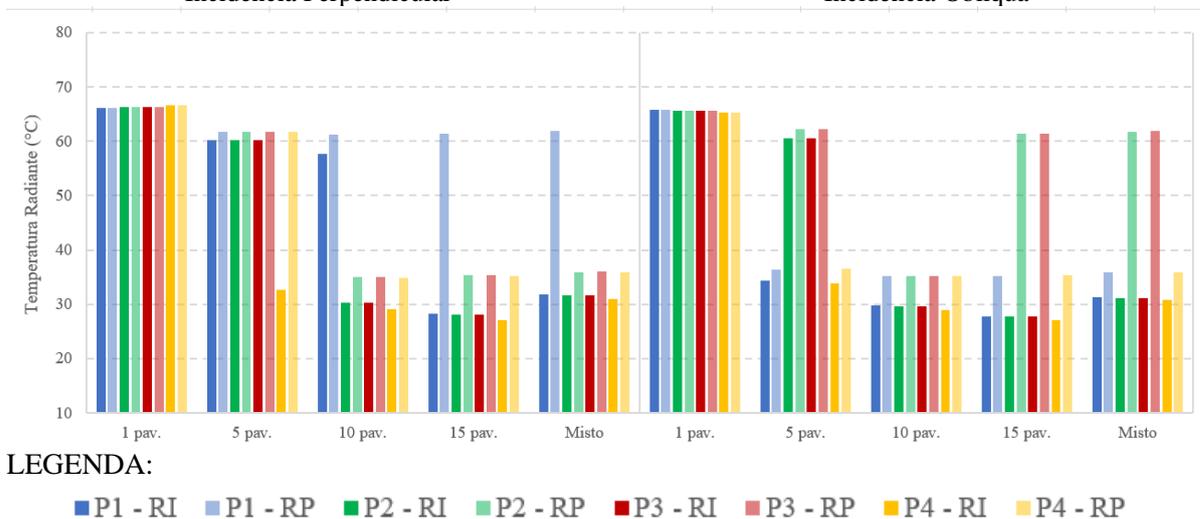
Tabela 8 – Dados de Temperatura Radiante às 9h, nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto	1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto
Ponto 1	RI	66,15	60,24	57,60	28,18	31,84	65,72	34,29	29,74	27,81	31,28
	RP		61,75	61,23	61,44	61,90		36,35	35,13	35,23	35,83
Ponto 2	RI	66,26	60,11	30,26	28,10	31,72	65,64	60,56	29,64	27,76	31,21
	RP		61,72	35,03	35,34	35,90		62,19	35,14	61,37	61,78
Ponto 3	RI	66,26	60,11	30,26	28,10	31,65	65,64	60,56	29,64	27,76	31,15
	RP		61,72	35,03	35,34	35,97		62,19	35,14	61,37	61,84
Ponto 4	RI	66,69	32,72	29,14	27,07	31,04	65,31	33,81	28,99	27,01	30,85
	RP		61,68	34,87	35,22	35,78		36,55	35,27	35,31	35,94

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Em análise dos dados referentes aos cenários de incidência perpendicular no horário das 9h é possível observar que o modelo REF apresenta valores de temperatura radiante mais elevados do que nos demais cenários. Isso é resultado do alto fator de céu visível, que gerou maior penetração da radiação solar direta no solo urbano. O efeito do sombreamento, como principal estratégia bioclimática apontada por Silva (2019), para o clima da cidade de Arapiraca ficou evidente nos resultados obtidos com as simulações computacionais, visto que os cenários verticalizados com adoção do recuo inicial, por gerarem um perímetro maior de sombra, favoreceu a diminuição do valor da temperatura radiante nos 4 pontos analisados (Gráfico 4).

Gráfico 4 – Dados de Temperatura Radiante às 9h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



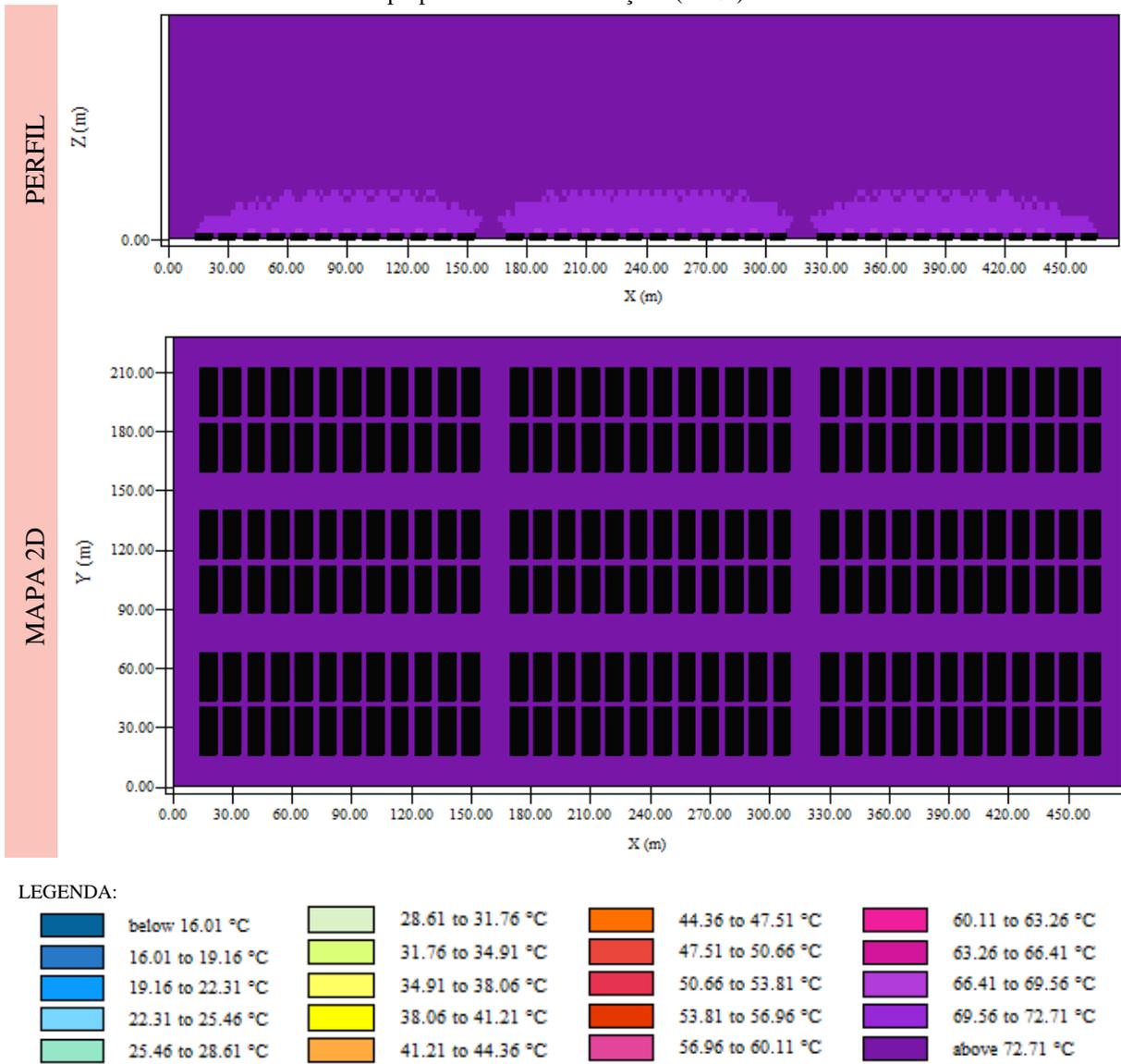
LEGENDA:

- P1 - RI   ■ P1 - RP   ■ P2 - RI   ■ P2 - RP   ■ P3 - RI   ■ P3 - RP   ■ P4 - RI   ■ P4 - RP

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

O Quadro 15 apresenta o comportamento da temperatura radiante do modelo REF, no horário das 15h, período mais quente do dia, quanto a incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações.

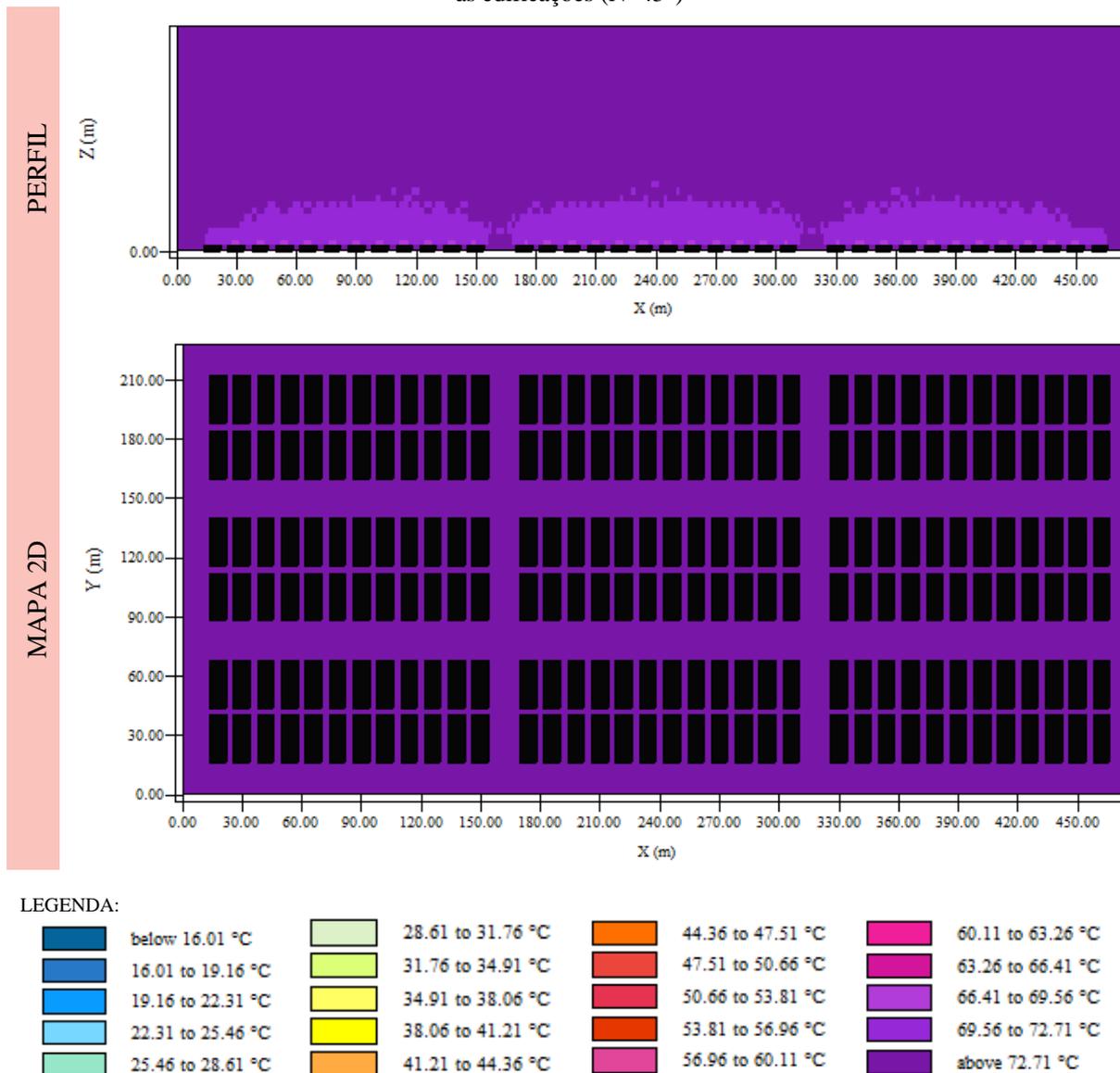
Quadro 15 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O Quadro 16 apresenta o comportamento da temperatura radiante do modelo REF, no horário das 15h, período mais quente do dia, quanto a incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações.

Quadro 16 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°)

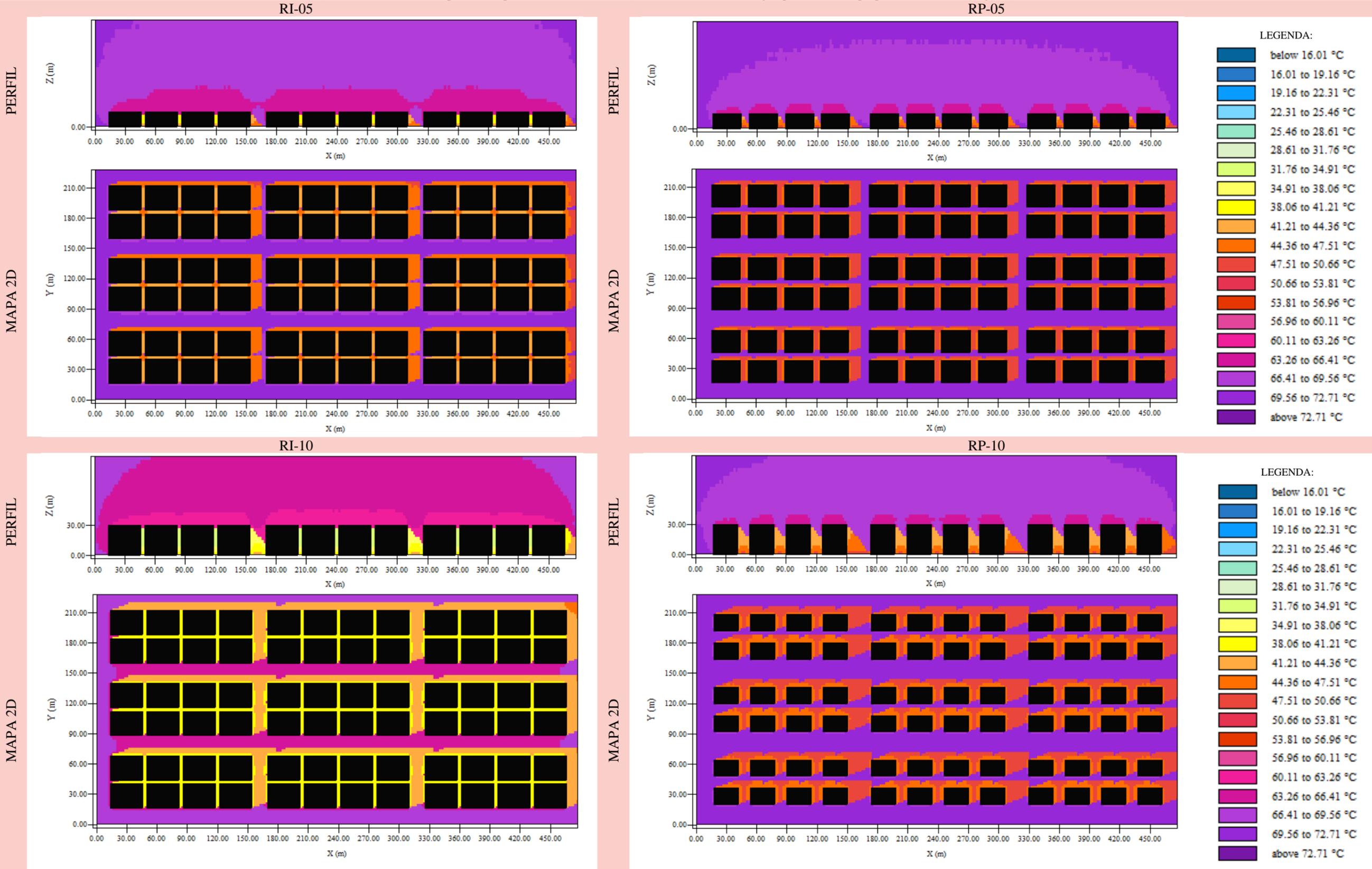


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Nos perfis e mapas dos modelos REF é possível observar que o comportamento da temperatura radiante foi semelhante. Nos perfis, a temperatura na camada de mistura varia entre 69,56°C a acima de 72,71°C. Os mapas indicaram que na malha urbana, a temperatura esteve acima de 72,71°C.

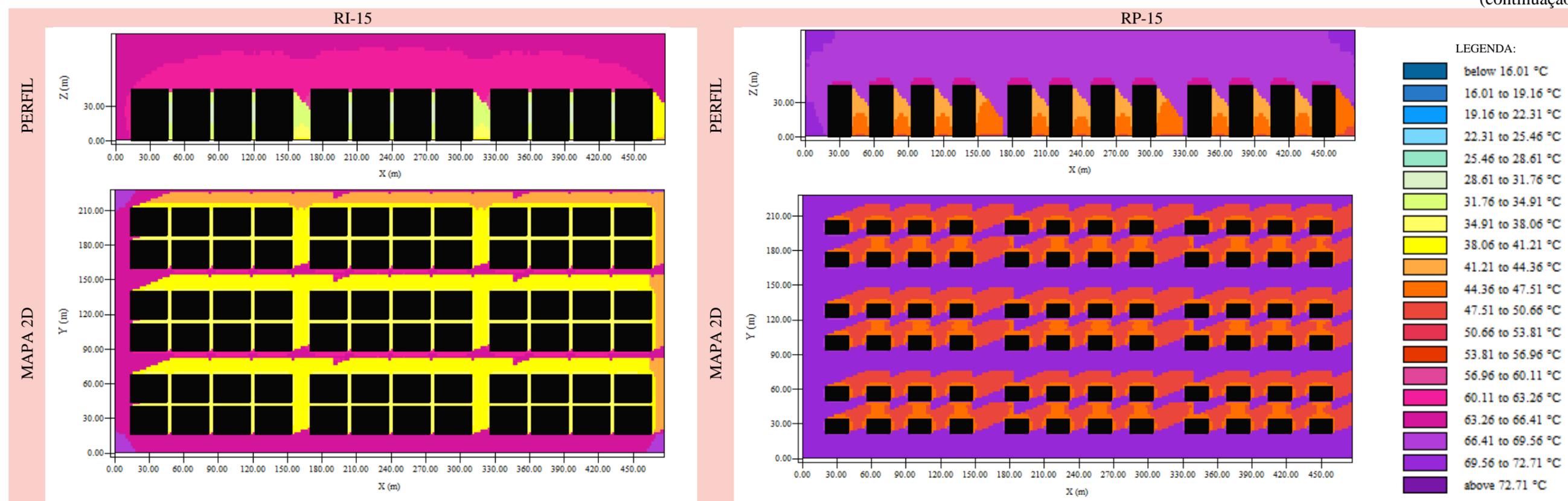
Os Quadros 17 e 18 apresentam o comportamento da temperatura radiante às 15h dos modelos de incidência da ventilação perpendicular e oblíqua às edificações.

Quadro 17 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



(continua)

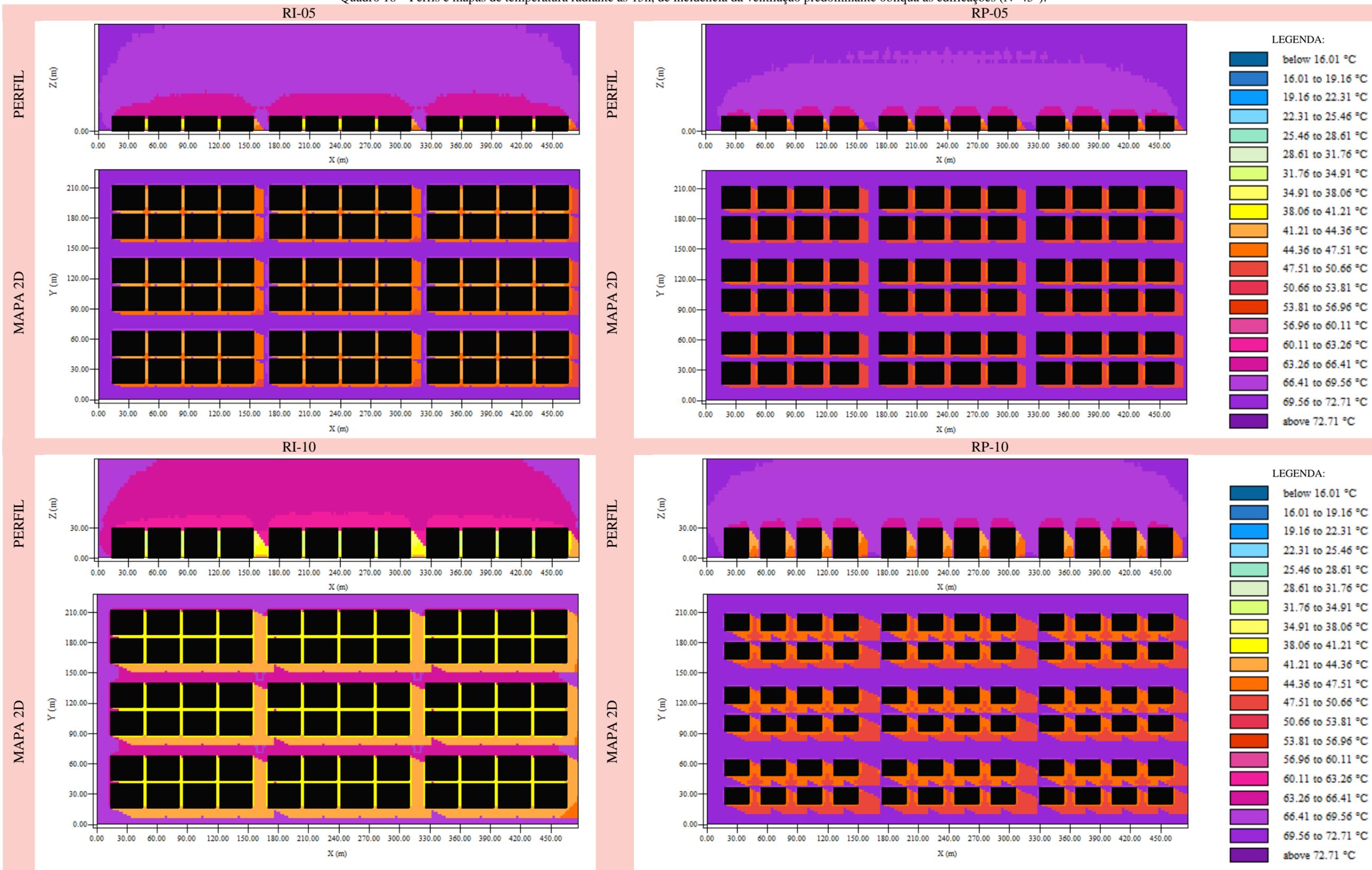
(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

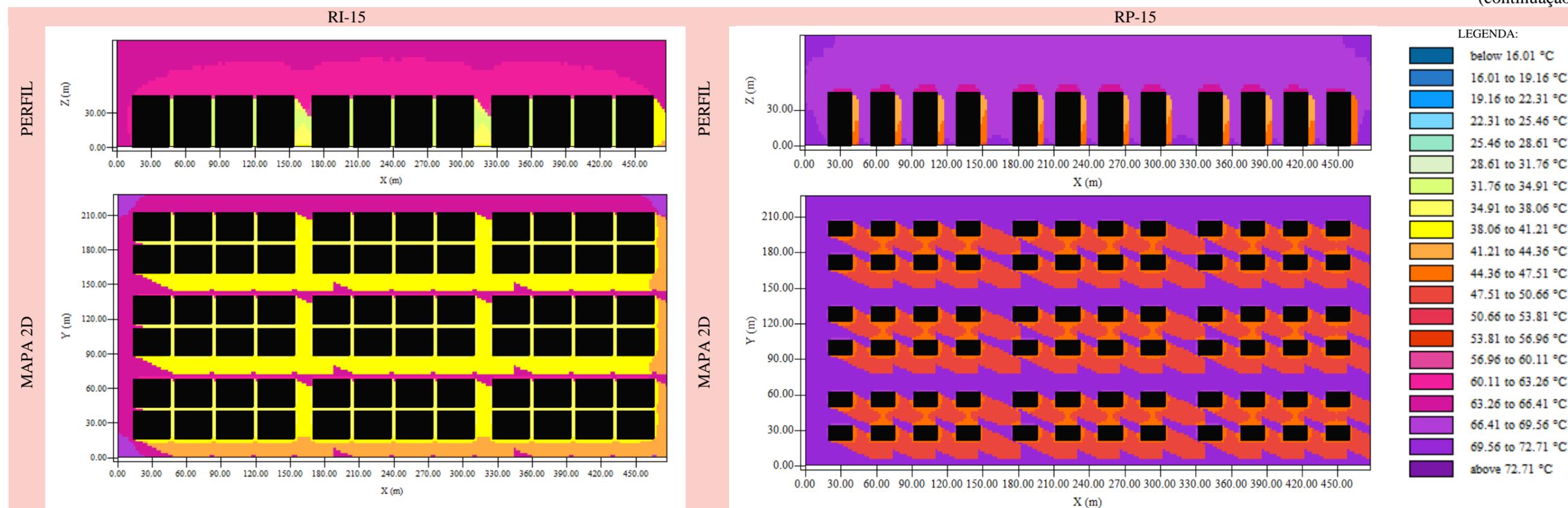
Os perfis dos modelos de incidência da ventilação perpendicular às edificações demonstraram a diferença da extensão dos bolsões de ar aquecido, na camada de mistura, entre os cenários com uso do recuo inicial e progressivo. Os resultados indicaram que nos modelos com adoção do recuo progressivo, a maior porosidade da malha urbana auxilia na dissipação do ar aquecido no interior da área urbana, por meio do fluxo de vento.

Quadro 18 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Nos mapas dos modelos com uso do recuo inicial é possível observar que, à medida que a altura das edificações aumenta, as condições térmicas no interior da malha urbano se tornam mais amenas. Já nos modelos com uso do recuo progressivo, as temperaturas radiantes permanecem em um mesmo padrão, variando entre 44,36°C a 72,71°C. O efeito do sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas favoreceu para a diminuição da temperatura radiante a nível do pedestre.

O horário das 15h possui como característica, na realidade do clima local, ser o mais quente do dia, como demonstra a Tabela 9.

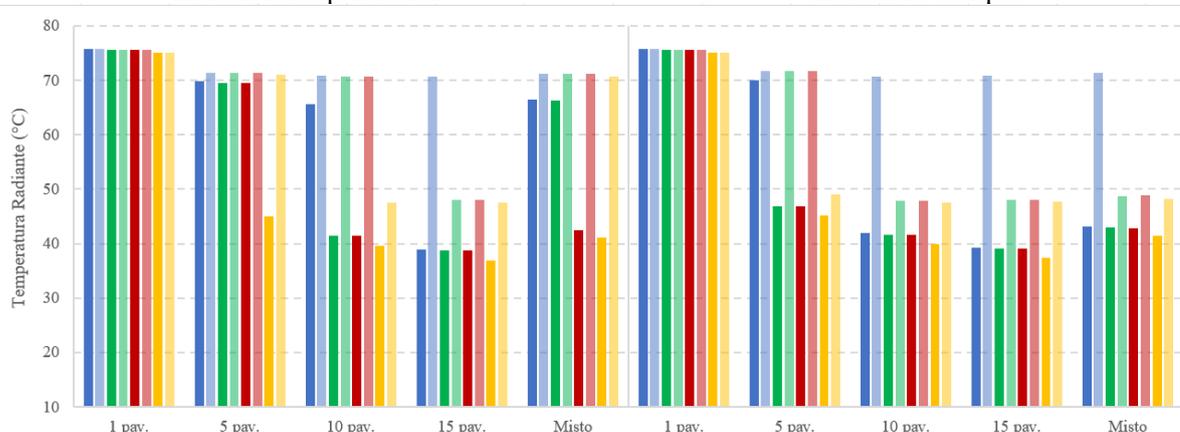
Tabela 9 – Dados de Temperatura Radiante às 15h nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto	1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto
Ponto 1	RI	75,72	69,73	65,59	38,8	66,47	75,81	69,95	41,94	39,21	43,14
	RP		71,39	70,77	70,75	71,19		71,75	70,693	70,78	71,29
Ponto 2	RI	75,60	69,52	41,49	38,72	66,26	75,65	46,93	41,68	39,06	42,89
	RP		71,33	70,65	48,04	71,14		71,69	47,915	48,09	48,73
Ponto 3	RI	75,60	69,52	41,49	38,72	42,46	75,65	46,93	41,68	39,06	42,77
	RP		71,33	70,65	48,04	71,25		71,69	47,91	48,09	48,86
Ponto 4	RI	75,12	44,94	39,64	36,93	41,08	75,03	45,19	39,84	37,31	41,42
	RP		71,07	47,55	47,58	70,70		48,99	47,505	47,65	48,23

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Ao analisar os dados das simulações computacionais dos modelos REF de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações, observou-se que o comportamento da temperatura radiante nos 4 pontos foi bastante semelhante, com diferença de até 0,1°C. Os modelos RP-15 também demonstram valores de temperatura radiante muito próximos, com uma diferença inferior a 0,5°C. Isso indica que nos cenários com edificações térreas e edificações com alta verticalização (15 pavimentos), não se observou mudança no comportamento dos pontos ao redor da quadra central. Em contrapartida, nos cenários de baixa e média verticalização (5 e 10 pavimentos, respectivamente), como também nos cenários com edificações de alturas diferentes, o comportamento se mostrou diferente.

Gráfico 5 – Dados de Temperatura Radiante às 15h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
 Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



LEGENDA:

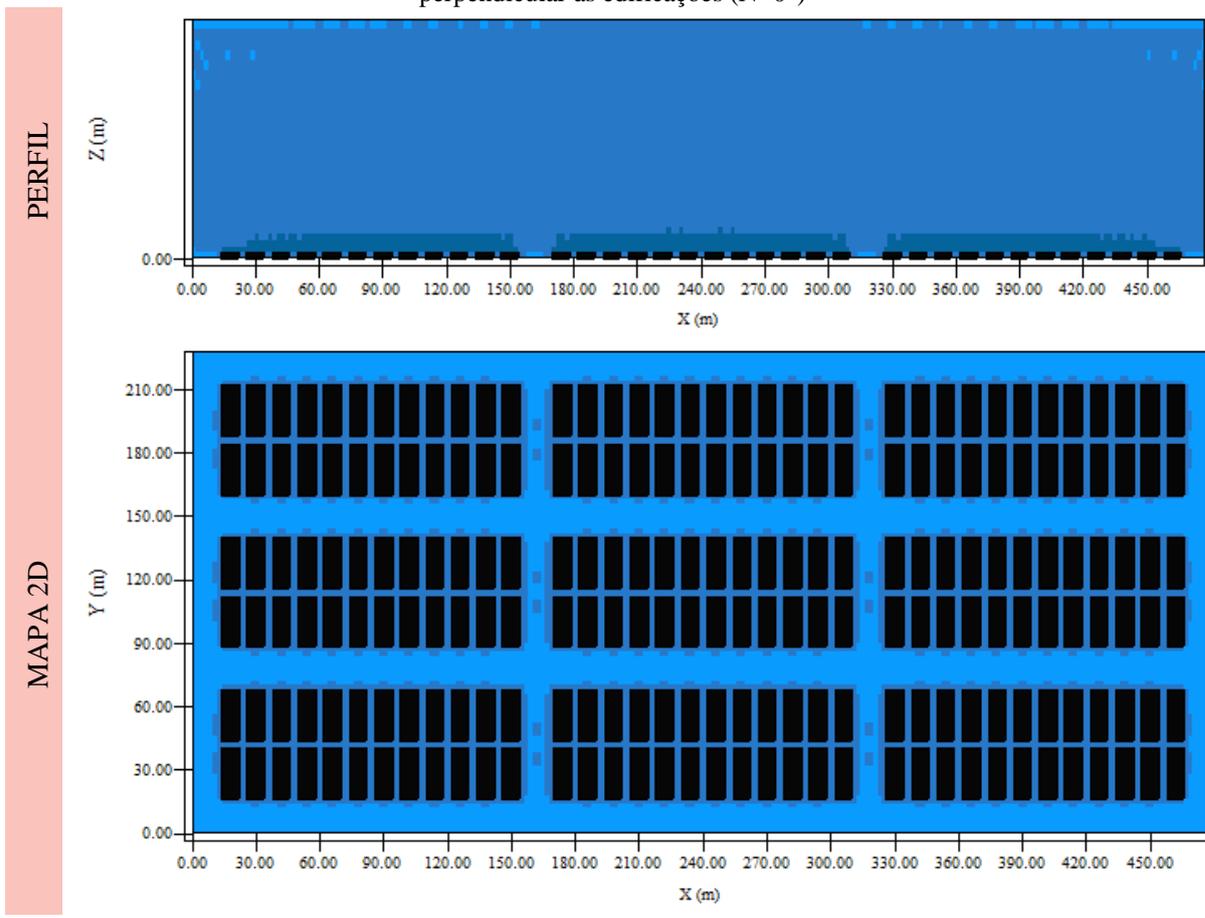
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 
- 

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

O Gráfico 5 demonstra de forma clara o comportamento da temperatura radiante entre os cenários com uso do recuo inicial e do recuo progressivo, devido ao efeito do sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas e do fator de céu visível, que diminuem a área exposta à radiação solar direta. Na análise entre as orientações de incidência da ventilação frente às edificações, a incidência oblíqua demonstrou melhor desempenho térmico.

Os Quadros 19 ao 22 apresentam o resultado do comportamento da temperatura radiante no período noturno.

Quadro 19 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, modelo REF de incidência da ventilação perpendicular às edificações (N=0°)

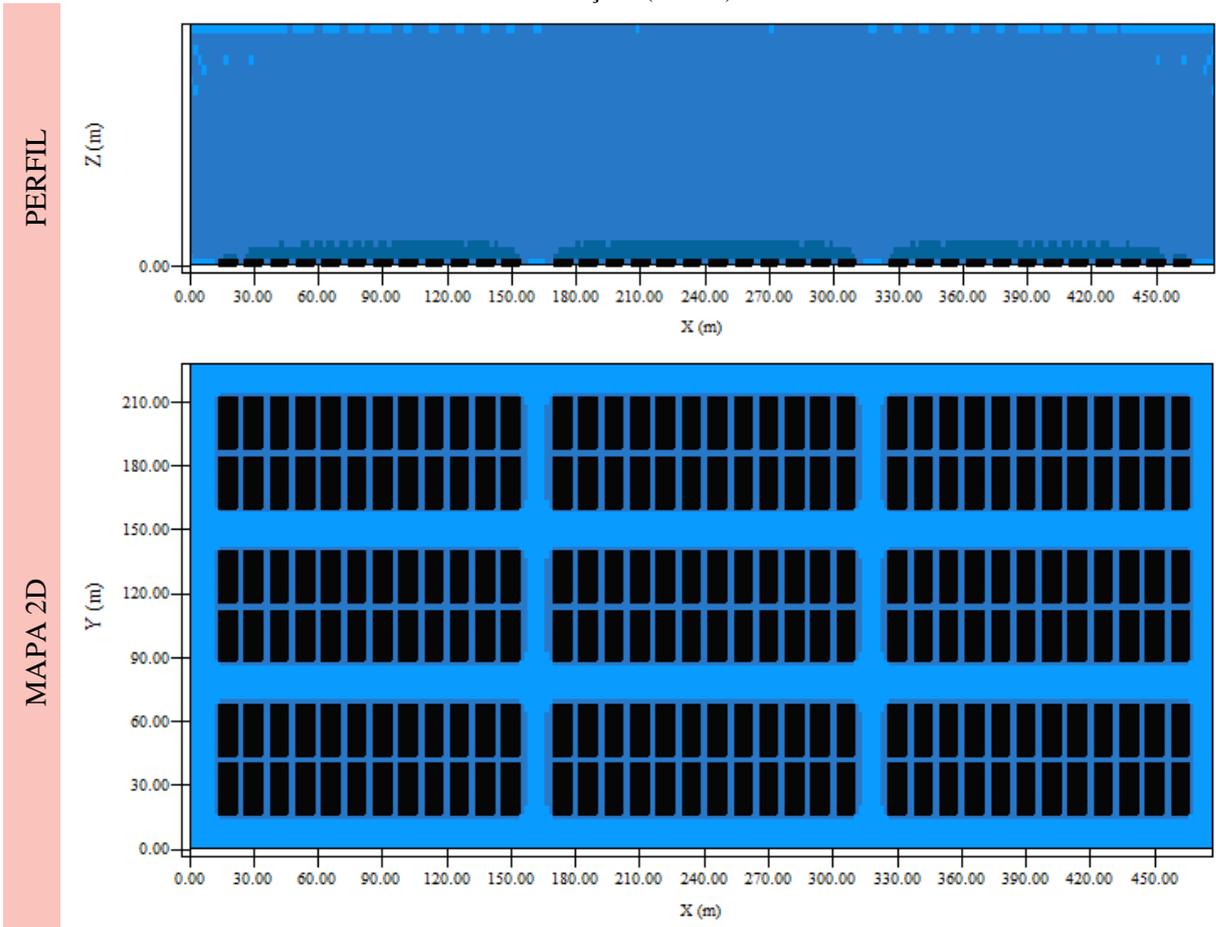


LEGENDA:

	below 16.01 °C		28.61 to 31.76 °C		44.36 to 47.51 °C		60.11 to 63.26 °C
	16.01 to 19.16 °C		31.76 to 34.91 °C		47.51 to 50.66 °C		63.26 to 66.41 °C
	19.16 to 22.31 °C		34.91 to 38.06 °C		50.66 to 53.81 °C		66.41 to 69.56 °C
	22.31 to 25.46 °C		38.06 to 41.21 °C		53.81 to 56.96 °C		69.56 to 72.71 °C
	25.46 to 28.61 °C		41.21 to 44.36 °C		56.96 to 60.11 °C		above 72.71 °C

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quadro 20 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, modelo REF de incidência da ventilação oblíqua às edificações (N=45°)

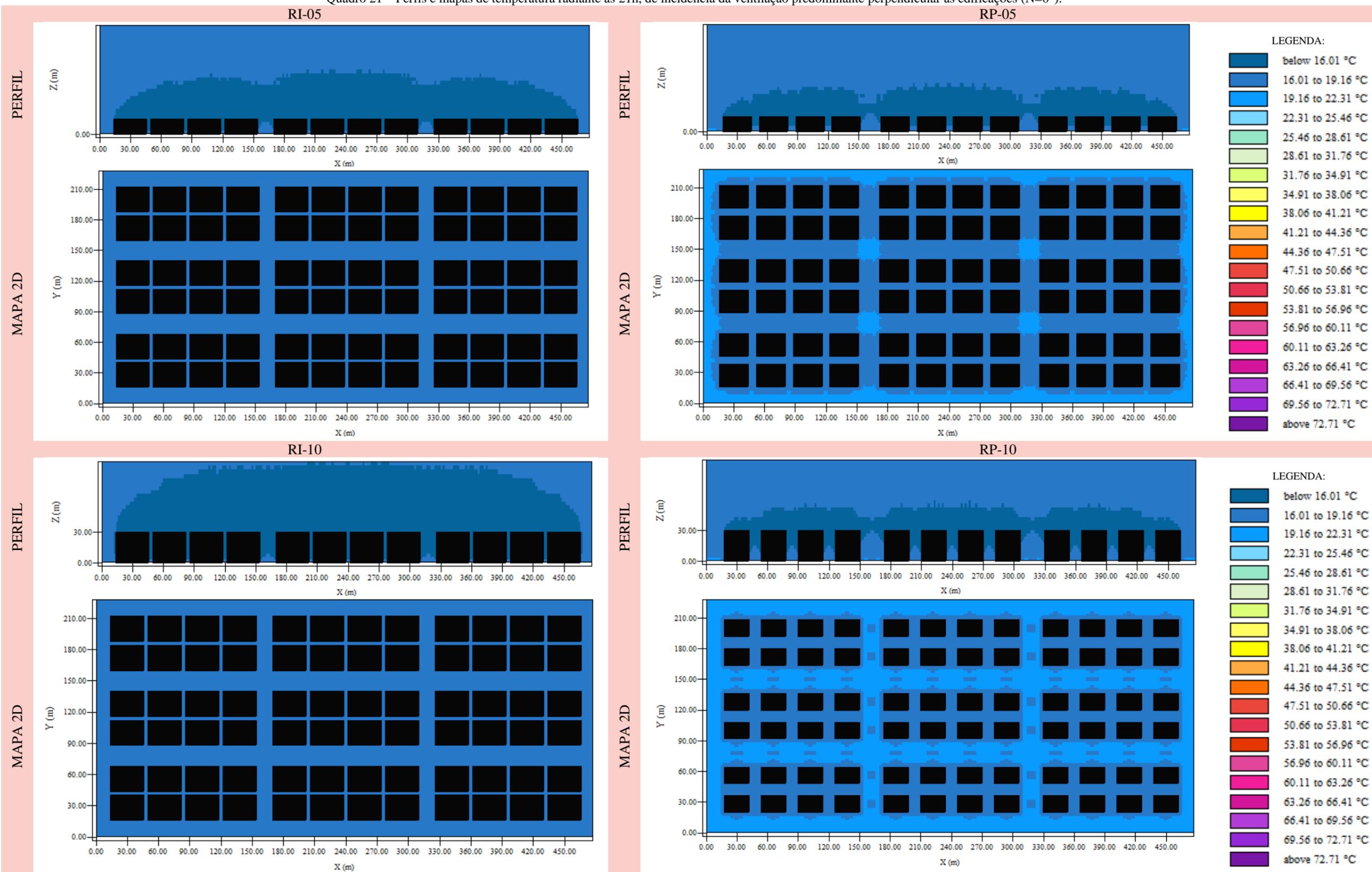


LEGENDA:

	below 16.01 °C		28.61 to 31.76 °C		44.36 to 47.51 °C		60.11 to 63.26 °C
	16.01 to 19.16 °C		31.76 to 34.91 °C		47.51 to 50.66 °C		63.26 to 66.41 °C
	19.16 to 22.31 °C		34.91 to 38.06 °C		50.66 to 53.81 °C		66.41 to 69.56 °C
	22.31 to 25.46 °C		38.06 to 41.21 °C		53.81 to 56.96 °C		69.56 to 72.71 °C
	25.46 to 28.61 °C		41.21 to 44.36 °C		56.96 to 60.11 °C		above 72.71 °C

Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quadro 21 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



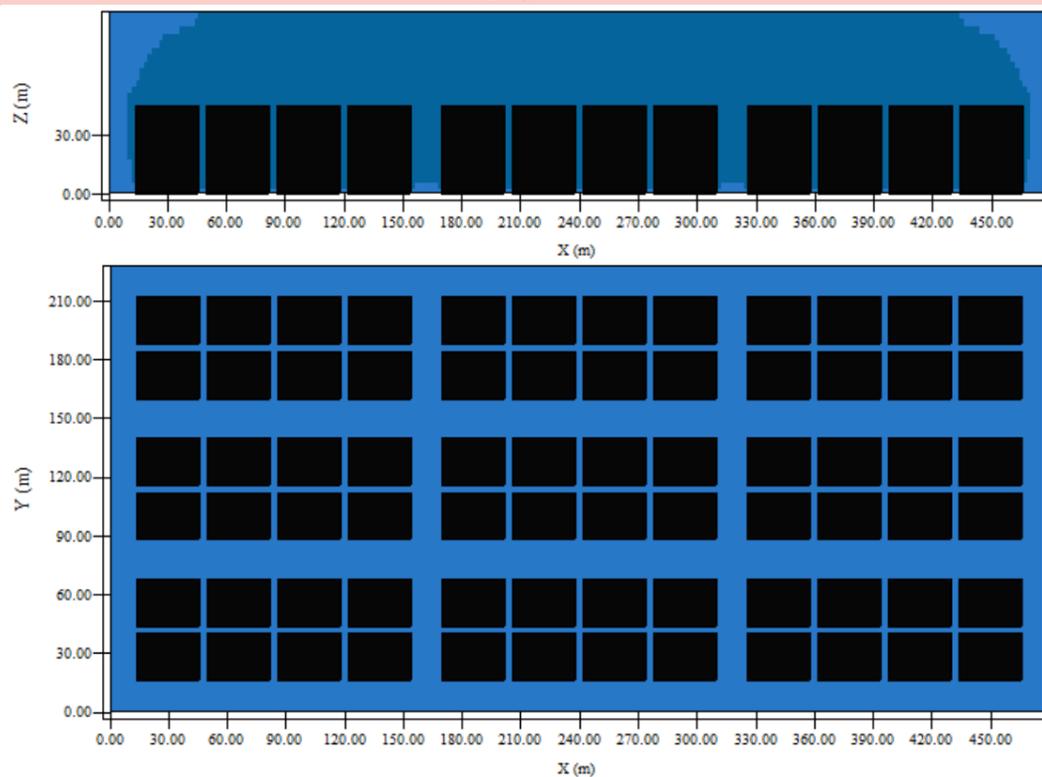
(continua)

(continuação)

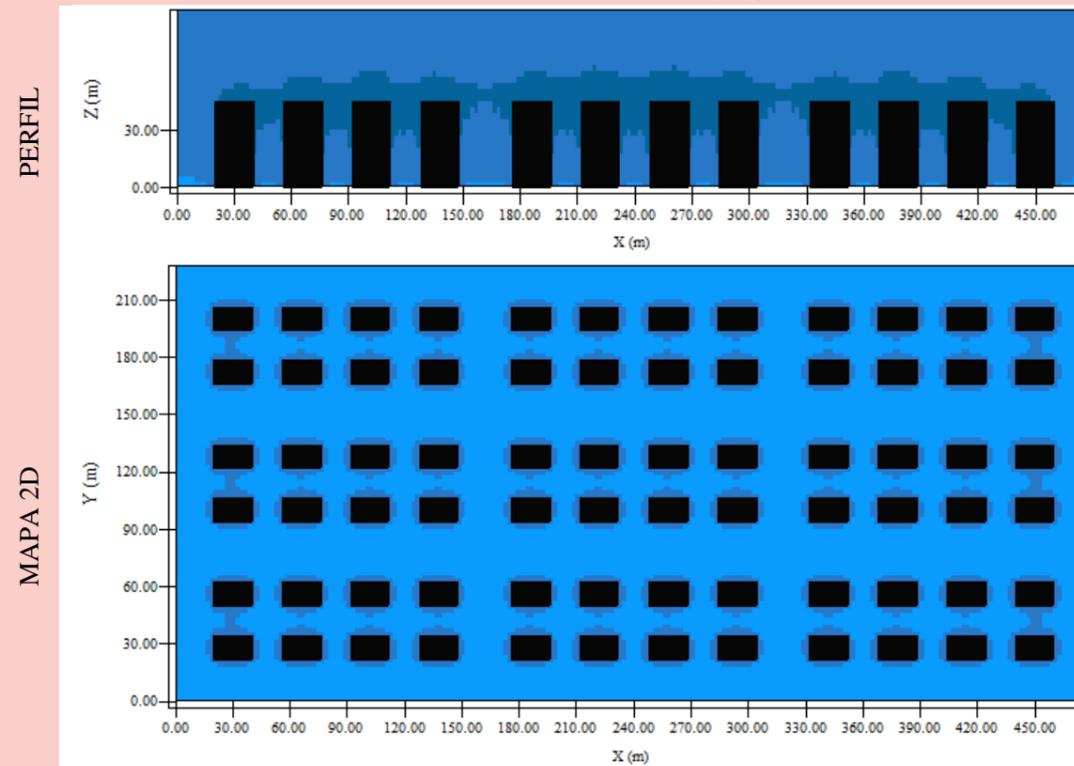
PERFIL

MAPA 2D

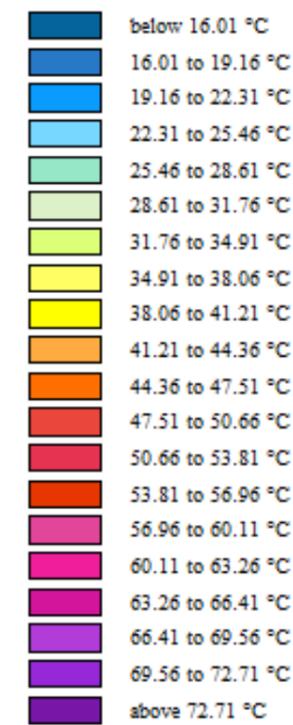
RI-15



RP-15

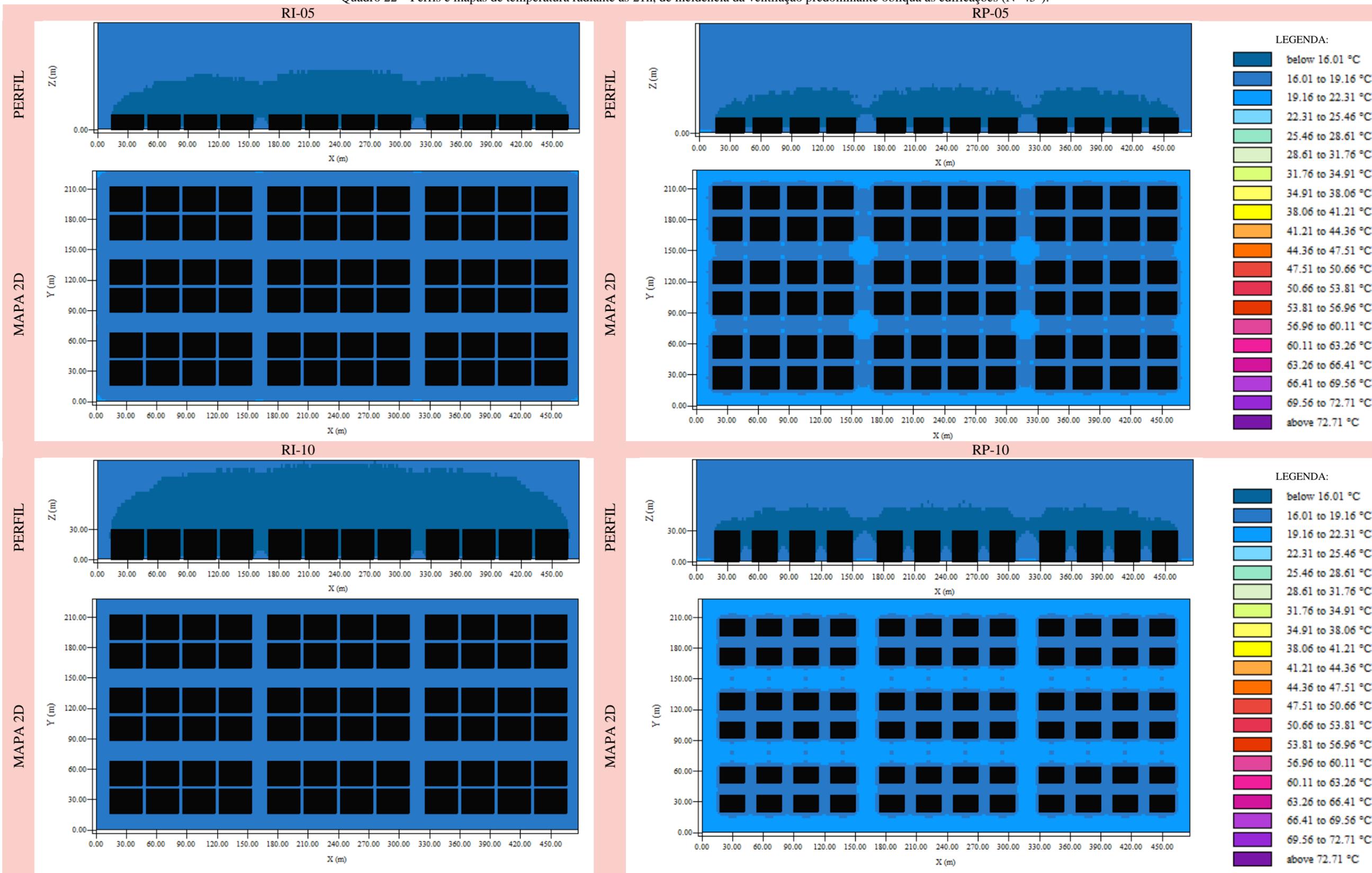


LEGENDA:



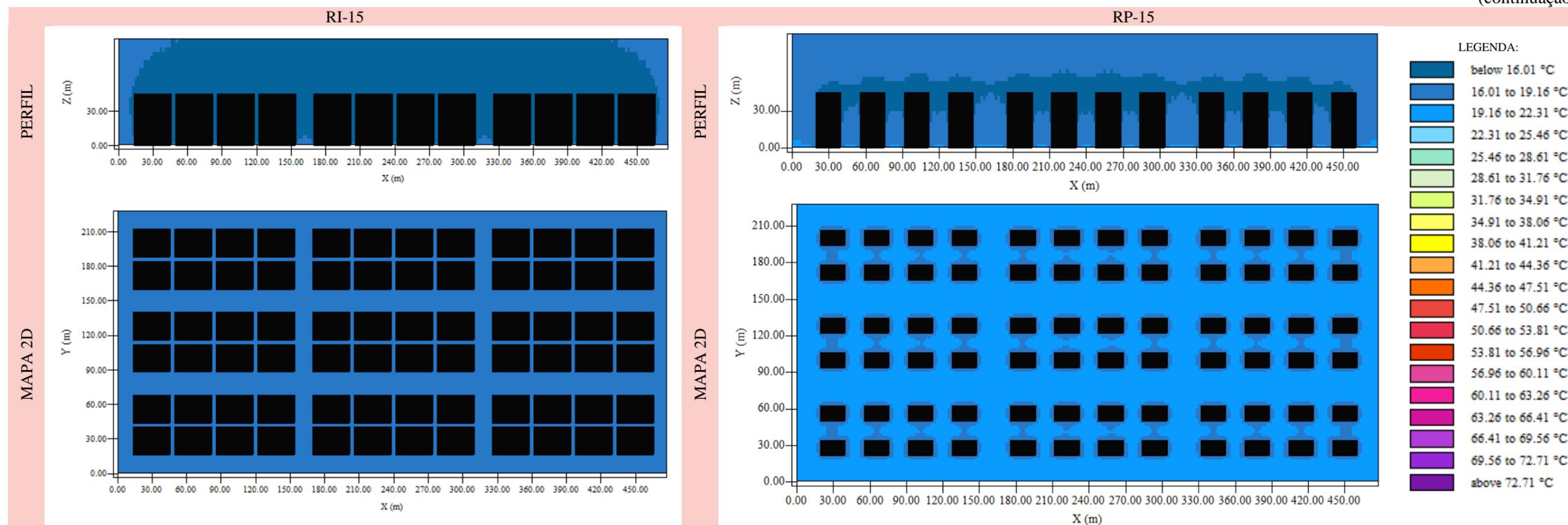
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quadro 22 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A partir da análise dos perfis e mapas, em ambos os sentidos de incidência, é possível observar que nos cenários com edificações de 1 pavimento e nos cenários verticalizados com o uso do recuo progressivo a temperatura radiante varia entre 19,16°C a 22,31°C, enquanto nos cenários verticalizados com uso do recuo inicial a temperatura radiante está abaixo de 16,01°C.

Para compreender esse resultado é preciso considerar que a ilha de calor é um fenômeno noturno, pois corresponde ao momento em que a energia absorvida, da radiação solar incidente, pela massa edificada é emitida em forma de calor. Desta forma, como o solo, dos cenários de 1 pavimento e nos verticalizados com o uso do recuo progressivo, ficou mais exposto à radiação solar direta, presume-se que absorvam mais energia. Nos perfis dos cenários com edificações verticalizadas é possível observar um dos efeitos ocasionados pelo cânion urbano, em que a radiação de onda longa fica aprisionada dentro do cânion, desacelerando o resfriamento noturno da superfície urbana (GIVONI, 1988).

A Tabela 10 demonstra os resultados obtidos no horário das 21h:

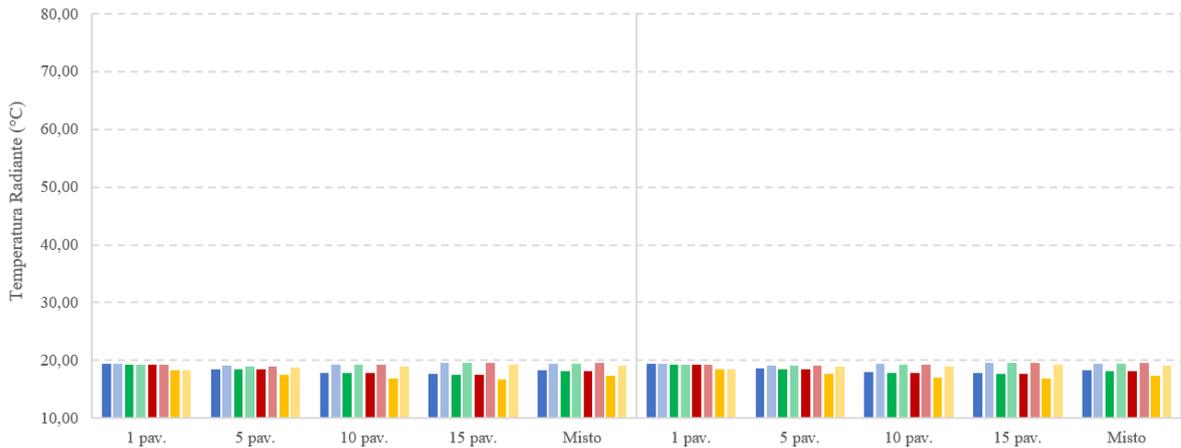
Tabela 10 – Dados de Temperatura Radiante às 21h nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1	5	10	15	Misto	1	5	10	15	Misto
		pav.	pav.	pav.	pav.		pav.	pav.	pav.	pav.	
Ponto 1	RI	19,41	18,52	17,87	17,66	18,22	19,42	18,63	17,99	17,77	18,27
			19,05	19,32	19,63	19,48	19,42	19,12	19,36	19,60	19,47
Ponto 2	RI	19,18	18,41	17,75	17,56	18,11	19,22	18,52	17,88	17,67	18,16
			19,00	19,21	19,58	19,42	19,22	19,06	19,26	19,55	19,41
Ponto 3	RI	19,18	18,41	17,75	17,56	18,10	19,22	18,52	17,88	17,67	18,16
			19,00	19,21	19,58	19,53	19,22	19,06	19,26	19,55	19,52
Ponto 4	RI	18,30	17,56	16,91	16,76	17,32	18,46	17,67	17,03	16,88	17,37
			18,81	18,95	19,26	19,11	18,46	18,88	19,00	19,23	19,10

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Para análise dos cenários urbanos hipotéticos no período noturno é importante ressaltar que a temperatura radiante é a temperatura que a superfície emite em forma da radiação proveniente do calor absorvido da radiação solar. Diante disso, no horário das 21h, o comportamento da temperatura radiante é semelhante entre os modelos e com valores mais baixos, pois não há radiação para esquentar as superfícies e as mesmas emitirem o calor absorvido.

Gráfico 6 – Dados de Temperatura Radiante às 21h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



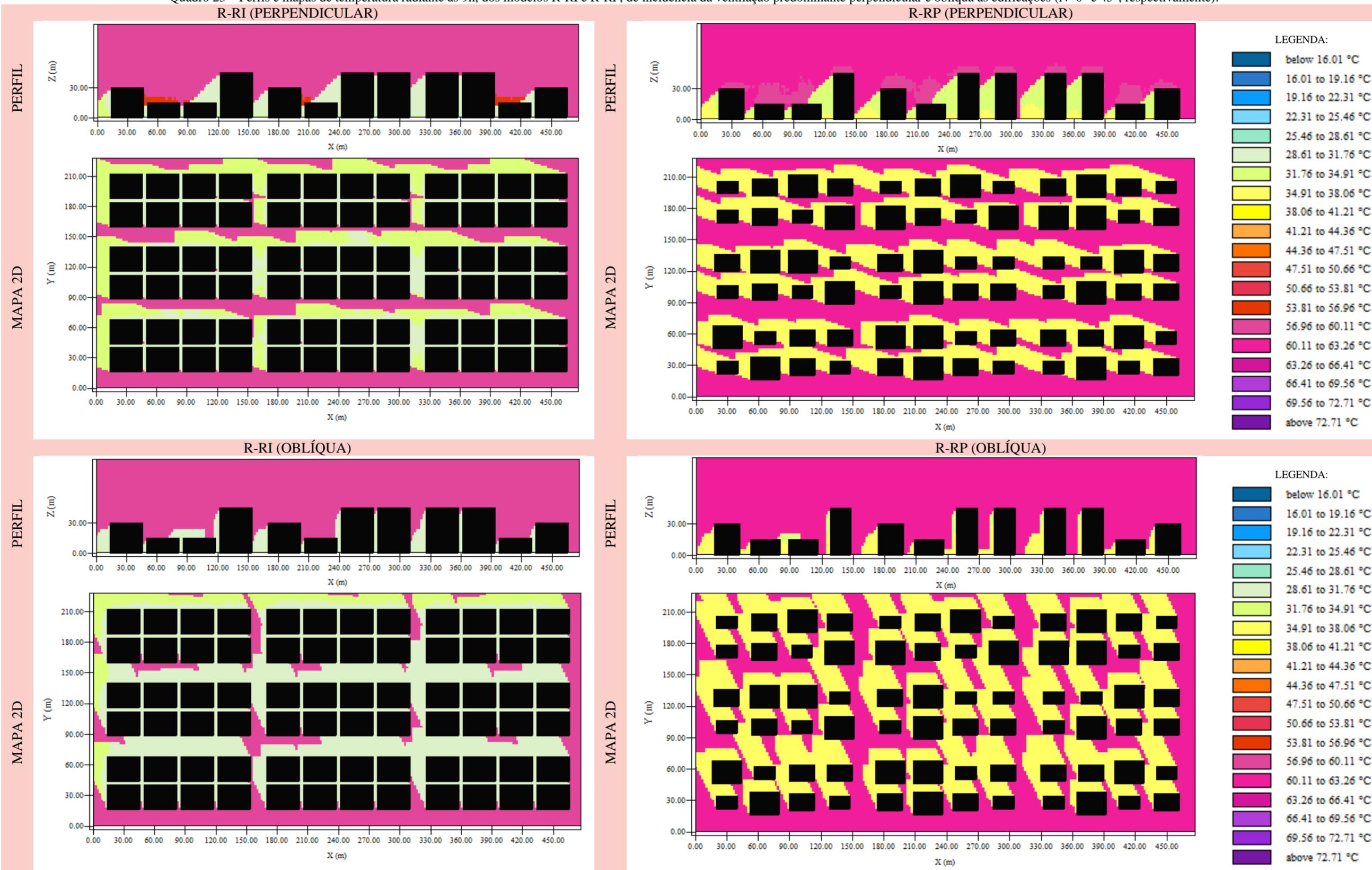
LEGENDA:

- 
 P1 - RI
 - 
 P1 - RP
 - 
 P2 - RI
 - 
 P2 - RP
 - 
 P3 - RI
 - 
 P3 - RP
 - 
 P4 - RI
 - 
 P4 - RP
 

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Os Quadros 23, 24 e 25 apresentam o comportamento da temperatura radiante sob o conceito da rugosidade, com os cenários urbanos hipotéticos compostos por edificações de diferentes alturas, com o uso do recuo inicial e progressivo. Os resultados estão apresentados nos horários de 9h, 15h e 21h.

Quadro 23 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 9h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



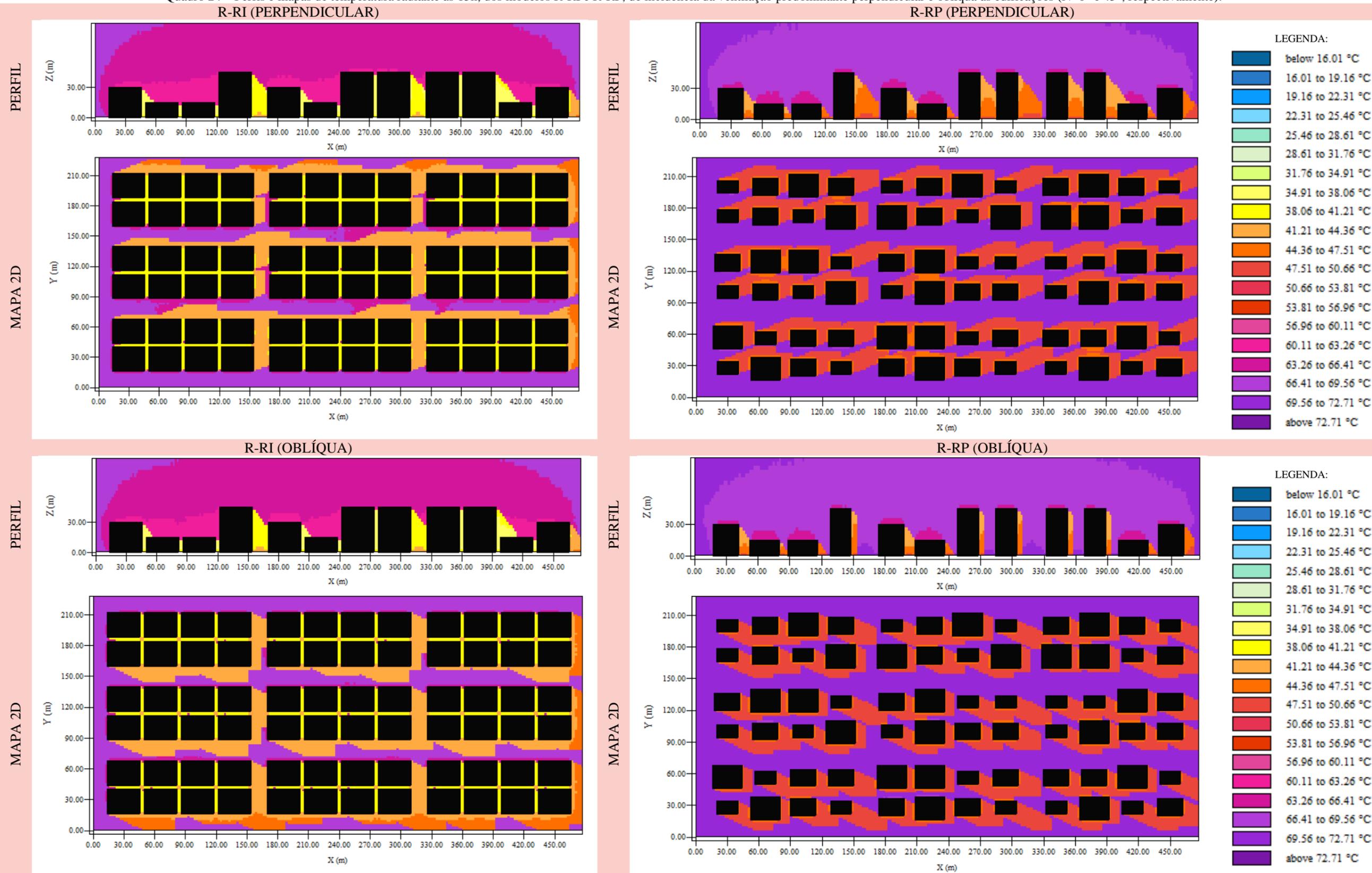
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Em relação à rugosidade da malha urbana, o efeito do sombreamento continua sendo um ponto de importante relevância no que tange o conforto térmico a nível do pedestre. Nos cenários de incidência da ventilação perpendicular às edificações com uso do recuo inicial, a temperatura radiante apresenta valores que variam entre 28,61°C a 31,76°C na camada intra-urbana. Enquanto nos cenários com o uso do recuo progressivo, varia entre 38,06°C a 41,21°C.

Nos cenários de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, a área de influência da sombra gerada pelas edificações verticalizadas diminui, mas enquanto nos cenários com uso do recuo inicial a temperatura radiante varia entre 28,61°C a 31,76°C e 56,96°C a 60,11°C dentro da camada intra-urbana, nos cenários com uso do recuo progressivo a temperatura varia entre 38,06°C a 41,21°C e 60,11°C a 63,26°C. Desta forma, em relação à temperatura radiante, os modelos com incidência perpendicular apresentaram melhores resultados.

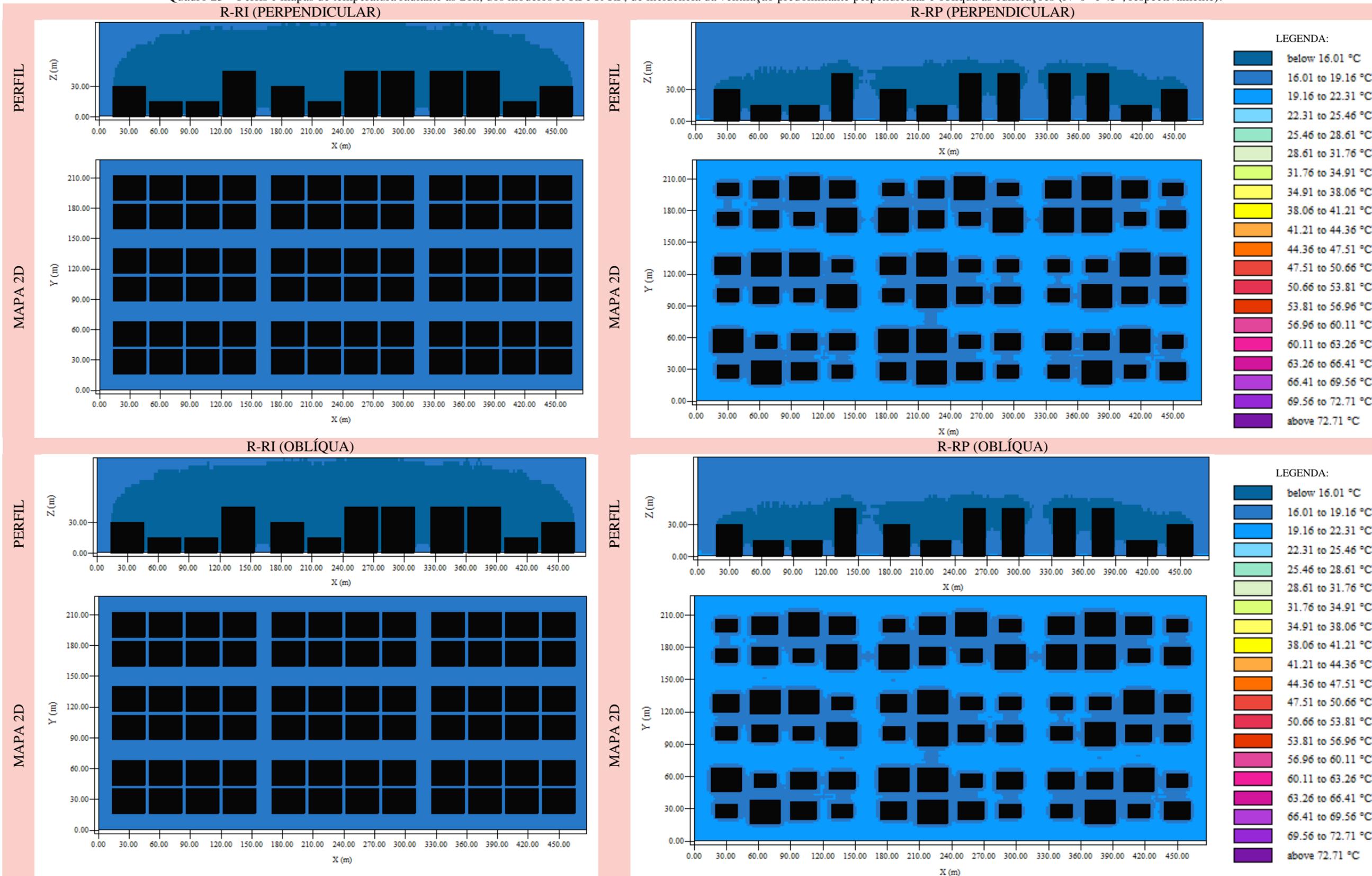
Os Quadros 24 e 25 apresentam os resultados obtidos dos cenários urbanos simulados às 15h e 21h:

Quadro 24 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quadro 25 – Perfis e mapas de temperatura radiante às 21h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

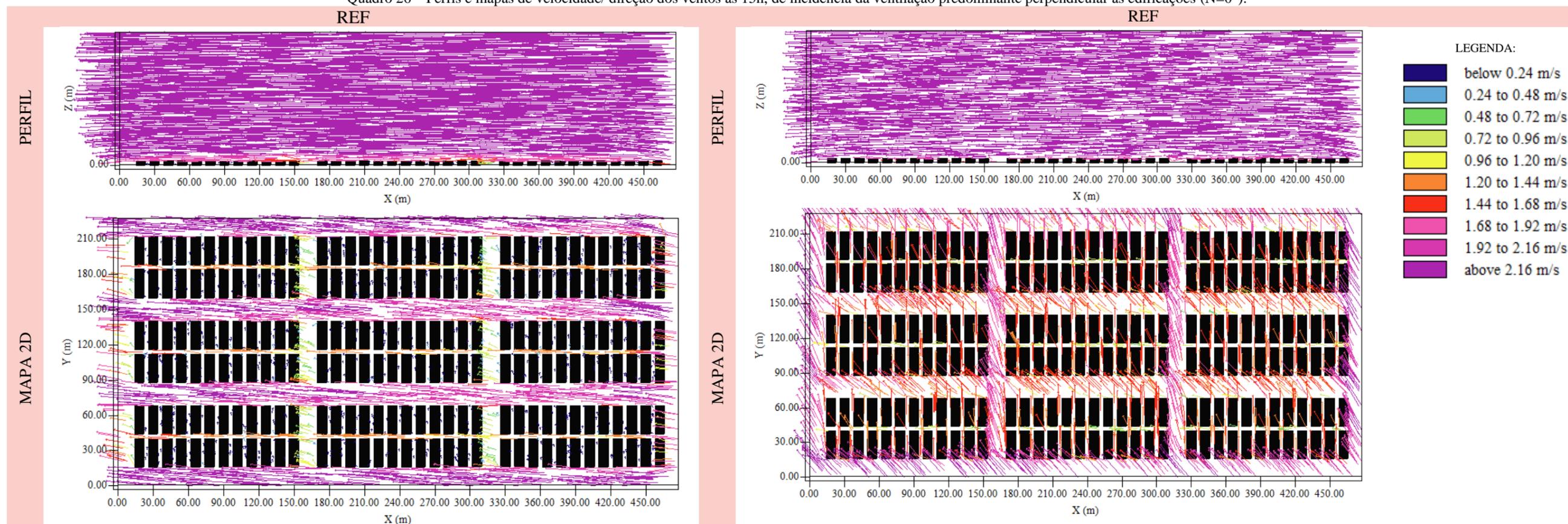
No período que equivale às 15h, horário mais quente do dia, o comportamento da temperatura radiante não se distancia do que fora observado no período da manhã, salvo apenas as temperaturas mais elevadas. E os cenários com incidência perpendicular e sem o uso do recuo progressivo ainda apresentam os melhores resultados.

Às 21h, no caso de incidência da ventilação perpendicular às edificações, os cenários com uso do recuo inicial apresentam melhores condições de conforto térmico a nível do pedestre, e o mesmo ocorre no caso de incidência da ventilação oblíqua às edificações. Entre ambas as situações, o resultado se mostra semelhante, sem diferenças relevantes.

### **4.3 Análise do desempenho dos cenários quanto à ventilação natural**

Durante o tratamento dos dados de velocidade dos ventos, não foi possível perceber significativa diferença ao longo do dia (ver Apêndice A), pois o vento se apresenta de maneira constante no programa. Assim, para análise dos perfis e mapas dos modelos simulados foi considerado o horário que corresponde às 15h, por ser o período mais quente do dia, em cidade de clima semiárido.

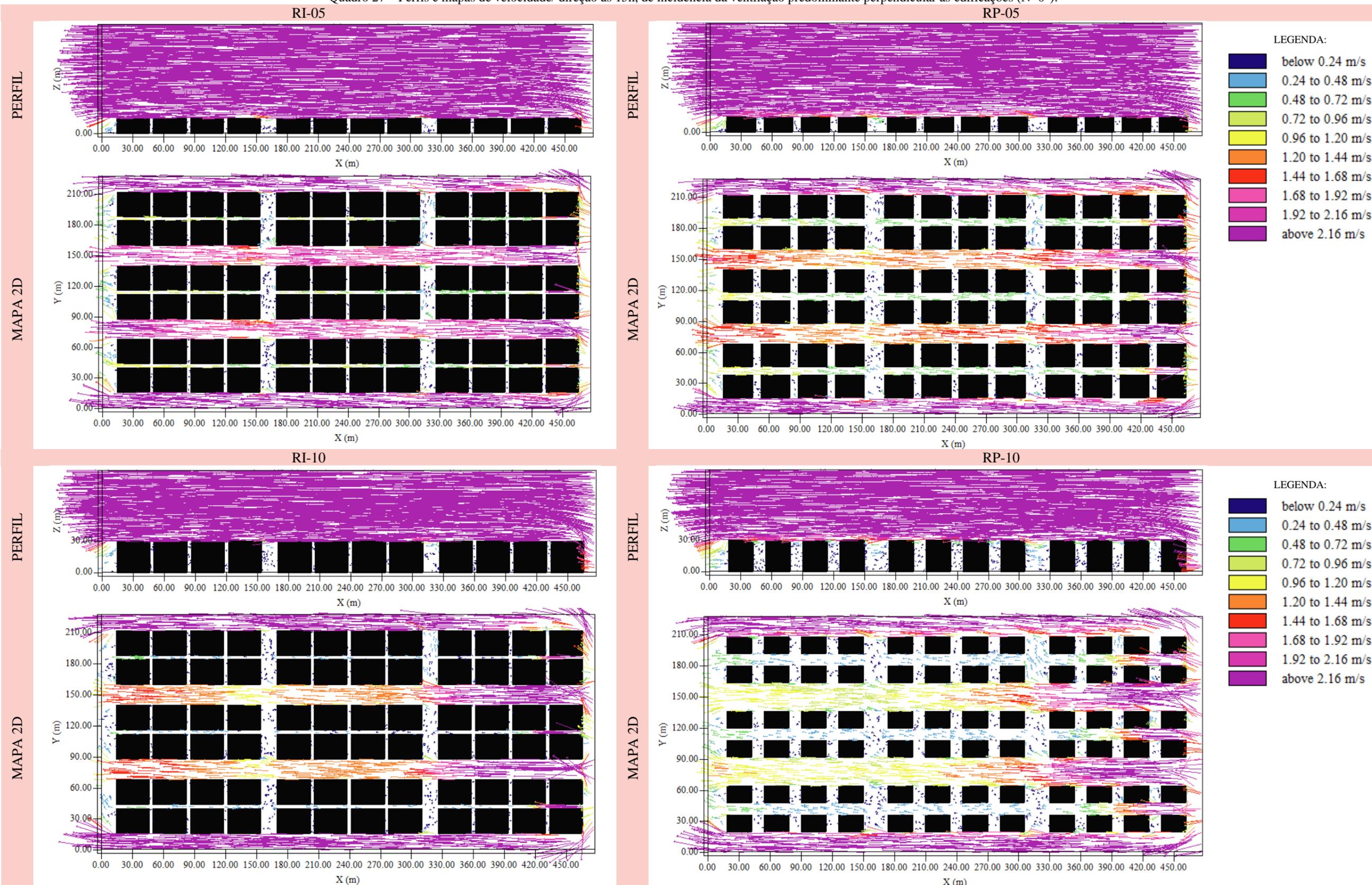
Quadro 26 – Perfis e mapas de velocidade/ direção dos ventos às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

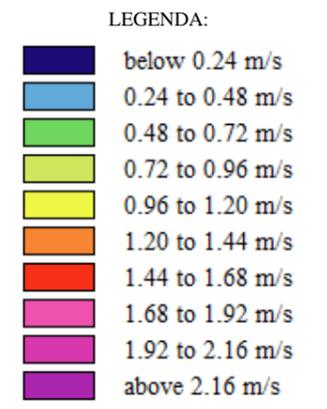
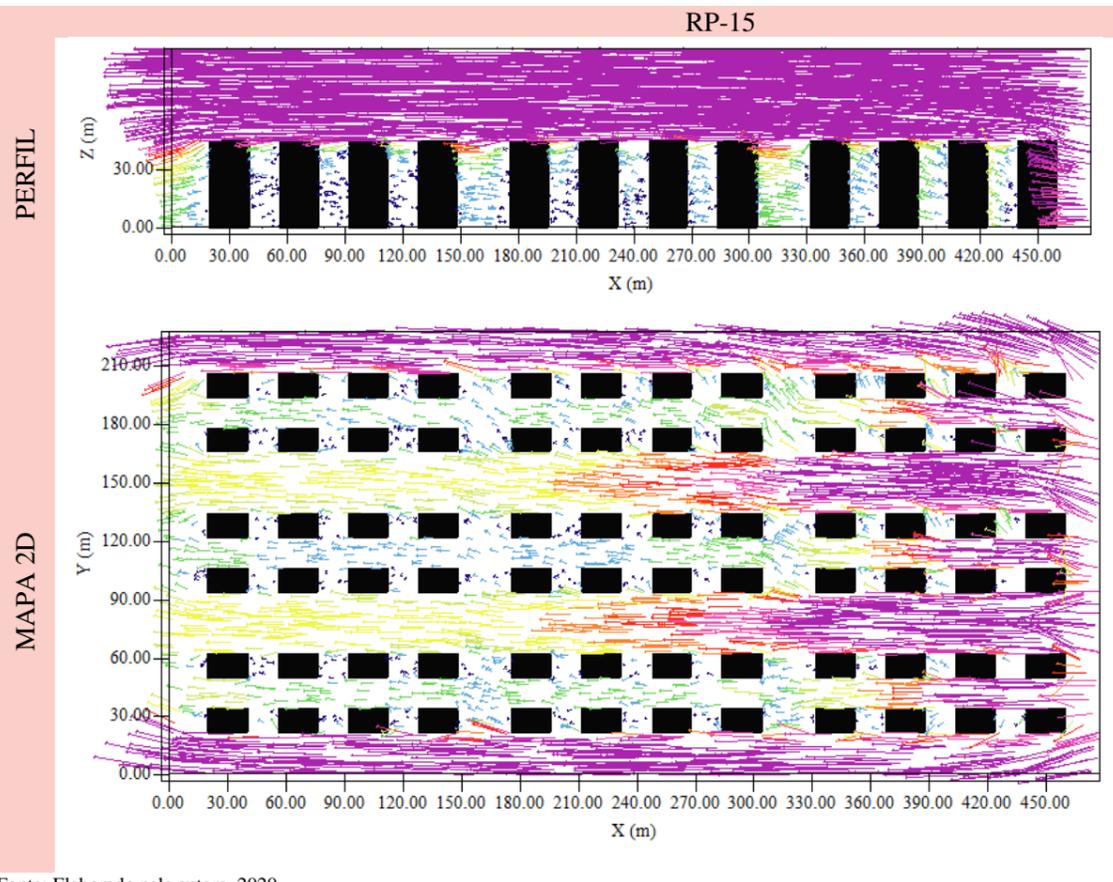
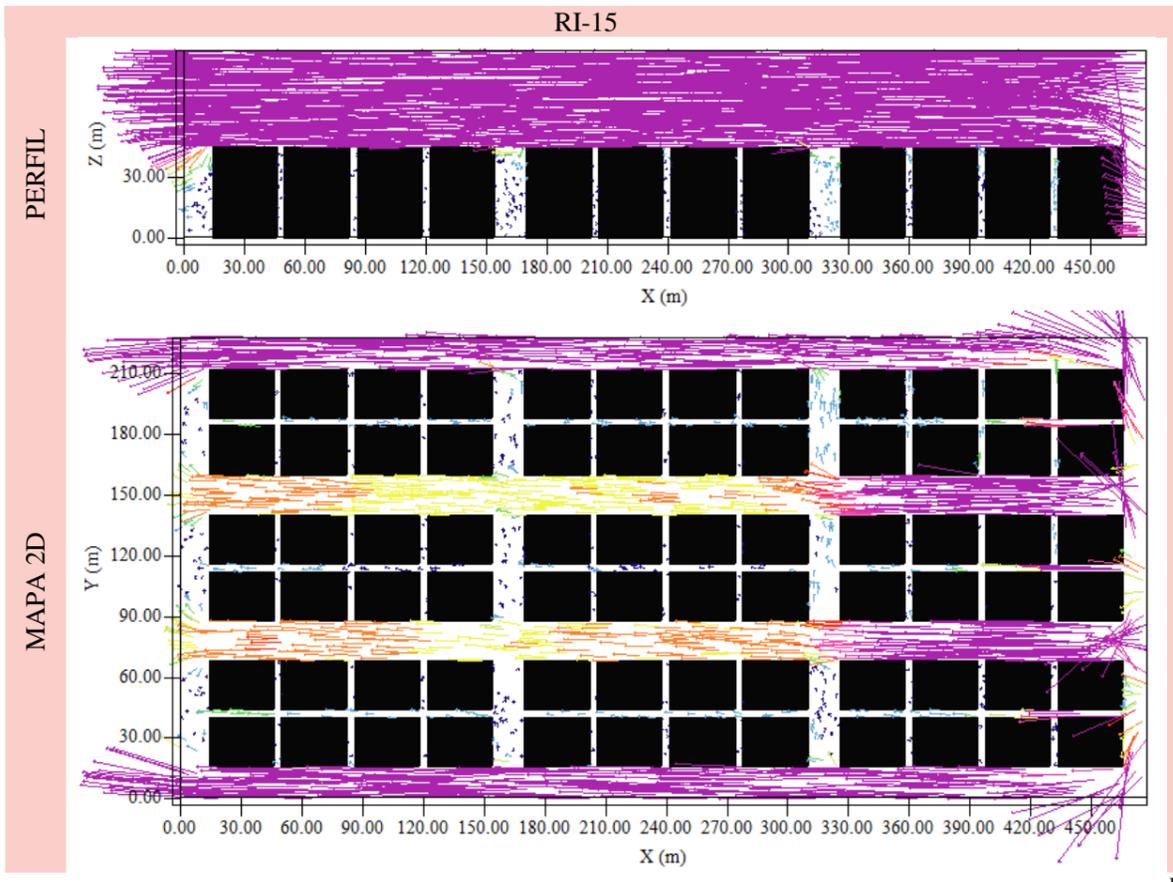
Nos perfis, percebe-se que na camada intra-urbana ocorre a diminuição da velocidade dos ventos, todavia, como as edificações apresentam a mesma altura, o perfil vertical do vento não se altera de maneira significativa. Nos mapas dos cenários urbanos hipotéticos de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações, a baixa porosidade da malha urbana acarreta a canalização dos ventos nas vias de circulação com eixo Leste-Oeste, que gera o aumento da velocidade dos ventos. Com o aumento da velocidade dos ventos, nas vias perpendiculares à direção predominante da ventilação natural ocorre a formação de áreas de estagnação de ar, e a sotavento das edificações é possível observar sombras de ventilação. Contudo, nos cenários mais verticalizados e com o uso do recuo progressivo, nota-se a melhora na permeabilidade dos ventos na malha urbana, devido ao aumento da porosidade da mesma.

Quadro 27 – Perfis e mapas de velocidade/ direção às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



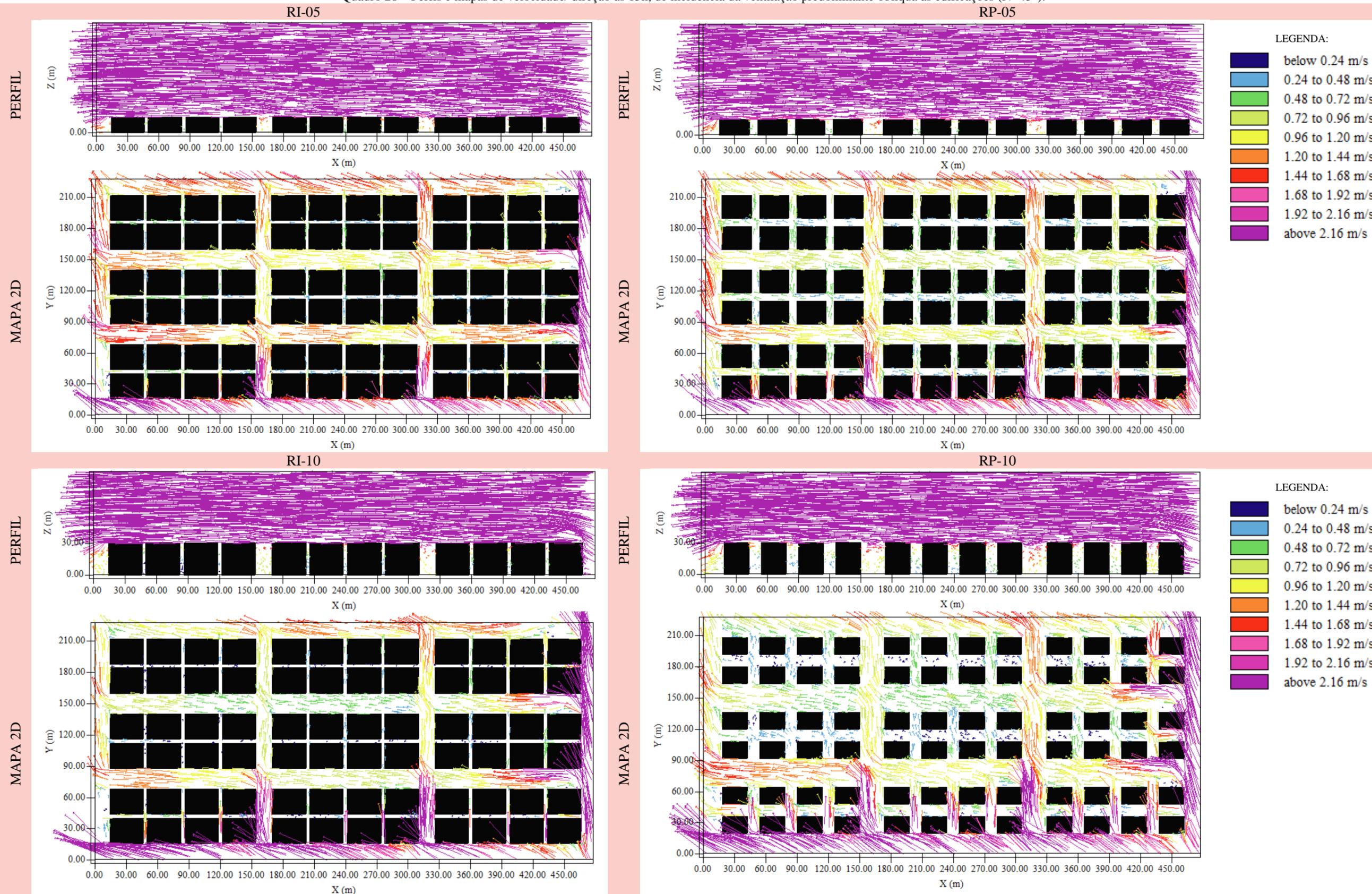
(continua)

(continuação)



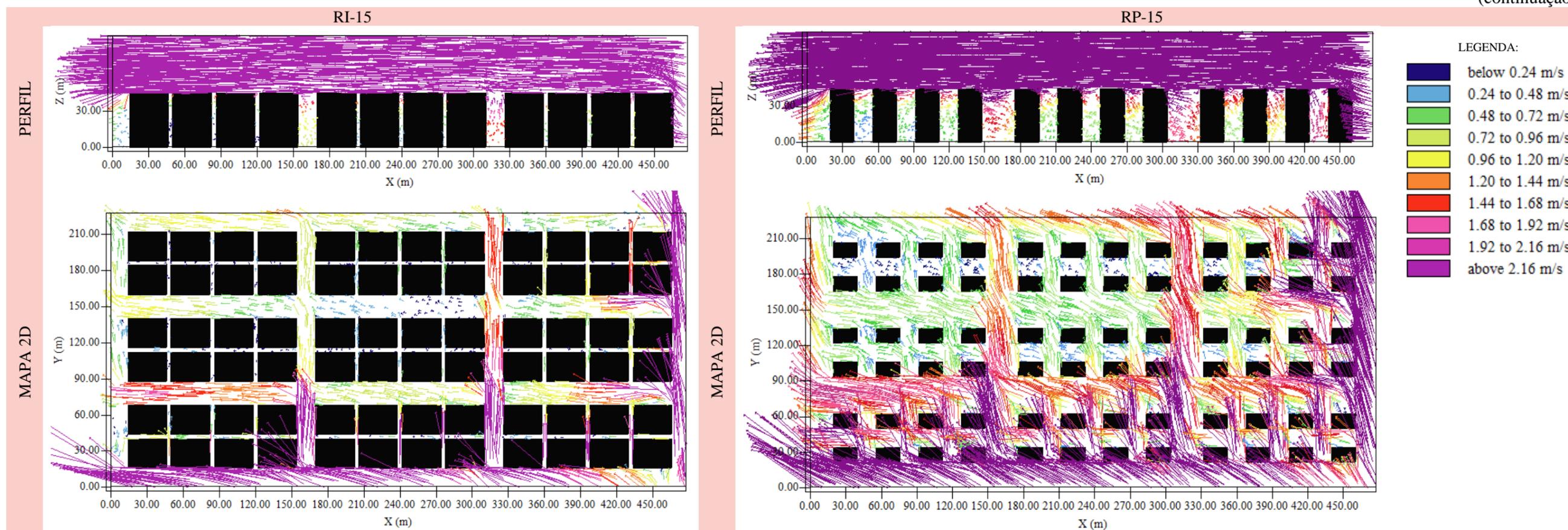
Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Quadro 28 – Perfis e mapas de velocidade/ direção às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)

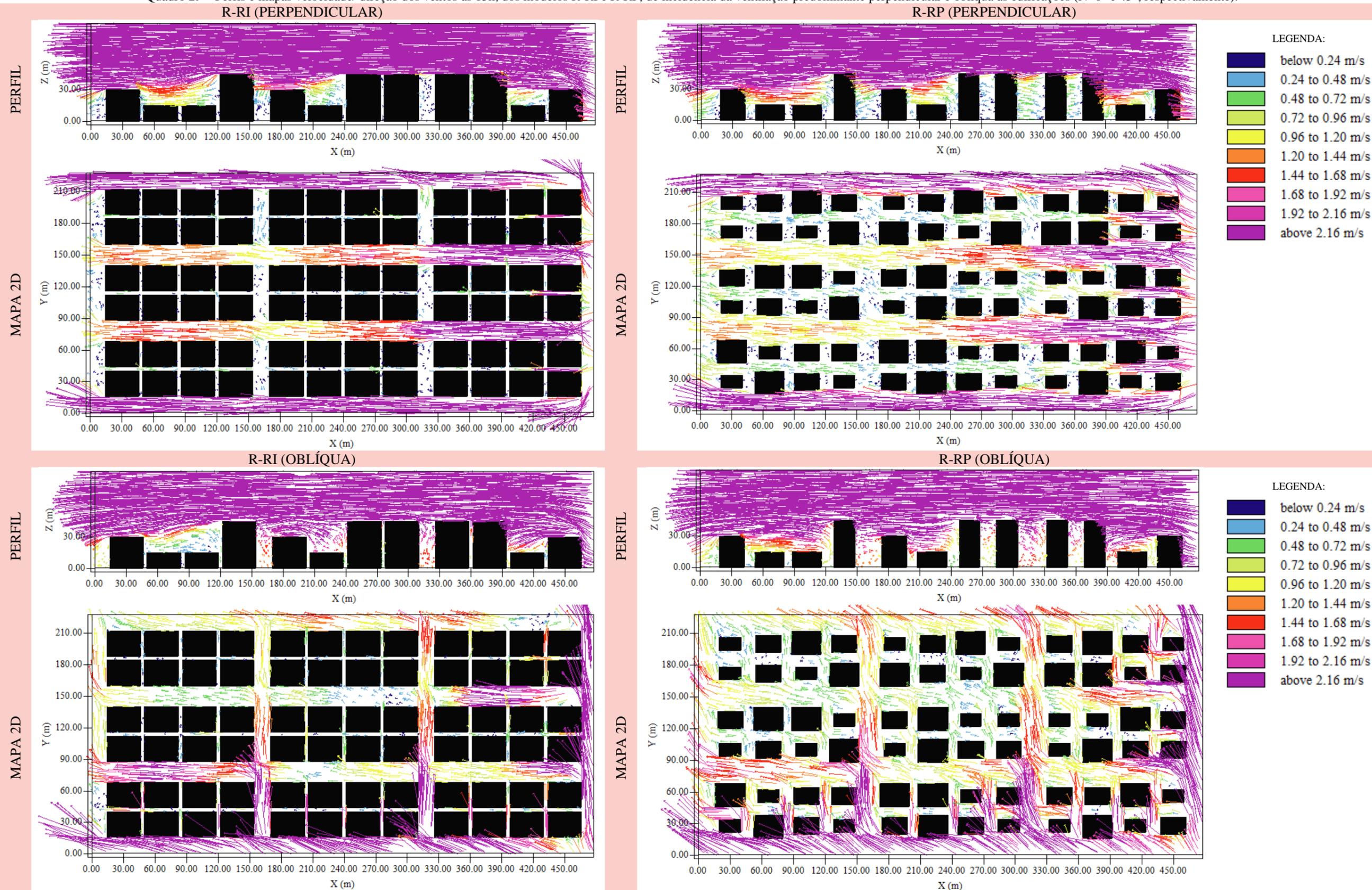


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Nos mapas dos cenários de incidência da ventilação oblíqua às edificações, é possível observar uma melhor distribuição dos fluxos de ar. Os cenários com uso do recuo inicial e progressivo não apresentam o efeito da canalização dos ventos nas vias com eixo Leste-Oeste há menos presença de sombra de vento. Observa-se, também, que na aplicação do recuo progressivo a porosidade proporciona uma melhora no fluxo dos ventos na malha urbana.

Quanto à rugosidade, o Quadro 29 demonstra os resultados obtidos:

Quadro 29 – Perfis e mapas velocidade/ direção dos ventos às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Nos cenários de incidência da ventilação perpendicular às edificações é possível observar a canalização das vias paralelas à direção predominante dos ventos, e no modelo com uso do recuo inicial, as vias perpendiculares apresentam sombra de vento. Contudo, no cenário com uso do recuo progressivo a velocidade do vento diminui substancialmente nas vias paralelas à direção predominante dos ventos e as áreas com sombra de vento diminuem.

Os ventos nos modelos simulados com incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações apresentam valores de velocidade que variam entre 1,20 m/s a acima de 2,16 m/s, o que indica melhores condições de permeabilidade dos ventos na malha urbana. Vale ressaltar que esses valores são encontrados nas vias paralelas ao sentido longitudinal das quadras, o que não acontece nos cenários de incidência perpendicular. Nos cenários com uso do recuo progressivo esse efeito é potencializado, e as áreas de sombra de vento são reduzidas.

A Tabela 11 apresenta os dados da média da velocidade dos ventos nos 4 pontos do interior da quadra central dos 18 modelos simulados. Para análise com base na porosidade foram considerados os cenários de 1, 5 10 e 15 pavimentos com uso do recuo inicial do recuo progressivo, já a análise com base na rugosidade, deu-se com os modelos mistos, com uso do recuo inicial do recuo progressivo, ambas as situações sob a orientação do norte igual a 0° e 45°.

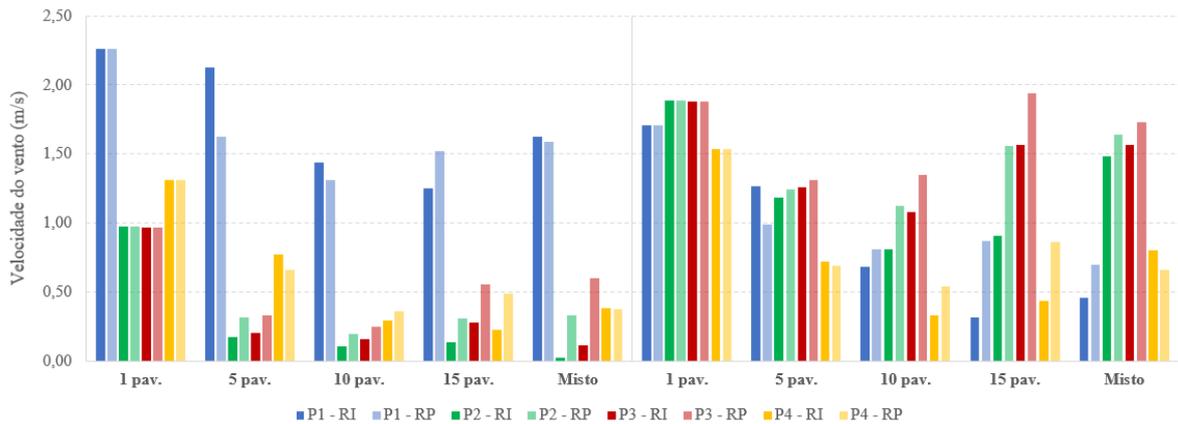
Tabela 11 – Dados da velocidade dos ventos às 15h, nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto	1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto
Ponto 1	RI	2.26	2.13	1.44	1.25	1.63	1.71	1.27	0.68	0.32	0.45
	RP		1.63	1.31	1.52	1.59		0.99	0.81	1.52	0.70
Ponto 2	RI	0.98	0.17	0.10	0.13	0.02	1.88	1.18	0.81	0.91	1.48
	RP		0.31	0.20	0.31	0.33		1.24	1.12	0.31	1.64
Ponto 3	RI	0.97	0.20	0.16	0.28	0.11	1.88	1.26	1.08	1.57	1.57
	RP		0.33	0.24	0.55	0.60		1.31	1.35	0.55	1.73
Ponto 4	RI	1.31	0.77	0.29	0.23	0.38	1.54	0.72	0.33	0.43	0.80
	RP		0.66	0.36	0.48	0.37		0.69	0.54	0.48	0.66

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

É possível observar que a orientação das quadras no sentido da perpendicular à incidência dos ventos predominantes proporciona distribuição irregular da ventilação na malha urbana, uma vez que o orientação dos prédios proporciona a canalização dos ventos nas vias paralelas à incidência dos ventos e atua como barreira à ventilação nas vias perpendiculares, reduzindo significativamente a velocidade dos ventos nestes pontos no nível do pedestre, ver Gráfico 7.

Gráfico 7 – Dados de velocidade dos ventos às 15h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



LEGENDA:

■ P1 - RI ■ P1 - RP ■ P2 - RI ■ P2 - RP ■ P3 - RI ■ P3 - RP ■ P4 - RI ■ P4 - RP

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Em relação ao uso do recuo progressivo nos modelos simulados, o ponto 02, a sotavento da quadra, e o ponto 03, a barlavento da quadra, demonstraram os melhores resultados, o que indicou melhor grau de porosidade. Contudo, os pontos 01, paralelo à quadra, e o ponto 04, interno à quadra, apresentam variações entre os cenários com e sem o uso do recuo progressivo. Isso se deve à canalização dos ventos na via principal, onde está situado o ponto 01, e no espaço que configura os recuos posteriores entre as edificações, onde está situado o ponto 04. Nesse último é preciso considerar que no ENVI-met não é possível incluir os muros no limite dos lotes, o que certamente influenciaria no resultado do ponto 04.

Ao tratar da rugosidade, nos pontos 01 e 04, não há significativa diferença entre o uso do recuo inicial e do recuo progressivo, todavia é preciso considerar o efeito da canalização dos ventos nas vias principais e na via que se forma a partir dos recuos posteriores entre as edificações no interior da quadra central. Já nos pontos 02 e 03, é nítido o efeito positivo do uso do recuo progressivo, ao analisar a rugosidade da malha urbana.

Os cenários urbanos hipotéticos com incidência da ventilação oblíqua às edificações apresentaram o melhor grau de porosidade na malha urbana, visto que entre o modelo REF e os modelos verticalizados não foi observado relevante disparidade dos dados de velocidade dos ventos. Outro ponto importante é a velocidade do vento, Kukreja (1978) sugere que a velocidade do vento para climas quentes deve ser entre 1 e 1,50m/s, e a orientação das quadras no sentido oblíquo se aproxima mais do ideal. No que tange o efeito do uso do recuo progressivo, os cenários urbanos hipotéticos de incidência da ventilação oblíqua às edificações obtiveram os melhores resultados.

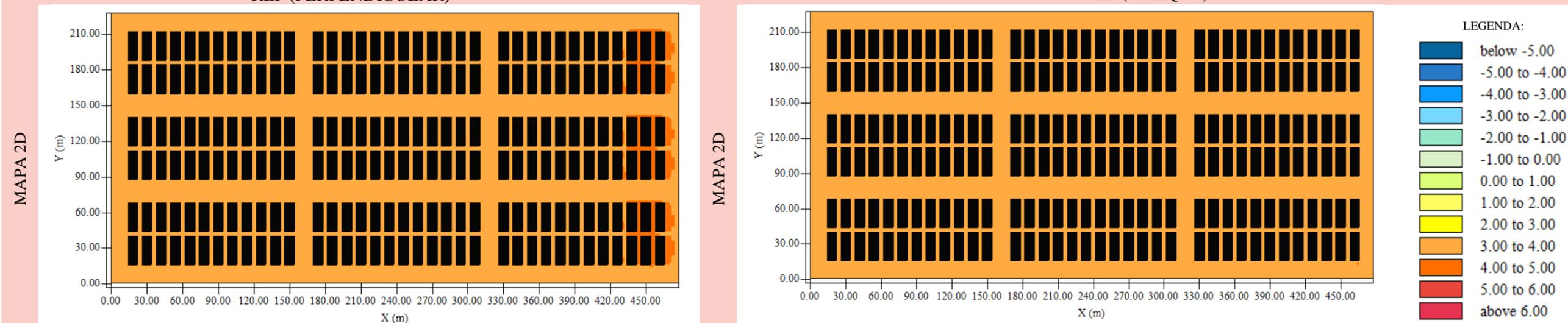
Ao analisar a rugosidade da malha urbana, a partir dos cenários com edificações com diferentes alturas, foi possível observar como o uso do recuo progressivo contribui para um melhor aproveitamento da ventilação natural.

#### **4.4 Análise do desempenho dos cenários quanto ao índice PMV**

Conforme colocado anteriormente, na escala do índice PMV (Voto Médio Estimado), 0 é a condição mais próxima de conforto, 1 equivale à sensação térmica levemente quente, 2 é uma condição quente, 3, muito quente, e acima de 4 equivale a extremamente quente; enquanto que -1 corresponde a uma sensação térmica levemente fria, 2 é fria, 3, muito fria, e acima de 4 é extremamente fria.

Os Quadros 30, 31 e 32 apresentam os perfis e mapas referentes à análise do resultado das simulações computacionais às 9h, em relação à porosidade: No Quadro 30, observa-se que o modelo REF apresenta índices térmicos equivalentes a condição de desconforto, com PMV entre 3 e 4, nos casos de incidência da ventilação perpendicular e oblíqua às edificações. Esse resultado demonstra que o alto fator de céu visível favorece a radiação solar direta na malha urbana, o que eleva a temperatura do ar e a temperatura radiante das superfícies.

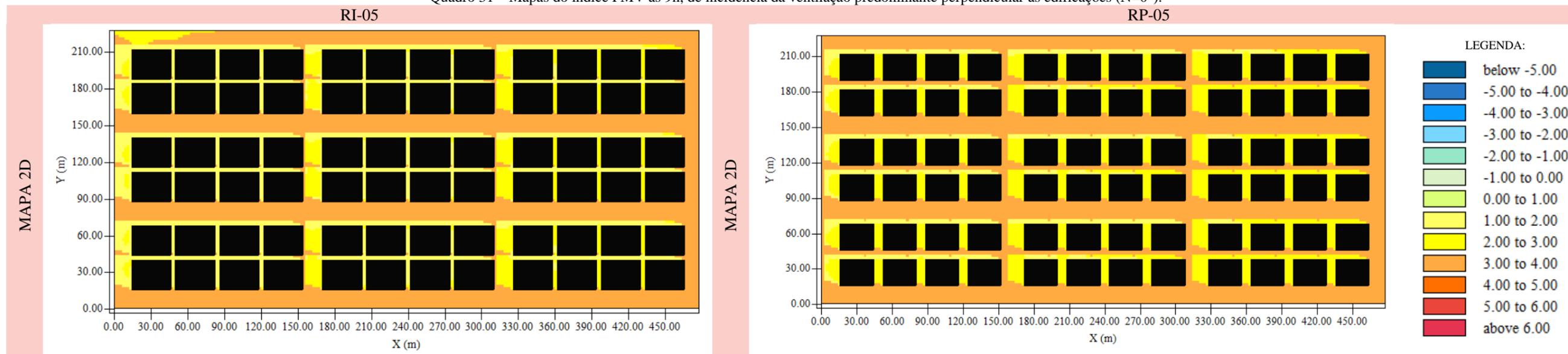
Quadro 30 – Mapas Do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).  
REF (PERPENDICULAR) REF (OBLÍQUA)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

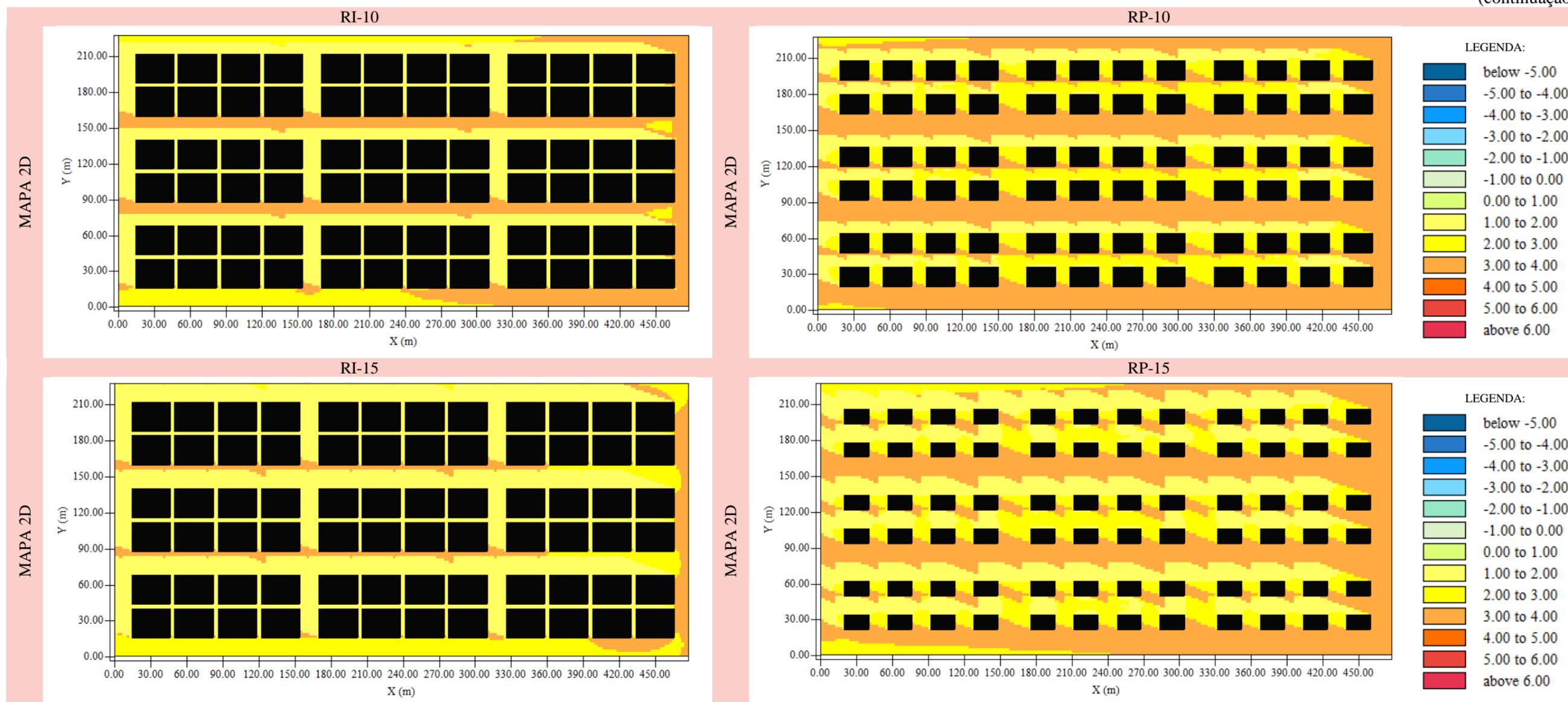
O Quadro 31 apresenta os mapas do índice de PMV nos modelos verticalizados, com baixa (5 pavimentos), média (10 pavimentos) e alta (15 pavimentos) verticalização, com uso do recuo inicial e do recuo progressivo, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações.

Quadro 31 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



(continua)

(continuação)

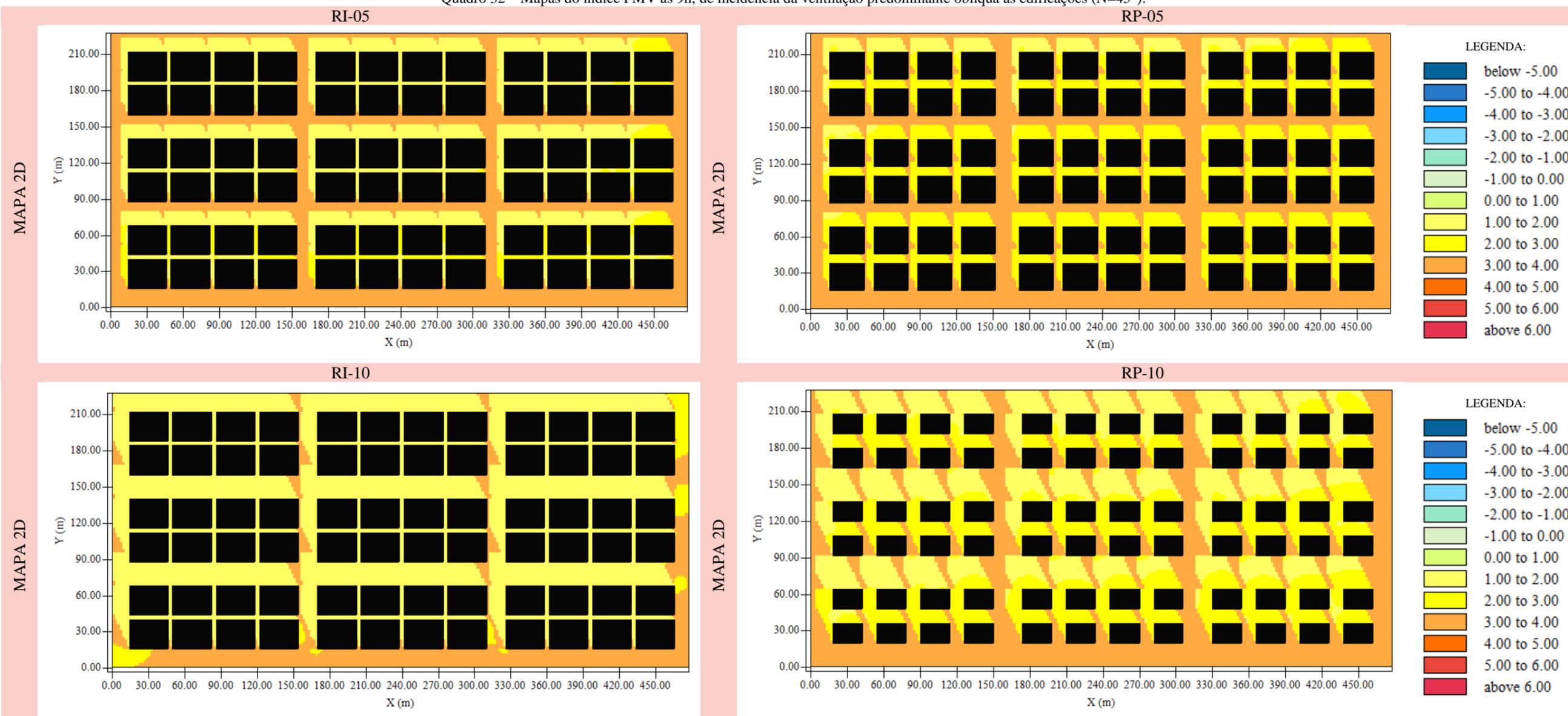


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Com base nos mapas acima, os cenários urbanos hipotéticos com uso do recuo inicial apresentaram índices mais próximos ao conforto térmico, do que nos casos com uso do recuo progressivo. Outrossim, é possível observar que as áreas com condições de conforto mais amenas coincidem com as áreas de sombreamento gerados pelas edificações verticalizadas. As áreas sombreadas apresentam índices de PMV que variam de 1 a 3, que corresponde a uma sensação térmica de levemente quente a muito quente.

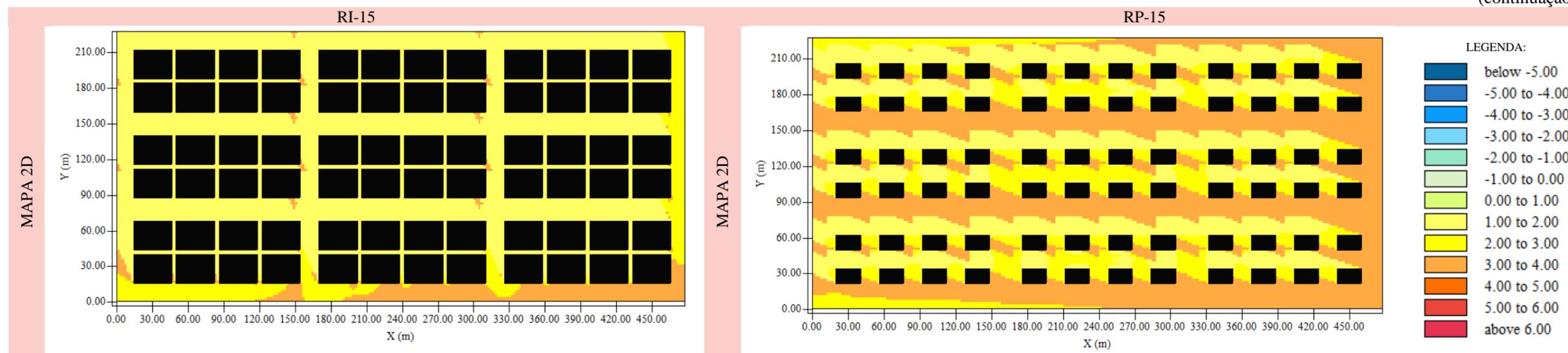
No Quadro 32 é possível observar os resultados das simulações computacionais dos modelos de incidência da ventilação oblíqua às edificações.

Quadro 32 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

Na incidência da ventilação oblíqua às edificações, o mesmo fenômeno acontece, contudo, nesse caso, a orientação do traçado urbano frente a radiação solar e o sentido dos ventos predominantes favoreceu para condições de conforto mais amenas, pois a área que corresponde à condições de sensação térmica equivalentes a levemente quente a quente foi maior. Os modelos de incidência da ventilação oblíqua às edificações apresentaram índices mais próximos ao conforto térmico do que os modelos de incidência da ventilação perpendicular às edificações. Em relação à porosidade, os modelos com uso do recuo inicial apresentaram condições térmicas mais amenas em uma área mais abrangente do que os modelos com uso do recuo progressivo.

A Tabela 12 expõe quantitativamente o resultado dos modelos simulados no período que corresponde às 9h, e nesse período o índice PMV varia entre levemente quente e muito quente.

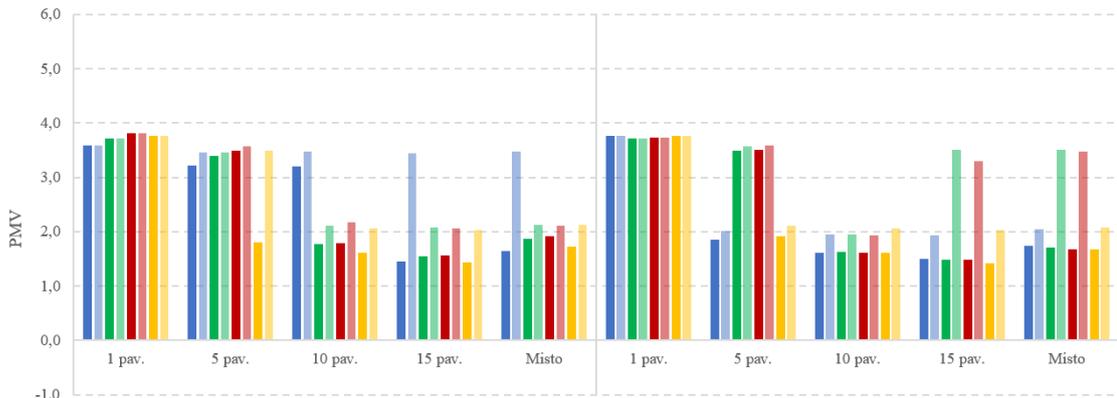
Tabela 12 – Dados do índice PMV às 9h, nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)				Misto	Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto
Ponto 1	RI	3,6	3,2	3,2	1,5	1,7	3,8	1,8	1,6	1,5	1,7
			3,5	3,5	3,4	3,5		2,0	2,0	3,4	2,0
Ponto 2	RI	3,7	3,4	1,8	1,6	1,9	3,7	3,5	1,6	1,5	1,7
			3,5	2,1	2,1	2,1		3,6	1,9	2,1	3,5
Ponto 3	RI	3,8	3,5	1,8	1,6	1,9	3,7	3,5	1,6	1,5	1,7
			3,6	2,2	2,1	2,1		3,6	1,9	2,1	3,5
Ponto 4	RI	3,8	1,8	1,6	1,4	1,7	3,8	1,9	1,6	1,4	1,7
			3,5	2,1	2,0	2,1		2,1	2,1	2,0	2,1

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

O Gráfico 8 ilustra o comportamento do índice PMV dos cenários urbanos hipotéticos nos 4 pontos da quadra central. Na incidência da ventilação perpendicular às edificações, os modelos REF e de baixa verticalização (5 pavimentos) apresentaram sensação térmica de muito calor, enquanto nos modelos de média (10 pavimentos) e alta (15 pavimentos) verticalização, o índice PMV foi de 2, que equivalente a uma condição de calor. Os cenários com uso do recuo inicial apresentaram índices mais próximos do conforto térmico, do que nos modelos com adoção do recuo progressivo.

Gráfico 8 – Dados do índice PMV às 9h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
 Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



LEGENDA:

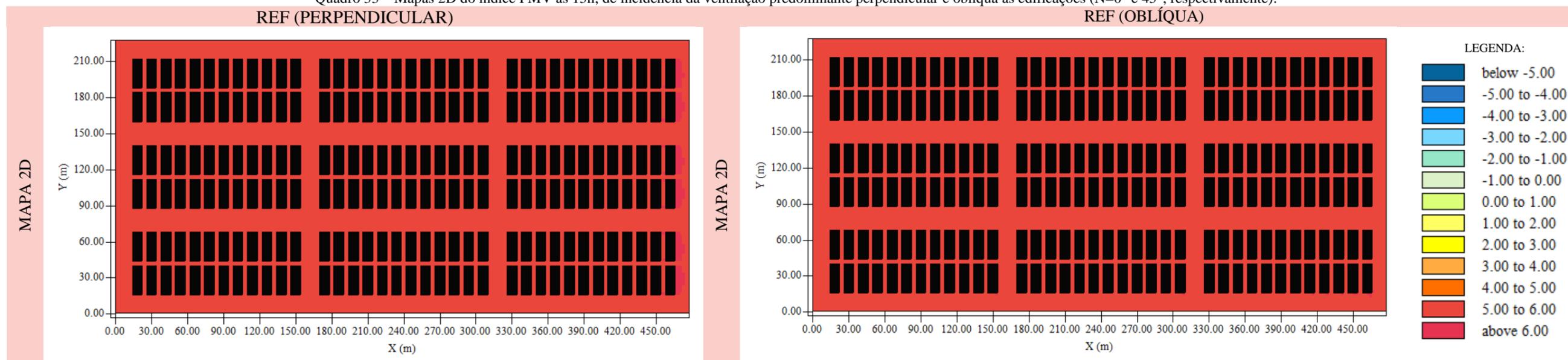
- P1 - RI
- P1 - RP
- P2 - RI
- P2 - RP
- P3 - RI
- P3 - RP
- P4 - RI
- P4 - RP

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

No resultado da incidência da ventilação oblíqua às edificações, os cenários com edificações de 1 pavimento ainda apresentaram sensação térmica equivalente a muito calor, em todos os 4 pontos analisados. Já nos cenários com edificações de 5 pavimentos, somente os pontos 02 e 03 continuaram com a sensação térmica de muito calor, enquanto os pontos 01 e 04 apresentaram sensação de calor. A verticalização das edificações continuou a gerar índices PMV mais amenos, com sensação térmica levemente quente e quente. Contudo, os cenários com uso do recuo inicial continuaram apresentando valores mais próximos do conforto térmico.

O Quadro 33 demonstra os resultados obtidos no período da tarde, às 15hr. No período da tarde, às 15h, nos modelos REF, o índice PMV indicou condições de sensação térmica extremamente quentes no interior da malha urbana, na incidência da ventilação perpendicular e oblíqua às edificações.

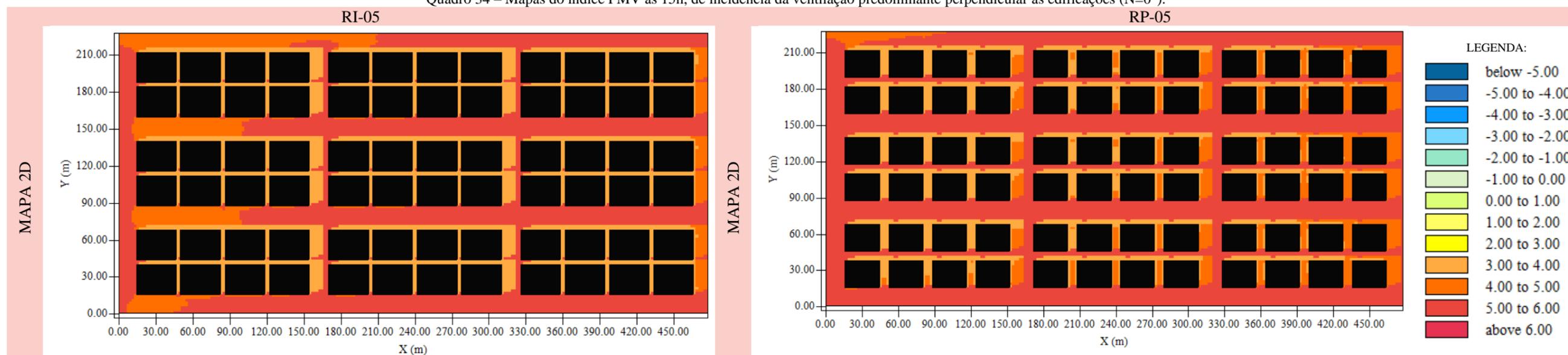
Quadro 33 – Mapas 2D do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

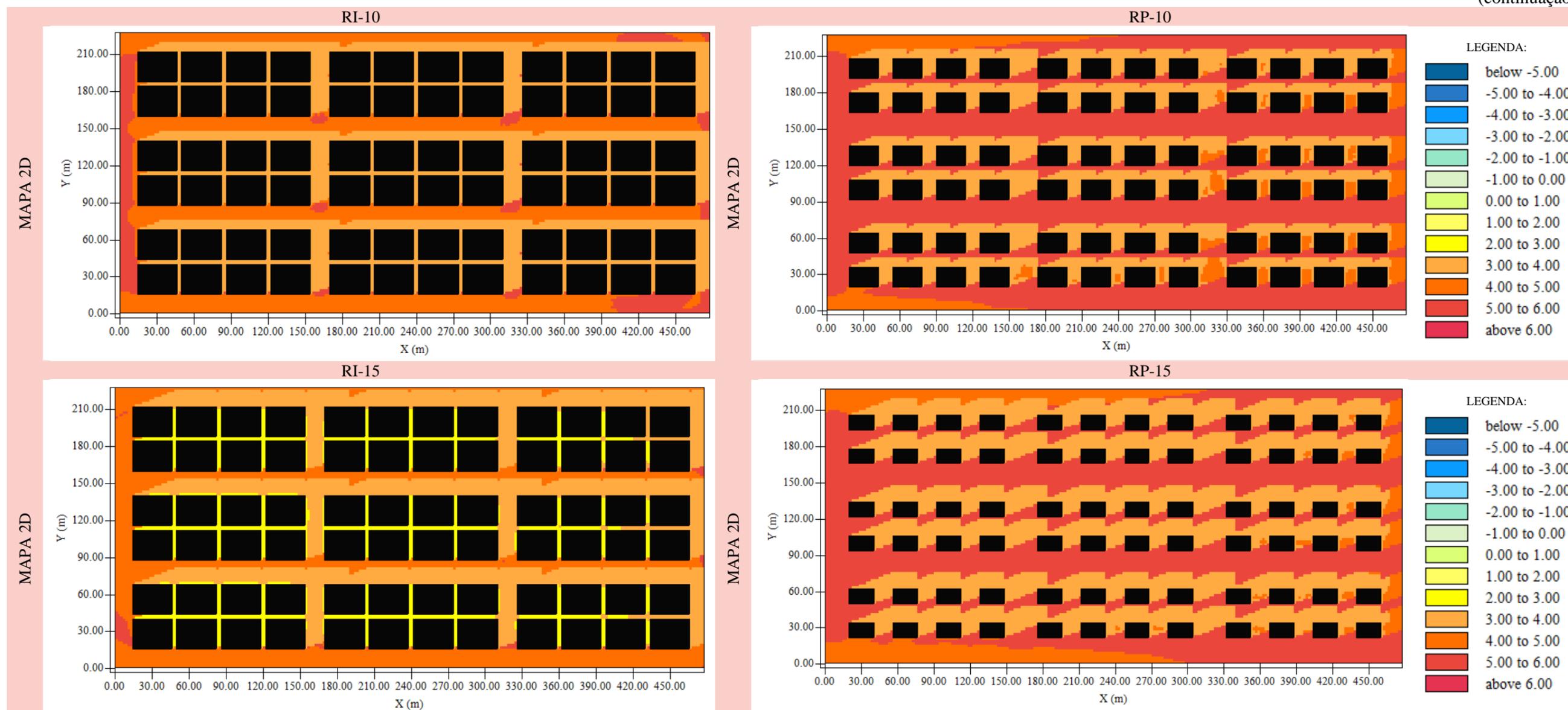
Nos modelos de incidência da ventilação perpendicular às edificações (Quadro 34), é possível observar que as áreas com condições térmicas mais amenas aumentam conforme os cenários se verticalizam, devido ao efeito do sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas. Em relação à porosidade da malha urbana, como os cenários com adoção do recuo inicial projetam uma área de sombra maior, e o alto fator de céu visível impede a radiação solar direta na superfície urbana, as condições de conforto térmico a nível dos pedestres foram mais favoráveis, em comparação com os cenários em que se adotou o recuo progressivo.

Quadro 34 – Mapas do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



(continua)

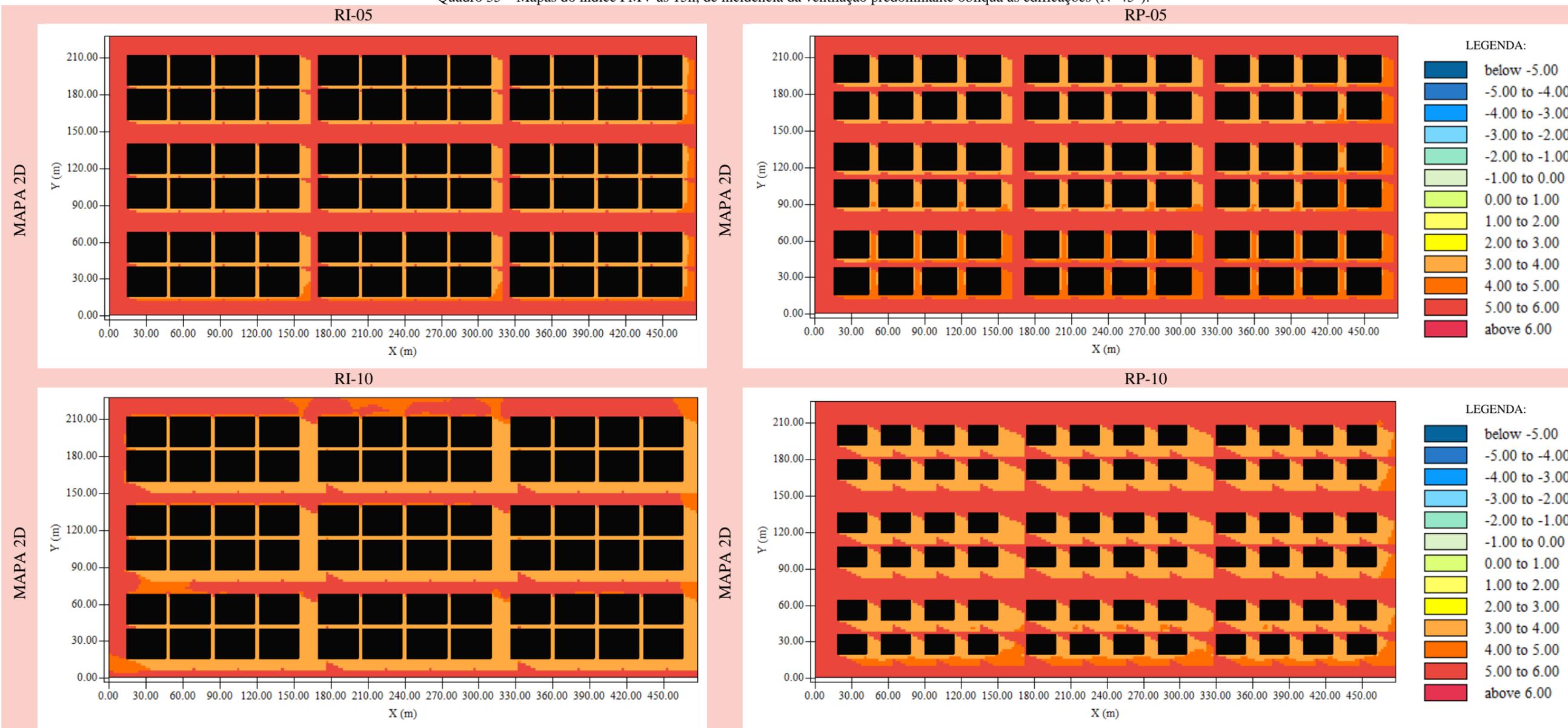
(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

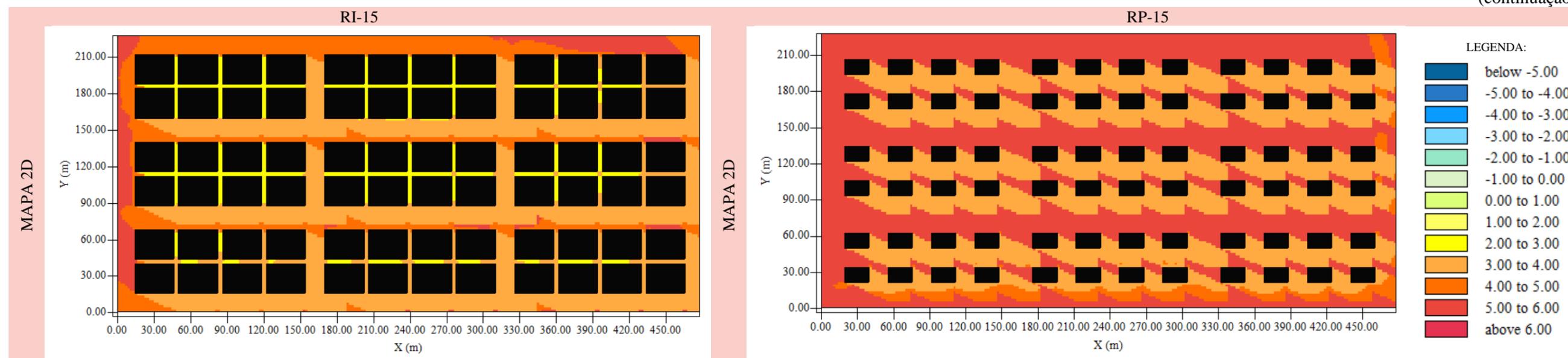
No Quadro 35 é possível observar o comportamento do índice PMV na malha urbana dos modelos verticalizados de incidência da ventilação oblíqua às edificações. Nos cenários de baixa verticalização (5 pavimentos), o uso do recuo inicial e do recuo progressivo demonstraram condições térmicas semelhantes. Contudo, nos modelos de média (10 pavimentos) e alta (15 pavimentos) verticalização, o uso do recuo inicial apresentou índices mais próximos do conforto térmico em comparação com os cenários com uso do recuo progressivo.

Quadro 35 – Mapas do índice PMV às 15h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

A Tabela 13 expõe os dados coletados dos 4 pontos ao redor da quadra central das simulações computacionais para o período mais quente do dia, às 15h:

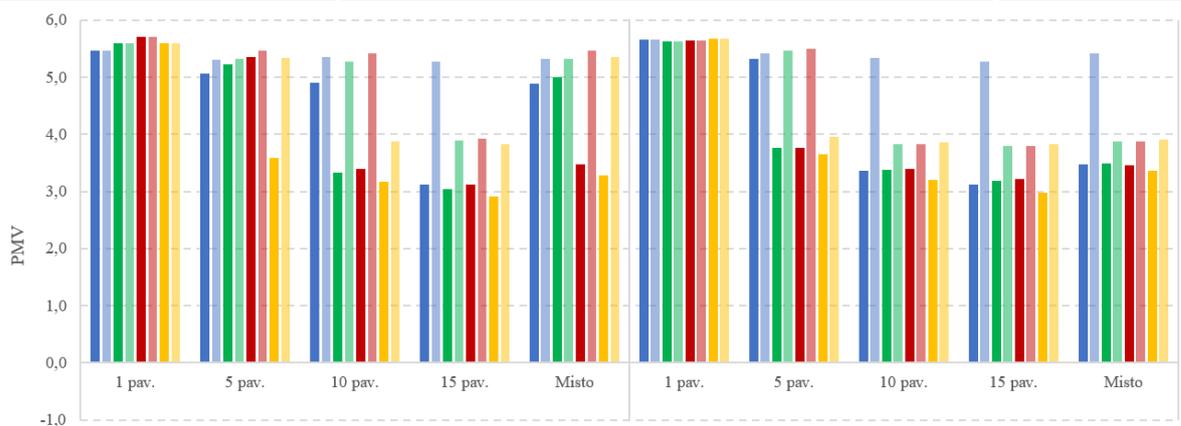
Tabela 13 – Dados do índice PMV às 15h, nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Misto	Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	1 pav.		5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto	
Ponto 1	RI	5,5	5,1	4,9	3,1	4,9	5,7	5,3	3,4	3,1	3,5	
	RP		5,3	5,3	5,3	5,3		5,4	5,3	5,3	5,4	
Ponto 2	RI	5,6	5,2	3,3	3,0	5,0	5,6	3,8	3,4	3,2	3,5	
	RP		5,3	5,3	3,9	5,3		5,5	3,8	3,9	3,9	
Ponto 3	RI	5,7	5,4	3,4	3,1	3,5	5,6	3,8	3,4	3,2	3,5	
	RP		5,5	5,4	3,9	5,5		5,5	3,8	3,9	3,9	
Ponto 4	RI	5,6	3,6	3,2	2,9	3,3	5,7	3,7	3,2	3,0	3,4	
	RP		5,3	3,9	3,8	5,4		4,0	3,9	3,8	3,9	

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Às 15h, conforme mostra o Gráfico 9, todos os cenários simulados apresentam sensação térmica de muito calor nos 4 pontos ao redor da quadra central, o que indica alto grau de desconforto térmico a nível do pedestre. Nos modelos REF, o índice PMV apresentou condições de extremo calor, enquanto nos modelos verticalizados, esse valor diminui gradualmente, o que indica que, em dia rigoroso do período quente/ seco em cidade de clima semiárido, a verticalização, ao gerar sombreamento, gera índices PMV mais amenos.

Gráfico 9 – Dados do índice PMV às 15h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
 Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



LEGENDA:

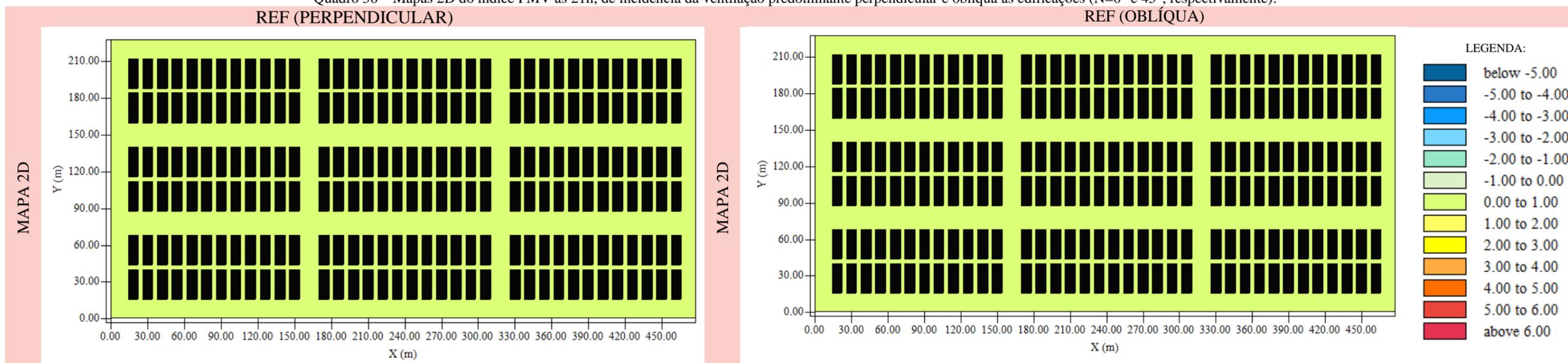
■ P1 - RI ■ P1 - RP ■ P2 - RI ■ P2 - RP ■ P3 - RI ■ P3 - RP ■ P4 - RI ■ P4 - RP

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Diante dos resultados apresentados no Gráfico 9, os cenários de incidência da ventilação oblíqua às edificações apresentaram condições de sensação térmica mais amenas, de acordo com o índice PMV. Vale destacar que os modelos com edificações de alturas diferentes apresentaram índices mais próximos ao conforto térmico do que na incidência da ventilação perpendicular às edificações.

Os Quadros 36, 37 e 38 apresentam os resultados obtidos a partir das simulações às 21h: No período noturno, às 21h, os modelos REF de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (Quando 36) apresentam índices de sensação térmica equivalentes a condição de conforto a levemente quente.

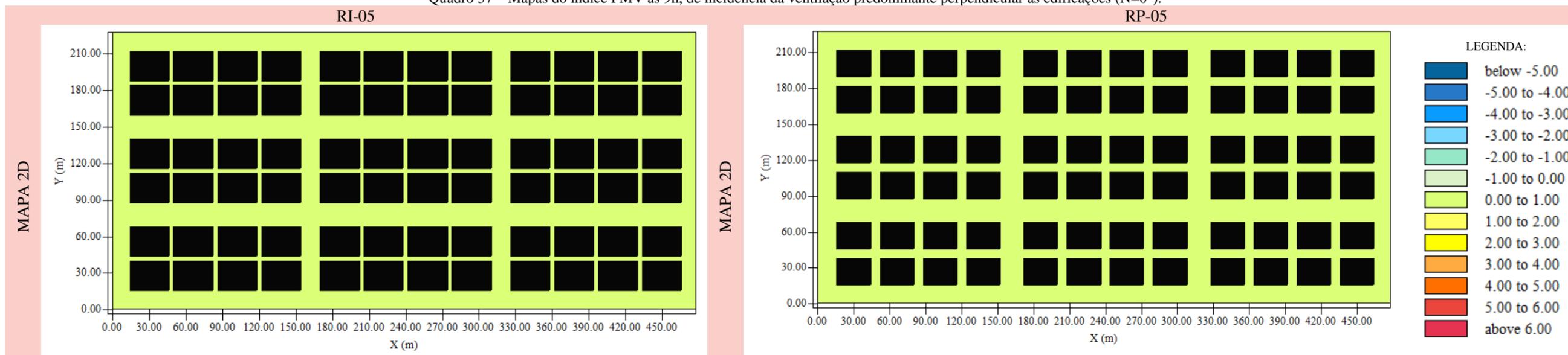
Quadro 36 – Mapas 2D do índice PMV às 21h, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

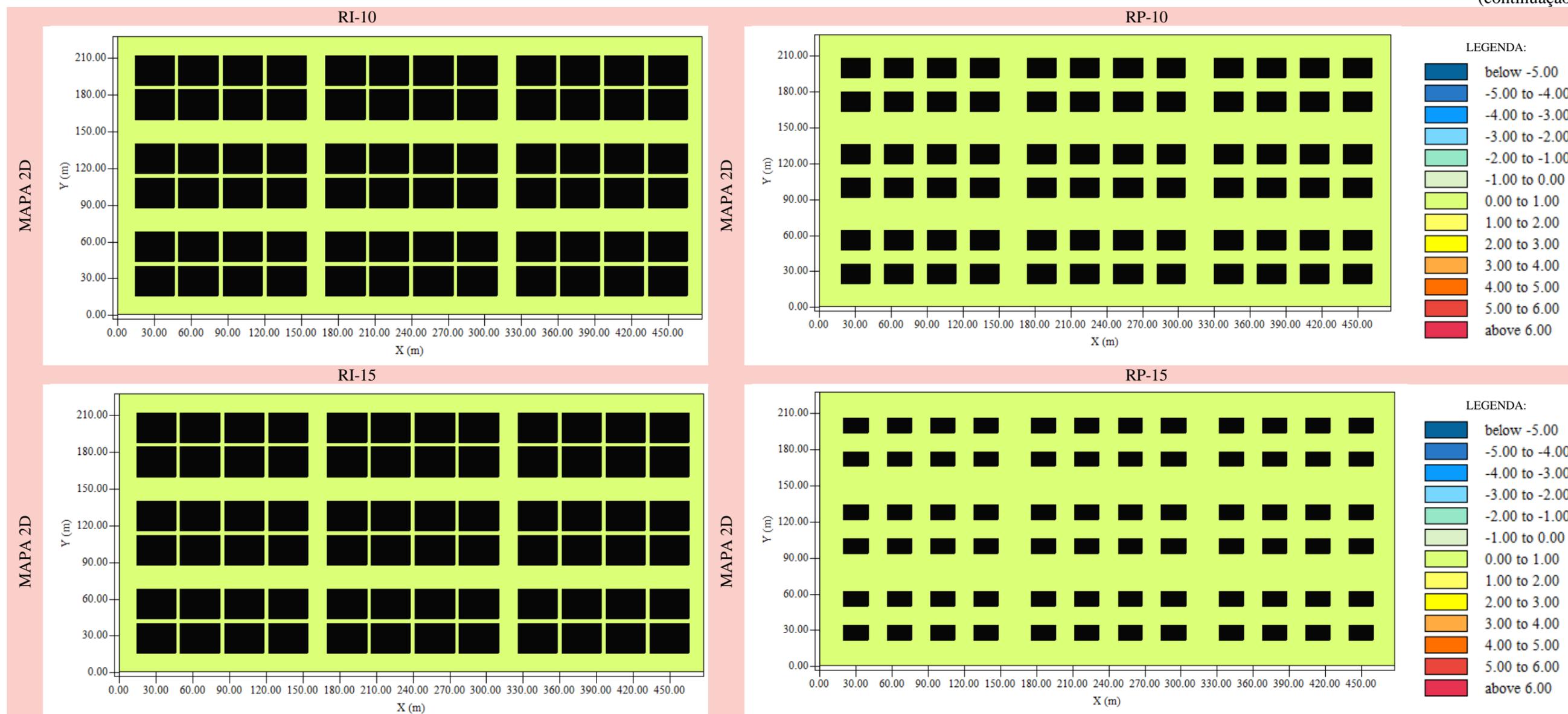
Nos modelos verticalizados, de incidência da ventilação perpendicular às edificações, o resultado apresenta o mesmo padrão, com sensação térmica de conforto a levemente quente (ver Quadro 37).

Quadro 37 – Mapas do índice PMV às 9h, de incidência da ventilação predominante perpendicular às edificações (N=0°).



(continua)

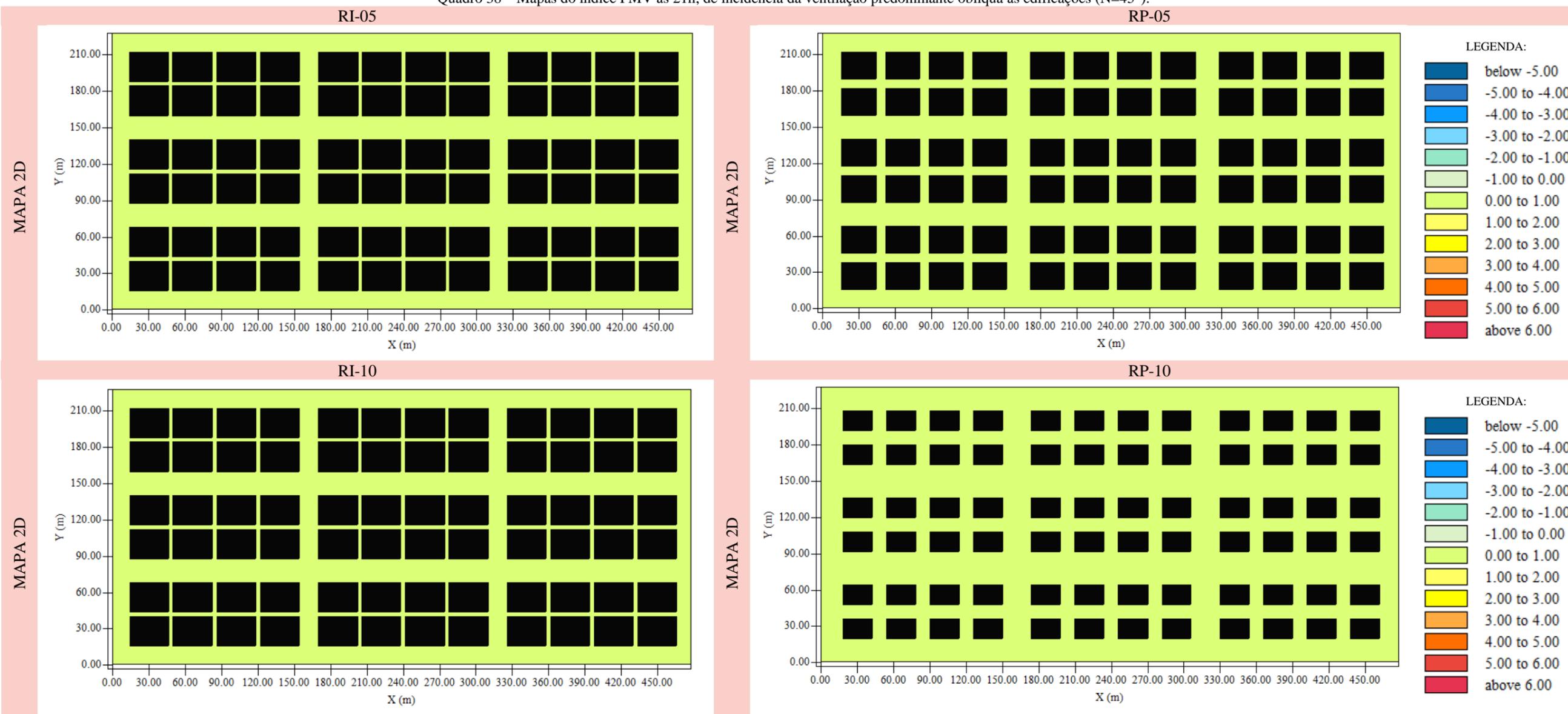
(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

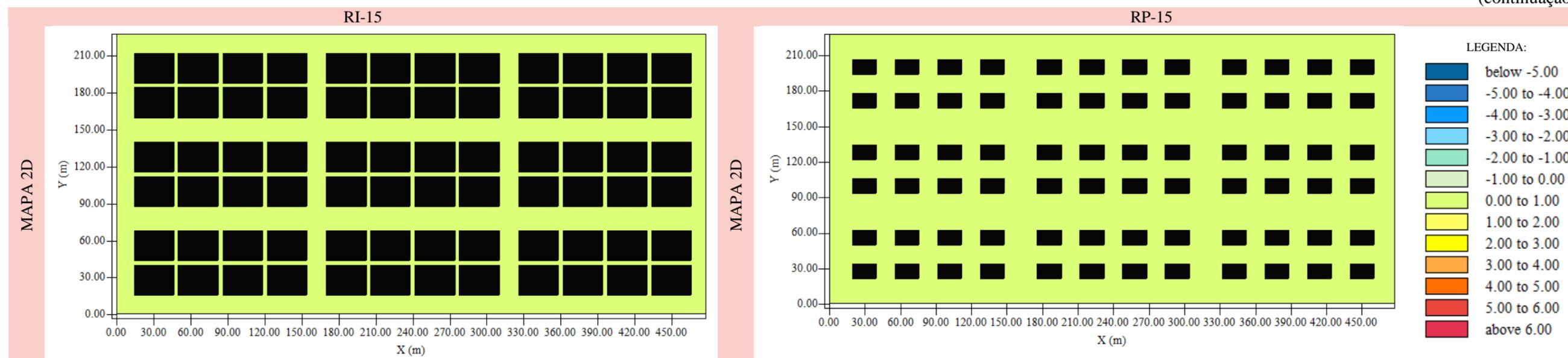
No caso dos cenários de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações, a malha urbana apresenta o mesmo índice de sensação térmica, de conforto a levemente quente (ver Quadro 38).

Quadro 38 – Mapas do índice PMV às 21h, de incidência da ventilação predominante oblíqua às edificações (N=45°).



(continua)

(continuação)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

No período noturno, às 21h, a sensação térmica é mais próxima do confortável nos 4 pontos ao redor da quadra central dos cenários urbanos simulados, como mostra a Tabela 14.

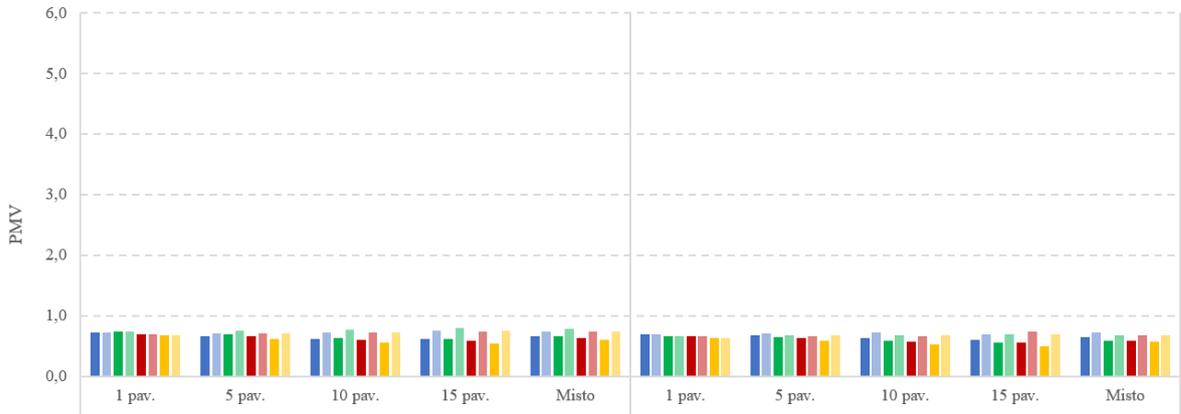
Tabela 14 – Dados do índice PMV às 21h, nos 4 pontos ao redor da quadra central

		Incidência Perpendicular (N=0°)					Incidência Oblíqua (N=45°)				
		1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto	1 pav.	5 pav.	10 pav.	15 pav.	Misto
Ponto 1	RI	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7
	RP		0,7	0,7	0,8	0,7		0,7	0,7	0,8	0,7
Ponto 2	RI	0,7	0,7	0,6	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
	RP		0,7	0,8	0,8	0,8		0,7	0,7	0,8	0,7
Ponto 3	RI	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,7	0,6	0,6	0,6	0,6
	RP		0,7	0,7	0,7	0,7		0,7	0,7	0,7	0,7
Ponto 4	RI	0,7	0,6	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,6
	RP		0,7	0,7	0,8	0,7		0,7	0,7	0,8	0,7

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

O resultado dos cenários urbanos simulados para o horário das 21hr se aproximam da sensação térmica de levemente quente, pois matematicamente, se fosse o caso de transformá-los em um valor de uma só unidade, muitos seriam 1 no índice PMV. Os cenários com uso do recuo progressivo continuaram apresentando valores mais elevados no índice PMV (ver Gráfico 10).

Gráfico 10 – Dados do índice PMV às 21h, nos 4 pontos ao redor da quadra central  
Incidência Perpendicular Incidência Oblíqua



LEGENDA:

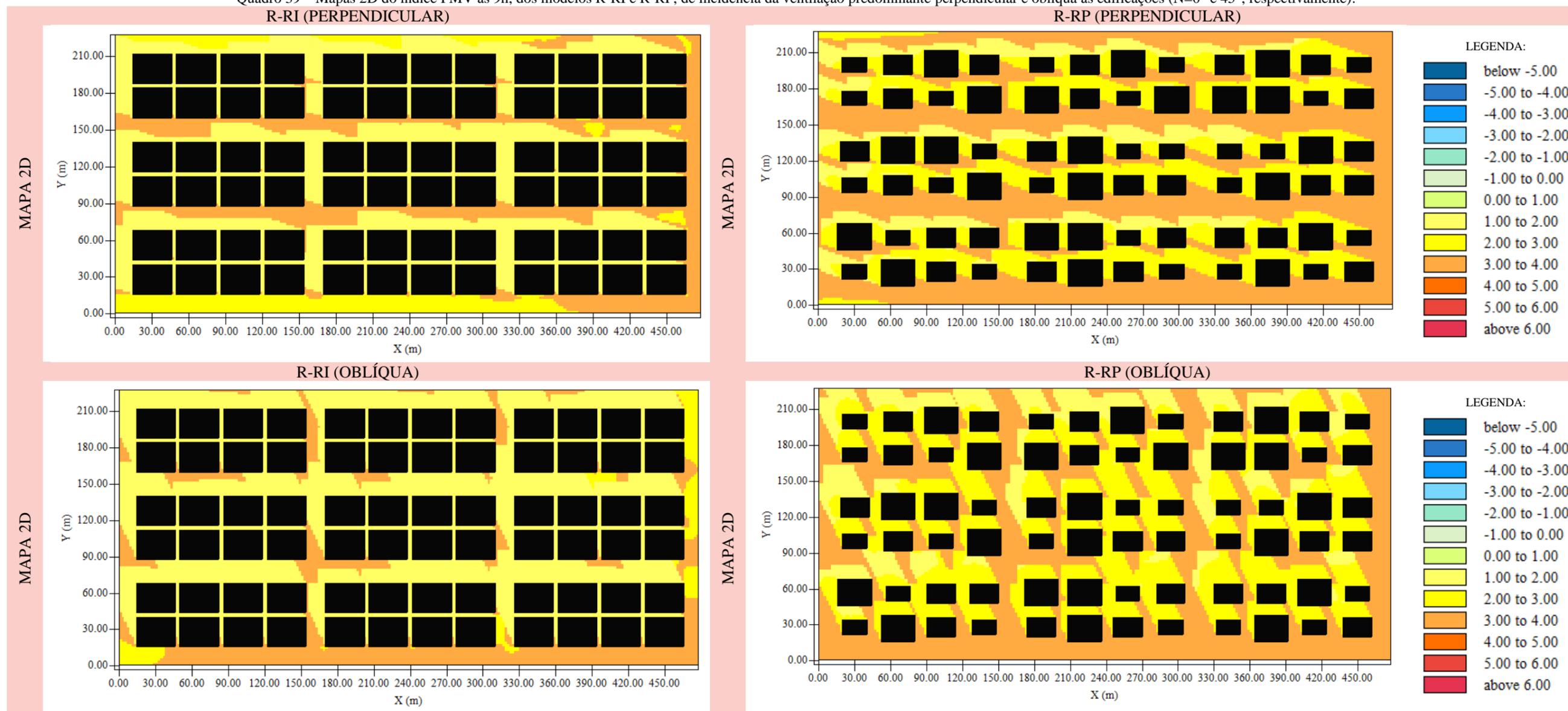
- P1 - RI
- P1 - RP
- P2 - RI
- P2 - RP
- P3 - RI
- P3 - RP
- P4 - RI
- P4 - RP

Fonte: Elaborado pela autora, 2020

No período noturno, os resultados obtidos não apresentam diferença relevante, pois todos variam entre 0 a 1 no índice PMV, que equivale a sensação térmica de conforto à levemente quente.

Os Quadros 39, 40 e 41 expõe os resultados obtidos para análise em relação à rugosidade da malha urbana, com edificações de alturas diferentes que variam entre 5, 10 e 15 pavimentos, com uso do recuo inicial e do recuo progressivo, com norte igual a 0° e 45°.

Quadro 39 – Mapas 2D do índice PMV às 9h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).

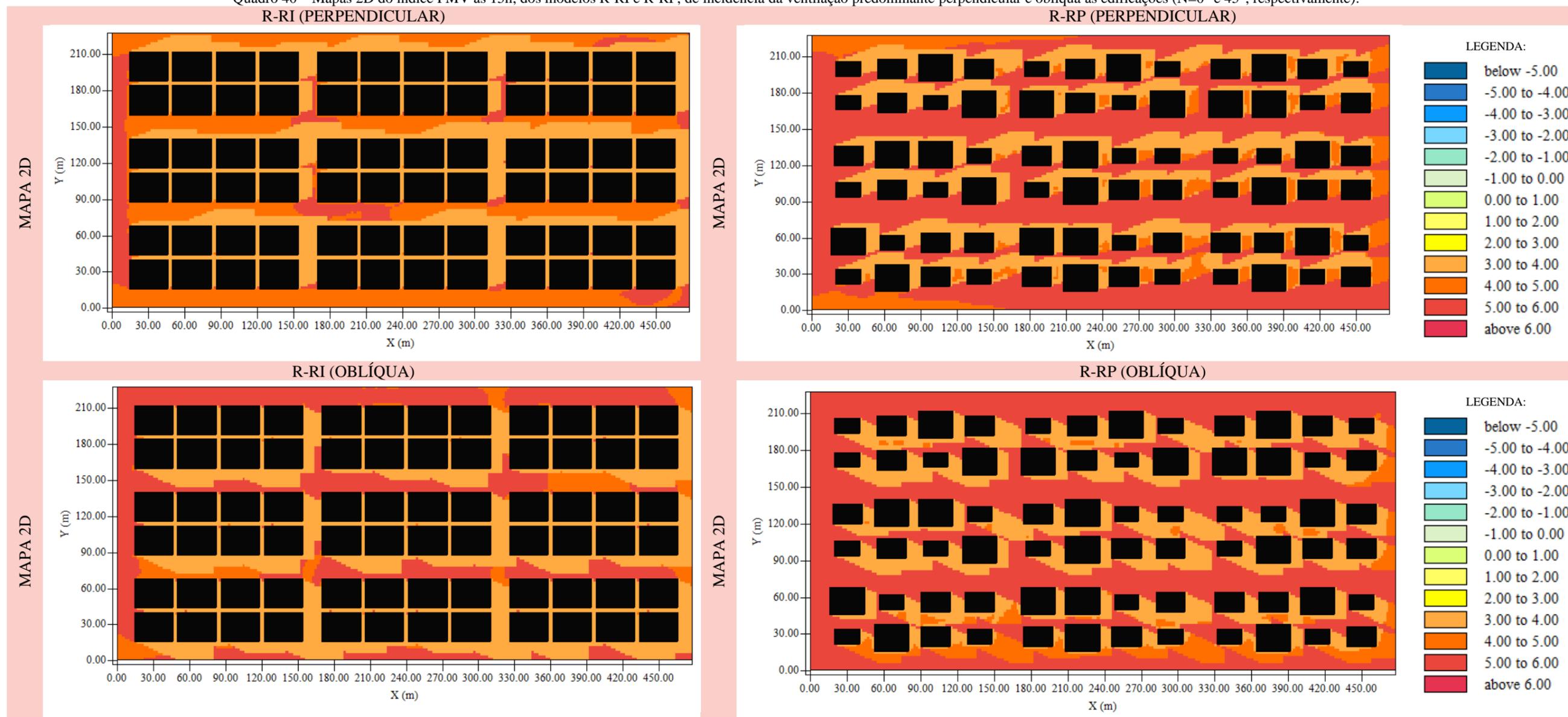


Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

No período da manhã, os resultados dos cenários de incidência oblíqua continuam apresentando condições mais amenas do índice PMV, e em relação ao recuo progressivo, os cenários com uso do recuo inicial apresentaram um melhor desempenho térmico.

Às 15h, os índices de PMV são mais elevados, por ser o horário mais quente do dia, contudo, o resultado se apresenta de maneira semelhante ao do período da manhã (ver Quadro 40).

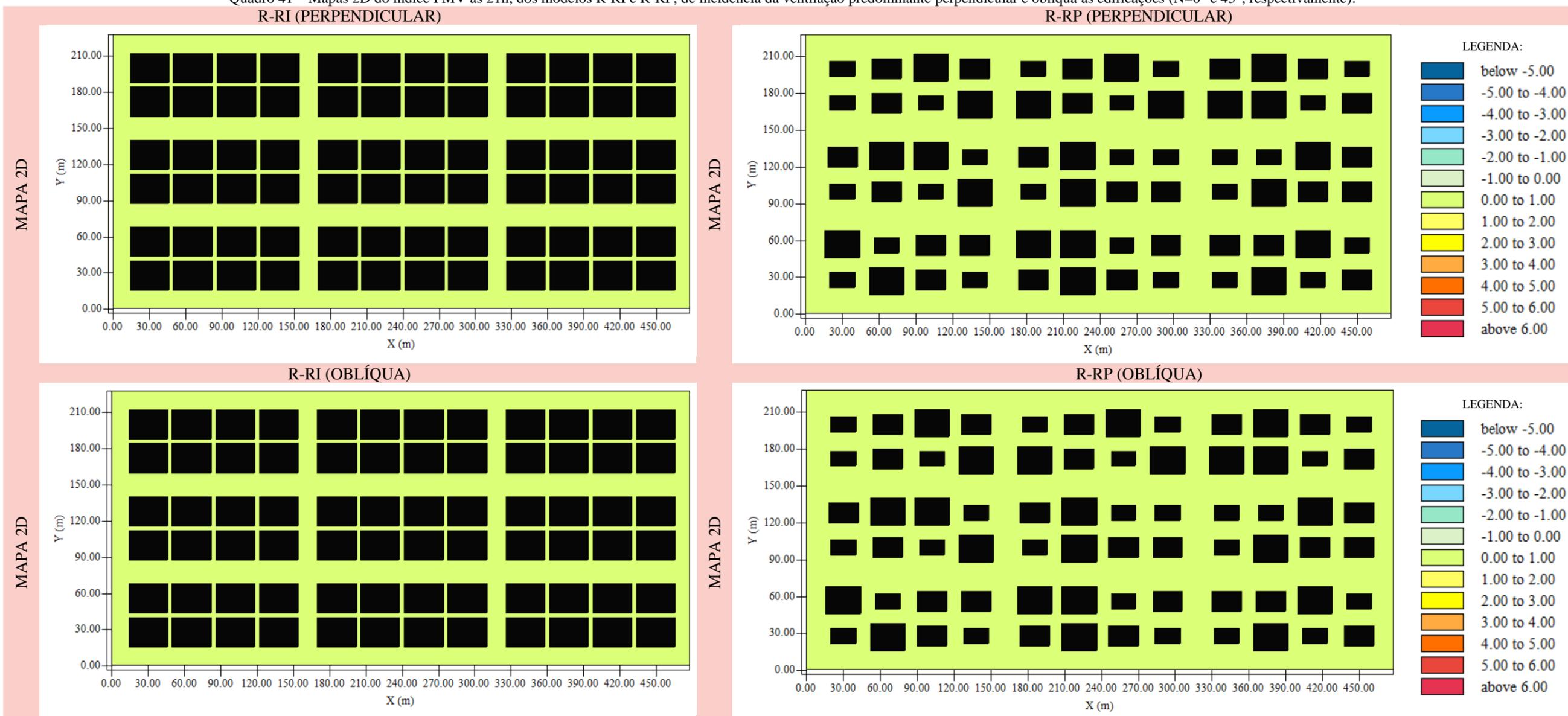
Quadro 40 – Mapas 2D do índice PMV às 15h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

O Quadro 41 demonstra os resultados referentes ao período noturno, às 21h, e nesse caso o resultado referente ao índice PMV não apresenta diferenças significativas entre os cenários simulados. Nos cenários analisados a sensação térmica equivalem a índices mais próximos do conforto a levemente quentes.

Quadro 41 – Mapas 2D do índice PMV às 21h, dos modelos R-RI e R-RP, de incidência da ventilação predominante perpendicular e oblíqua às edificações (N=0° e 45°, respectivamente).



Fonte: Elaborado pela autora, 2020.

## 4.5 Conclusões do Capítulo

A partir da análise dos modelos simulados foi possível observar, primeiramente, que a temperatura do ar foi uma variável climática que não apresentou diferenças relevantes entre os pontos ao redor da quadra central, e por isso não demonstrou de forma clara o desempenho térmico dos cenários urbanos hipotéticos simulados. Quanto à temperatura radiante, os perfis demonstraram que o uso do recuo progressivo favoreceu a diminuição dos bolsões de ar aquecido na camada de mistura, isso significa que a porosidade da malha urbana auxilia a dissipar o calor no interior da área urbana. A análise dos mapas indicou que os cenários com uso do recuo inicial apresentaram temperaturas mais amenas, devido ao efeito do sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas que exerceram influência significativa no conforto térmico a nível do pedestre. Entre os sentidos de incidência, a oblíqua apresentou temperaturas radiantes mais baixas.

De acordo com os resultados obtidos com relação à velocidade/ direção dos ventos, os modelos com uso do recuo progressivo apresentaram melhor porosidade e rugosidade na malha urbana. Ainda sobre o melhor aproveitamento da ventilação natural, os modelos de incidência da ventilação oblíqua às edificações apresentaram os melhores índices da velocidade do vento, tanto nas vias de eixo Leste-Oeste, como nas vias de eixo Norte-Sul, com menos zonas de sombra de vento no interior dos lotes e a sotavento.

Em relação ao índice PMV, os resultados demonstraram que, no caso de um dia rigoroso do período quente/ seco em cidade de clima semiárido, o efeito do sombreamento gerado pelas edificações verticalizadas influencia de maneira significativa na sensação térmica a nível do pedestre, o que condiz com a principal estratégia bioclimática apontada por Silva (2019) para o clima de Arapiraca. Como os cenários com uso do recuo inicial projetam uma sombra de maior extensão e possuem um fator de céu visível menor, o que diminui a incidência direta de radiação solar na superfície urbana, apresentaram melhor desempenho térmico. No que tange o a incidência da ventilação frente às edificações, o sentido oblíquo apresentou índices mais próximos ao conforto.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou compor fundamentação teórica no que tange o adensamento urbano por meio da verticalização sob os princípios do urbanismo bioclimático, de forma a embasar os procedimentos metodológicos, fim de analisar a relação entre os parâmetros urbanísticos e o microclima no cânion urbano, mais especificamente, a influência do recuo inicial e recuo progressivo no desempenho climático de cenários urbanos hipotéticos (pesquisa preditiva), considerando aspectos da porosidade e rugosidade, características da forma urbana que atuam como condicionantes climáticos, elencados por Oliveira (1988). Mediante a metodologia aplicada, com base na abordagem preditiva, os resultados obtidos demonstraram que o objetivo geral foi alcançado.

A partir da análise dos dados climáticos de temperatura do ar, os resultados indicaram que a mesma apresentou valores muito próximos nos 4 pontos selecionados ao redor da quadra central dos cenários urbanos hipotéticos com uso do recuo inicial e do recuo progressivo em edificações de 1 pavimento (modelo REF) e edificações verticalizadas, com baixa (5 pavimentos), média (10 pavimentos) e alta (15 pavimentos) verticalização, em ambos os casos de incidência da ventilação frente às edificações. Nesse caso, como não houve mudanças significativas entre os modelos simulados, para análise do desempenho térmico dos cenários urbanos hipotéticos serão considerados a temperatura radiante, a velocidade/ direção dos ventos e o índice PMV.

Acerca dos dados climáticos da temperatura radiante, os modelos REF apresentaram valores elevados de temperatura radiante, pois o alto fator de visão do céu conformado por uma malha urbana sem verticalização, gerou radiação solar direta na superfície do solo. A respeito dos modelos verticalizados, os cenários apresentaram uma gradual diminuição da temperatura radiante na superfície do solo urbano, devido ao efeito do sombreamento gerado pelas edificações. O uso do recuo inicial favoreceu a condições climáticas mais amenas, pois a área de sombra, nesse caso, é maior, e o baixo fator de céu visível provoca a diminuição da incidência de radiação solar direta na superfície do solo urbano. Em contrapartida, a adoção do recuo progressivo contribuiu para a diminuição de bolsões de ar aquecido na camada de mistura dos modelos simulados, pois o aumento da porosidade da malha urbana favorece a permeabilidade dos fluxos de ventos. Com base na incidência da ventilação perpendicular e oblíqua às edificações, essa última apresentou desempenho térmico com temperaturas radiantes mais amenas, pois o traçado viário potencializou o aproveitamento da radiação solar e da ventilação natural.

Com base na análise dos dados climáticos da velocidade e direção dos ventos predominantes foi possível observar que nos modelos com uso do recuo progressivo (alta porosidade) houve melhor distribuição dos fluxos na malha urbana, tanto nas vias de eixo Leste-Oeste como nas vias de eixo Norte-Sul, o que diminuiu as zonas de estagnação de ar. Em relação à rugosidade, nos cenários com edificações de alturas diferentes o uso do recuo progressivo favoreceu a melhor permeabilidade nos ventos. Por fim, nos modelos com incidência da ventilação oblíqua às edificações, os resultados demonstraram o potencial de otimizar o aproveitamento da ventilação natural em ambas as situações.

A análise dos resultados do índice PMV indicaram que os cenários verticalizados apresentaram uma redução gradual, à medida que o número de pavimentos aumentou. O que indica que a verticalização, na realidade do clima semiárido no período quente/ seco, possibilita gerar melhores condições de conforto térmico ao nível do pedestre. Os modelos com uso do recuo inicial apresentaram índices mais próximos do conforto térmico a nível do pedestre, em decorrência do efeito do sombreamento e do fator de céu visível. Ademais, entre os sentidos de incidência dos cenários analisados, a incidência da ventilação oblíqua às edificações apresentou os melhores resultados em todos os casos. O que indica que o traçado viário orientado sob o norte de  $45^\circ$ , na realidade aqui estudada, apresenta melhor aproveitamento dos recursos passivos, de radiação solar e ventilação natural.

A respeito da análise das variáveis climáticas, tornou-se evidente como a forma urbana tem o potencial de otimizar o aproveitamento de recursos naturais, de acordo com as estratégias bioclimáticas adequadas para cada cidade. No caso de Arapiraca, cidade de clima semiárido, a ventilação natural e o sombreamento são diretrizes a serem seguidas no processo do planejamento urbano, a fim de gerar um microclima urbano com condições de conforto. Com base nos aspectos da porosidade e rugosidade, condicionantes climáticos com estreita relação com o eficaz aproveitamento da ventilação natural na malha urbana, o uso do recuo progressivo auxiliou na permeabilidade do fluxo de vento nos modelos simulados no *software* ENVI-met 4.0. Com relação ao sombreamento, tem-se a análise dos modelos com incidência da ventilação natural perpendicular ( $N=0^\circ$ ) e oblíqua ( $N=45^\circ$ ) às edificações, nesse caso, os cenários com orientação de incidência dos ventos predominantes oblíqua demonstrou condições de conforto mais favoráveis.

A análise dos resultados indicou também quanto à aplicabilidade do modelo de cidade compacta (que estimula o adensamento urbano por meio da verticalização a partir dos princípios do urbanismo bioclimático) em cidade de clima semiárido para o período quente/ seco. Nesse sentido, ainda não é possível determinar que o modelo de cidade compacta é aplicável em

realidade de clima semiárido, pois também é imprescindível analisar o período quente/ úmido, mas ficou evidente que a verticalização trouxe benefícios ao conforto térmico a nível urbano, pois gerou um perímetro maior de sombra e diminuiu a exposição solar direta nas vias e passeios.

Diante do objetivo proposto, os resultados obtidos estão coerentes com as estratégias bioclimáticas para a cidade de Arapiraca, apontadas por Silva (2019), todavia é preciso destacar que, de acordo com Brandão (2009), o cânion urbano não deve ser tratado somente a partir de sua geometria (relação H/W, que está diretamente relacionada com a porosidade e rugosidade), é preciso incluir no debate a sua composição, como é o caso dos espaços verdes, diferentes tipos de materiais para revestimento no solo e/ou edificações (albedo), e outros condicionantes do clima urbano. Pois, ao considerar que a qualidade ambiental urbana não depende de apenas uma variável climática, a forma urbana não deve estar pautada por apenas um parâmetro urbanístico. Portanto, ressalta-se a necessidade de revisão do Plano Diretor vigente em Arapiraca, pois a qualidade ambiental urbana da cidade se encontra vulnerável.

Conclui-se, que ao reconhecer o processo de verticalização como tendencial nos centros urbanos, torna-se imprescindível o estudo de como a legislação de uso e ocupação do solo, com base nos parâmetros urbanísticos, deve contribuir para o alcance da sustentabilidade urbana, de acordo com os princípios do urbanismo bioclimático. Nesse processo, destaca-se a importância da abordagem preditiva, através de simulações computacionais de cenários urbanos hipotéticos, por meio da ferramenta ENVI-met.

### **5.1 Limitações da pesquisa e apontamentos para trabalhos futuros**

Durante a pesquisa houve um ponto que limitou a abrangência e/ou aplicabilidade dos resultados obtidos: a versão do *software* ENVI-met 4.0 oferece uma dimensão de área de estudo limitada, o que impossibilitou a elaboração de cenários com edificações verticalizadas com maior número de pavimentos.

Outrossim, é possível apontar o desenvolvimento de futuras pesquisas em complemento à temática trabalhada, como: analisar o período quente/ úmido, de forma a comparar os resultados com o período quente/ seco analisado; analisar diferentes formatos de edificações verticalizadas; analisar o desempenho térmico de modelos com uso de diferentes materiais nas fachadas, coberturas e superfície do solo urbano; analisar outros padrões de largura das vias (relação H/W); analisar modelos com a inserção de vegetação na área urbana; analisar a variação de permeabilidade do solo urbano; analisar outros padrões de remembramentos dos

lotes; e analisar outros padrões de morfologia da quadra, com lotes de tamanhos diferentes dos tratados na presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS

\_\_\_\_\_. **ENVI-Met® model homepage 2019**. Disponível em: <<http://www.envi-met.com/>>. Acesso em: set. 2019.

\_\_\_\_\_. **ENVI-Met® model homepage 2020**. Disponível em: <<http://www.envi-met.com/>>. Acesso em: jan. 20.

\_\_\_\_\_. Lei Municipal nº 2.220, de 2001. **Institui Código de Obras e Edificações no Município de Arapiraca e dá outras Providências**. Disponível em: <<http://www.arapiraca.al.gov.br>>. Acesso em: abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Lei Municipal nº 5.593, de 8 de fevereiro de 2007. **Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió**. Disponível em: <<http://www.maceio.al.gov.br>>. Acesso em: abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Lei Complementar Municipal nº 041, de 20 de dezembro de 2013. **Altera os incisos 1 e 11 do artigo 84 e os quadros 02, 03, 07 e II do Anexo II da Lei Complementar nº 00512004, de 27 de julho de 2004, e dá outras providências**. Disponível em: <<https://caruaru.pe.gov.br>>. Acesso em: abr. 2019.

\_\_\_\_\_. Lei Municipal nº 3620/2008. **Institui o Plano Diretor Participativo do Município de Garanhuns, instrumento da política urbana e ambiental, e dá outras providências**. Disponível em: <<http://garanhuns.pe.gov.br>>. Acesso em: abr. 2019.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3:2005 - Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social**. Rio de Janeiro, 2005.

ACSELRAD, H. “Discurso da sustentabilidade urbana”, **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, ano 1, n. 1, 1999; ACSELRAD, Henri (org). *A duração das cidades: sustentabilidade e risco nas políticas urbanas*. 2ª edição. Rio de Janeiro, Ed. Lamparina, 2009.

ALCHAPAR, N. L.; PEZZUTO, C. C.; CORREA, E. N. Parâmetros urbanos morfo-materiales y su correlación con las temperaturas de aire en verano. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 4, p. 199-213, out./dez. 2018.

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** 216 (2016) 689 – 700.

BARAKAT, A.; AYAD, H.; EL-SAYED, Z. Urban design in favor of human thermal comfort for hot arid climate using advanced simulation methods. **Alexandria Engineering Journal**, (2017) 56, 533–543.

BARBIRATO, G. M., TORRES, S. C., BARBOSA, R. V. R. espaços livres e morfologia urbana: discussões sobre influências na qualidade climática e sustentabilidade urbana a partir de estudos em cidades no estado de Alagoas – Brasil. **Paisagem e Ambiente: ensaios** - n. 36 - São Paulo - p. 49 - 68 – 2015.

BARBOSA, R. V. R. **Vegetação Urbana: avaliação de seu desempenho térmico em recintos urbanos de Maceió-Alagoas**. Maceió, 2002. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Alagoas.

BARBOSA, A. **Urbanismo bioclimático: efeitos do desenho urbano na sensação térmica**. São Carlos, 2018. TESE (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de São Paulo.

BRANDÃO, L. K. de V. B. **Verticalização e Microclimas: estudo em fração urbana na cidade de Arapiraca-AL**. Arapiraca, 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Arquitetura e Urbanismo), Universidade Federal de Alagoas.

BRANDAO, L. K. De V.; SILVA, A. R. A.; BARBOSA, R. V. R. **A influência da verticalização no comportamento microclimático em cidade de clima semiárido**. In: Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional - ENANPUR, 18, 2019, Natal. Anais..., p. 1-18, 2019.

BRANDÃO, R. (2009) **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

BRASIL. Decreto nº 5.790, de 25 de maio de 2006. **Dispõe sobre a composição, estruturação, competências e funcionamento do Conselho das Cidades– ConCidades, e dá outras providências**. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/LEIS\\_2001/](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/LEIS_2001/)>. Acesso em: abr. 2019.

BRITTER, R.; HANNA, S. R. **Flow and dispersion in urban areas**. Annual Review of Fluid Mechanics, v. 35, p. 469–496, 2003.

BRUSE, M. ENVI-Met Website. Disponível em: <<http://www.envi-met.com>>. Acesso em: jul. 2019/ jan. 2020.

CARFAN, A. C.; GALVANI, E.; NERY, J. T. Study of the microclimate effect in the urban vertical structure in Ourinhos, São Paulo State. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 34, n. 3, p. 313-320, July-Sept., 2012.

DUARTE, D. Densidade e qualidade ambiental: o inevitável, o desejável e o possível. In: GALICIA, S.; FREIXANET, V. **Hábitat Sustentable**. México, D.F.: UAM Azcapotzalco, 2012. p.85-99.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de Ocupação do Solo e Microclimas Urbanos na Região de Clima Tropical Continental**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and urban planning**, 48, p. 31-44. 2000.

EMMANUEL, R.; FERNANDO, H. J. S. Urban Heat Island in Humid and Arid Climates: role of urban form and thermal properties in Colombo, Sri Lanka and Phoenix, USA. **Climate Research**, v. 34, n. 3, p. 241-251, 2007.

FANGER, P. O. (1972). Thermal Comfort. Analysis and Application in Environment Engineering. McGraw Hill Book Company, New York.

FAVRETTO, A. P. O.; SOUZA, L. C. L. A meta-analysis over geometric modeling simplifications in ENVI-met urban climate simulation. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 143-160, jan./mar. 2019.

FREITAS, R. **Entre Mitos e Limites**: as possibilidades de adensamento construtivo face à qualidade de vida no ambiente urbano. Recife: Ed. Universitária UFPE, 270p, 2005.

HUTTNER, S.; BRUSE, M. **Numerical modelling of the urban climate** – A preview on ENVI-met 4.0. In: The seventh International Conference on Urban Climate (ICUC-7), 29 June - 3 July 2009, Yokohama, Japan. Disponível em: <[http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended\\_abstracts/pdf/382880-2-090514010851-002.pdf](http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/extended_abstracts/pdf/382880-2-090514010851-002.pdf)>. Acesso em: abr. 2019.

GAAL, L. P. M. **Impacto da geometria urbana e da legislação de uso e ocupação do solo no microclima de cânions urbanos**. Campinas, 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas da Infraestrutura Urbana) Universidade Católica de Campinas.

GARTLAND, L. **Ilhas de Calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. Tradução Silvia Helena Gonçalves. São Paulo: Oficina de Textos 2010.

GIVONI, B. Climatic aspects of urban design in tropical climates. **Atmospheric Environment**, Oxford, v.26B, n.3, p.397-406. 1992.

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

GIVONI, B. Comfort climate analysis and building design guidelines, **Energy and Buildings**, 18(1), p.11-23.1992.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e a interface com a legislação urbanística a partir do caso Montes Claros, MG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 73-91, jan./mar. 2009.

GUSSON, C. dos S. **Efeito da densidade construída sobre o microclima urbano: construção de diferentes cenários possíveis e seus efeitos no microclima para a cidade de São Paulo, SP**. São Paulo, 2014. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de São Paulo.

GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S. Effects of Built Density and Urban Morphology on Urban Microclimate - Calibration of the Model ENVI-met V4 for the Subtropical Sao Paulo, Brazil. **Procedia Engineering**, 169 (2016) 2 – 10.

HIGUERAS, E. La ordenanza bioclimática de Tres Cantos, Madrid. Últimos avances en planificación ambiental y sostenible. En: **Revista de Urbanismo**, N°20, Santiago de Chile, publicación electrónica editada por el Departamento de Urbanismo, F.A.U. de la Universidad de Chile, junio de 2009, I.S.S.N. 0717-5051.

HIGUERAS, E. **Urbanismo bioclimático**. Barcelona: Gustavo Gili, 2006. 242 p.

HIGUERAS, E. **Urbanismo Bioclimático**: Criterios medioambientales en la ordenación de asentamientos. Cuadernos de Investigación Urbanística, Instituto Juan de Herrera, 1998.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Alagoas. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/panorama>> Acesso em: jan. 2019.

KLEEREKOPER, L.; VAN ESCH, M.; SALCEDO, T. B. How to Make a City ClimateProof, Addressing the Urban Heat Island Effect. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 64, p. 30-38, 2012.

KRÜGER, E. L.; GONZALEZ, D. E. G. Impactos da alteração no albedo das superfícies no microclima e nos níveis de conforto térmico de pedestres em cânions urbanos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 89-106, jul./set. 2016.

KUKREJA, C.P., **Tropical Architecture**. Nova Dheli: Ed. Tata McGraw-Hill, 1978.

LABEEE – Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina. Programa Computacional Analysis BIO, Versão: 2.1.3. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/downloads/software/analysis-bio>>. Acesso em: fev. 2019.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5a ed., São Paulo: Atlas, 2003.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**, PW Editores, São Paulo, 1997.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. 3º ed. Eletrobrás, 2014.

LI, J.; WANG, J.; WONG, N. H. Urban Micro-climate Research in High Density Cities. Case Study in Nanjing. **Procedia Engineering**, 169 (2016) 88 – 99.

MARTINS, T.A.; BONHOMME, M.; ADOLPHE, L. Análise do impacto da morfologia urbana na demanda estimada de energia das edificações: um estudo de caso na cidade de Maceió. **Ambiente Construído**, Porto Alegre. V.13, N.4, p.213-233. 2013.

MAUÁ, L. B. C.; GUADANHIM, S. J.; KANASHIRO, M. Ruas e a ocupação vertical recente: labirintos murados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, p. 73-96, abr./jun. 2017.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA. **Climatologia: noções básicas e clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

MI. **Ministério da Integração Nacional**. Nova Delimitação do Semi-Árido Brasileiro. 2005. Disponível em: <[http://www.mi.gov.br/c/document\\_library/get\\_file?uuid=0aa2b9b5aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915](http://www.mi.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=0aa2b9b5aa4d-4b55-a6e1-82faf0762763&groupId=24915)>. Acesso em: set. 2019.

MINELLA, F. C. O.; KRÜGER, E. L. Proposição do índice “fração vegetada” e sua relação com alterações na temperatura do ar e no conforto térmico no período diurno e em situação de verão para Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 353-371, jan./mar. 2017.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. São Paulo, 181p. Tese (Livre Docência em Geografia) — Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo. 1976.

MORAIS, L. S.; SILVA, P. C. M.; MEDEIROS, W. D. A. Análise do Processo de Verticalização na Área Urbana do Município de Mossoró-RN: aspectos jurídicos e ambientais. **Revista Verde De Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 2, n. 2, p. 171–182, 2007.

MOUDON, A. V. **Urban morphology as an emerging interdisciplinary field**. *Urban Morphology*, v. 1, n. 1, p. 3-10, 1997.

MUNIZ-GÄAL, L. P.; PEZZUTO, C. C.; CARVALHO, M. F. H. de; MOTA, L. T. M. Parâmetros urbanísticos e o conforto térmico de cânions urbanos: o exemplo de Campinas, SP. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 177-196, abr./jun. 2018.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L. de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade de ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73-87, jul./set. 2016.

NICHOLSON, S. E. A Pollution Model For streetLevel Air. **Atmospheric Environment**, v. 9, n. 1, p. 19-31, 1975.

NOGUEIRA, A. M. P. **Configuração Urbana e Microclimas: estudo em loteamento horizontal em Maceió - Alagoas**. Alagoas, 2011. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

NOGUEIRA, A. M. P.; ARAÚJO, I. A. L. de; BITTENCOURT, L. S.; RESTAINO, G. Impacto da verticalização no microclima urbano: o caso do bairro Guaxuma, em Maceió-AL, Brasil. **PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção**, Campinas, SP, v. 9, n. 2, p. 72-85, jun. 2018.

NUNES, A. M. L. A.; SILVA, M. F. da; BARBOSA, R. V. R. **Intensidade e direção predominante de ventos e precipitação para aplicação em projetos de arquitetura no agreste alagoano.** In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 15; Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído, 11, 2019, João Pessoa. Anais.... João Pessoa: ANTAC, 2019.

OLIVEIRA, P. M. P. de. **Cidade Adequada ao Clima:** A forma urbana como instrumento de controle do Clima Urbano. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade de Brasília. Brasília, 1988.

OKE, T. R. Advectively-assisted evapotranspiration from irrigated urban vegetation. **Boundary Layer Meteorology**, v. 17, p. 167–173, 1979.

OKE, T. R. **Boundary layer climates.** 2.ed. London: Routledge, 1987.

OKE, T. R. **Boundary layer climates.** 2.ed. New York: Routledge, 1996, 435p.

OKE, T. R. Canyon Geometry and the Nocturnal Heat Island: comparisons of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v. 1, n. 3, p. 237-254, jul./set. 1981.

OKE, T. R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.** World Meteorological Organization, Instruments and Observing Methods, Report n° 81, n° 1250. Canadá: WMO/TD, 2006.

OKE, T. R. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: AIR POLLUTION MODELING AND ITS APPLICATION XVII, Borrego, C. and A. L. Norman (eds), Springer, 2004.

OKE, T. R. The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. **Atmosphere**, v. 14, p. 268-277, 1976.

OKE, T. R. The heat island of the urban boundary layer: Characteristics, causes and effects. In Cermak, J. E. et al. (eds.), **Wind Climate in Cities**, Kluwer Academic Publishers, 81-107, 1995.

Oke T.R., The urban energy balance. **Progress in Physical Geography**, Vol. 2(4), 1988, pp. 471- 508.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ARAPIRACA. **Plano diretor participativo**. Lei nº2424 de janeiro de 2006.

ROGERS, R.; GUMUCHDJIAN, P. **Cidades para um pequeno planeta**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 2001.

ROMERO, M. A. B. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. Brasília, Editora da UnB, 2001.

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.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo, ProEditores, 2000.

RORIZ, M.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Uma proposta de norma técnica brasileira sobre desempenho térmico de habitações populares. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 5. Fortaleza, 1999. Disponível em: <[http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento\\_NBR15220.pdf](http://www.labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/Zoneamento_NBR15220.pdf)>. Acesso em: nov. de 2019.

SCUSSEL, M. C. B.; SATTLER, M. A. Cidades em (trans)formação: impacto da verticalização e densificação na qualidade do espaço residencial. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 137-150, jul./set. 2010.

SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 197-215, abr./jun. 2018.

SILVA, E. V. **Estudo do impacto dos parâmetros construtivos no microclima urbano em bairro residencial de Juiz de Fora, MG**. Juiz de Fora, 2012. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído) Universidade Federal de Juiz de Fora.

SILVA JUNIOR, E. R. **Urbanismo Paramétrico: Experimentos para uma cidade compacta e sustentável**. SIGraDi 2016, XX Congress of the Iberoamerican Society of Digital Graphics 9-11, Buenos Aires, Argentina, November, 2016.

SILVA, M. F. da. **Estratégias bioclimáticas para seis cidades alagoanas**: contribuições para a adequação da arquitetura ao clima local. Alagoas, 2019. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Alagoas.

SOBREIRA, L. C.; LEDER, S. M.; SILVA, F. DE A. G. DA; ROSA, P. R. DE O. Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa, PB. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 2, p. 125-138, abr./jun. 2011.

SOUZA, L. C.; TENTE, C.M; GIUNTA, M.B.; NAKATA, C.M. Fator de visão do céu e intensidade de ilhas de calor na escala do pedestre. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 4, p. 155-167, 2010.

SOUZA, V. M. B. de. **A Influência da Ocupação do Solo no Comportamento da Ventilação Natural e na Eficiência Energética em Edificações**. Estudo de Caso em Goiânia – Clima Tropical de Altitude. 2006. 260 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura, Universidade de Brasília, Brasília.

TALEB, D.; ABU-HIJLEH, B. Urban heat islands: Potential effect of organic and structured urban configurations on temperature variations in Dubai, UAE. **Renewable Energy**, 50 (2013) 747-762.

TORK, L. D.; TIBIRIÇÁ, A. C. G.; TIBIRIÇÁ, Á. M. B. Análise da ventilação natural conforme planos diretores: resultados de pesquisa em Belém, PA. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 1, p. 329-351, jan./mar. 2017. ISSN 1678-8621

TORRES, S. C. (2017) **Forma e Conforto**: estratégias para (re)pensar 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.

UGEDA JÚNIOR, J. C.; AMORIM, M. C. C. T. Reflexões acerca do Sistema Clima Urbano e sua Aplicabilidade: pressupostos teórico-metodológicos e inovações técnicas. **Revista do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo**, volume especial (2016), p.160-173, 2016.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division (2019). **World Urbanization Prospects 2018: Highlights** (ST/ESA /SER.A /352).

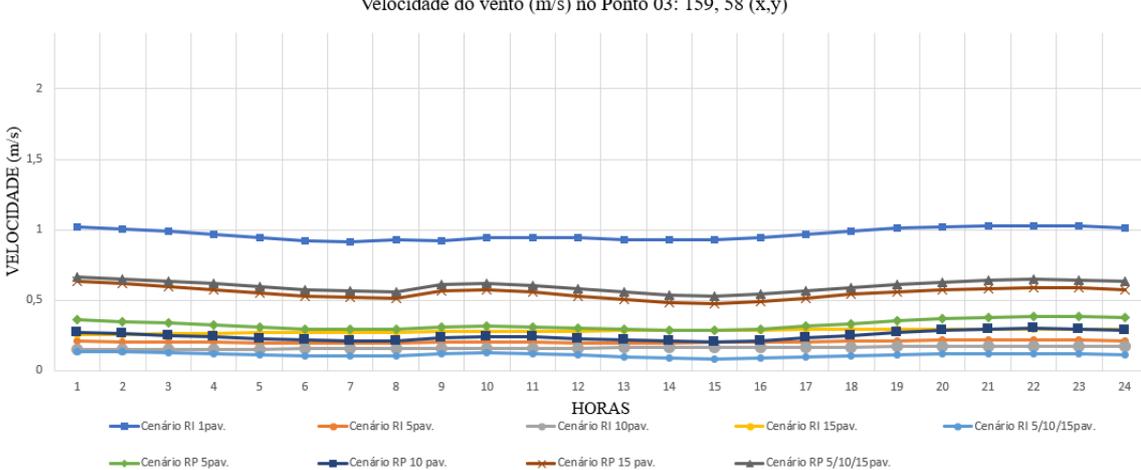
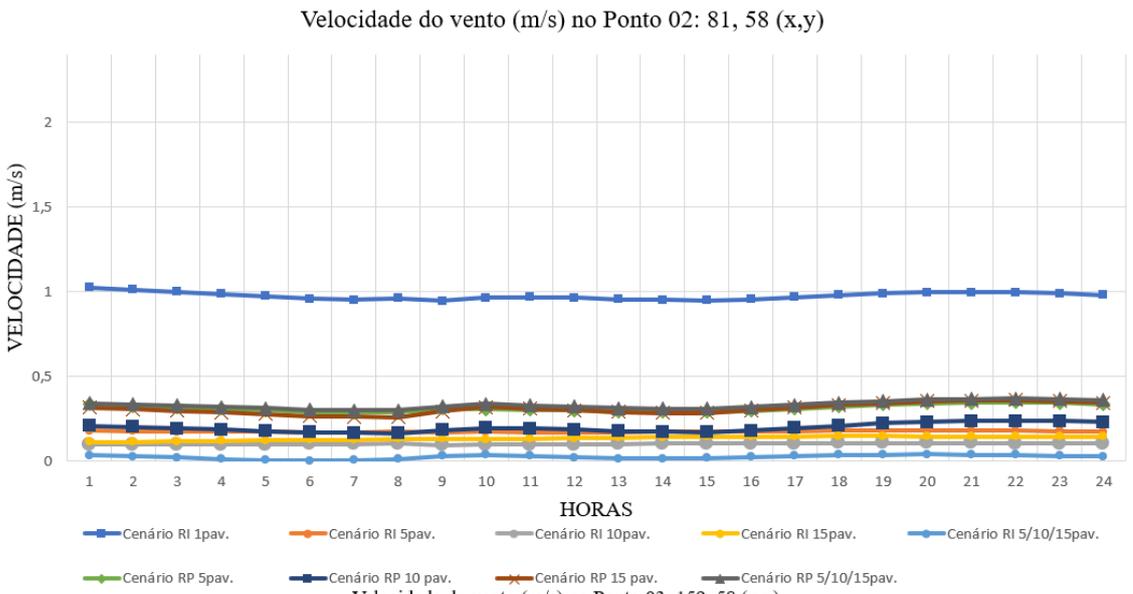
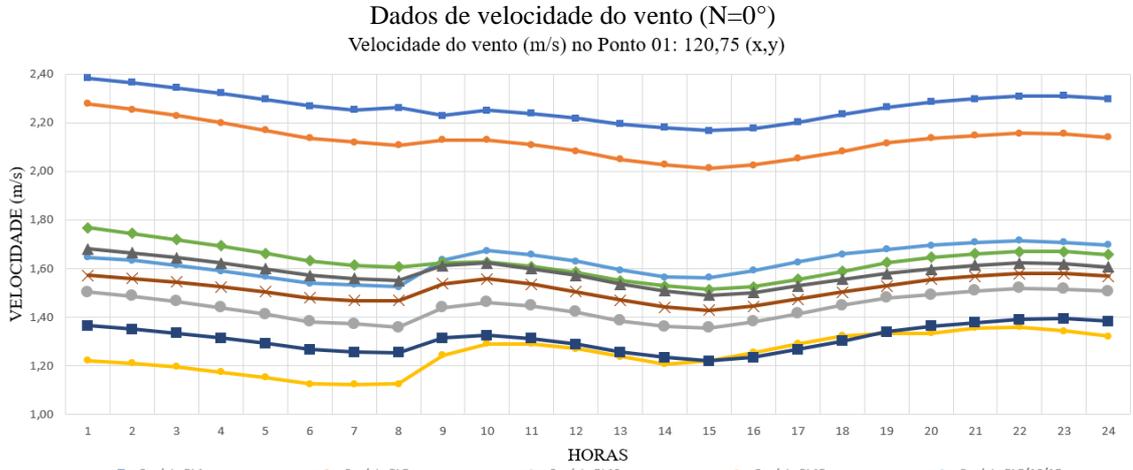
VILLAS BOAS, M. **Ventilação em arquitetura**. 1983. 65f. Monografia Faculdade de Arquitetura UNB, Brasília.

VILLAS BOAS, M. **Considerações sobre urbanização e meio ambiente físico.** 1979. 10f. UNB, Brasília.

WERNECK, D. R. **Estratégias de mitigação das ilhas de calor urbanas:** estudo de caso em áreas comerciais em Brasília - DF. Brasília, 2018. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de Brasília.

YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. **Building and Environment**, 60 (2013) 93-104.

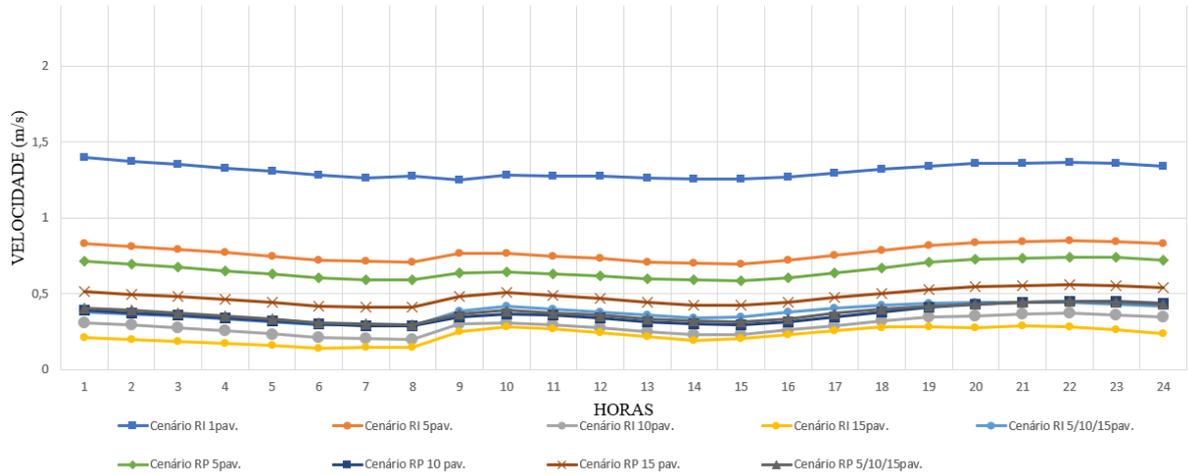
**APÊNDICE A – Gráficos de velocidade dos ventos dos cenários urbanos hipotéticos (N=0°/45°)**



(continua)

(continuação)

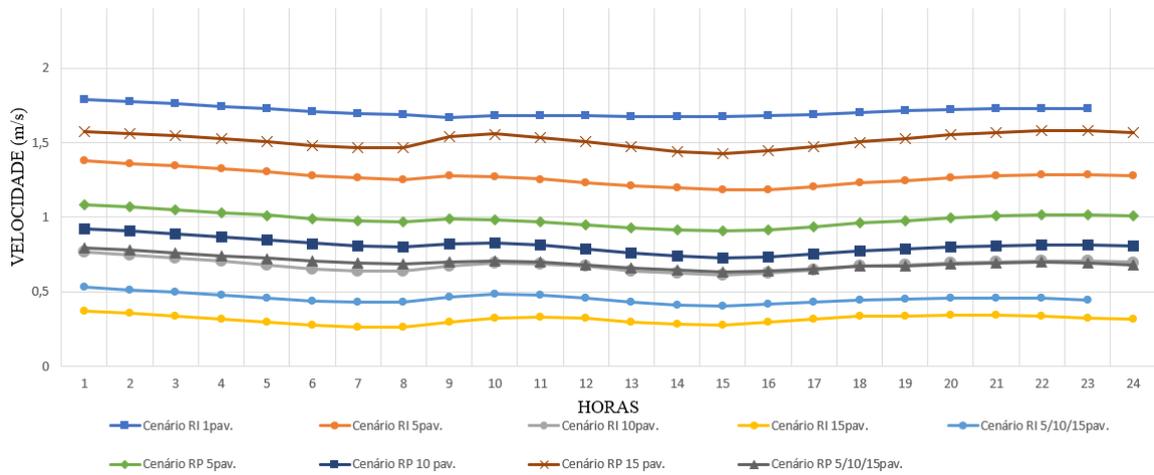
Velocidade do vento (m/s) no Ponto 04: 120, 57 (x,y)



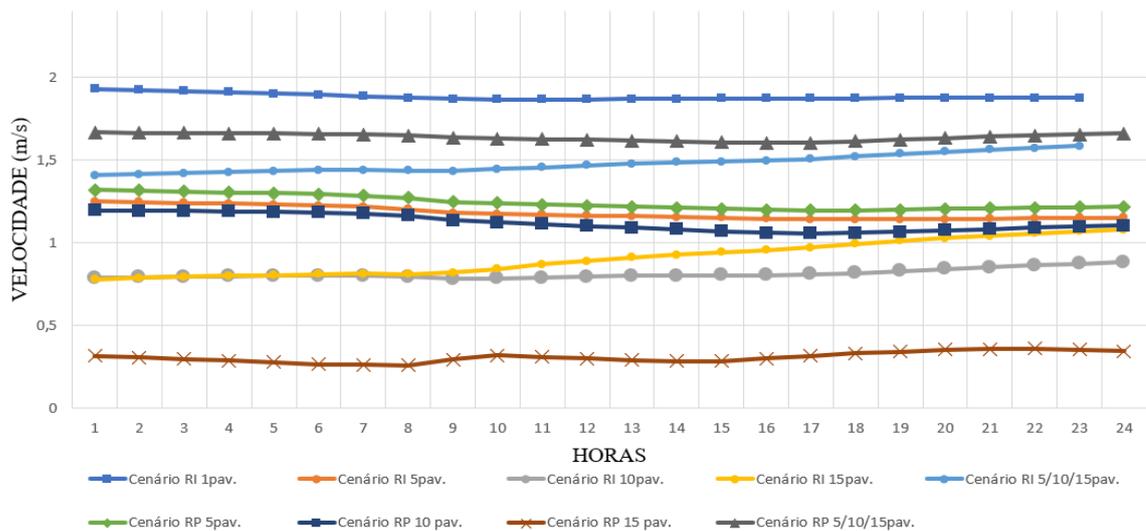
Fonte: Elaborado pela autora, 2020

Dados de velocidade do vento (N=45°)

Velocidade do vento (m/s) no Ponto 01: 120,75 (x,y)



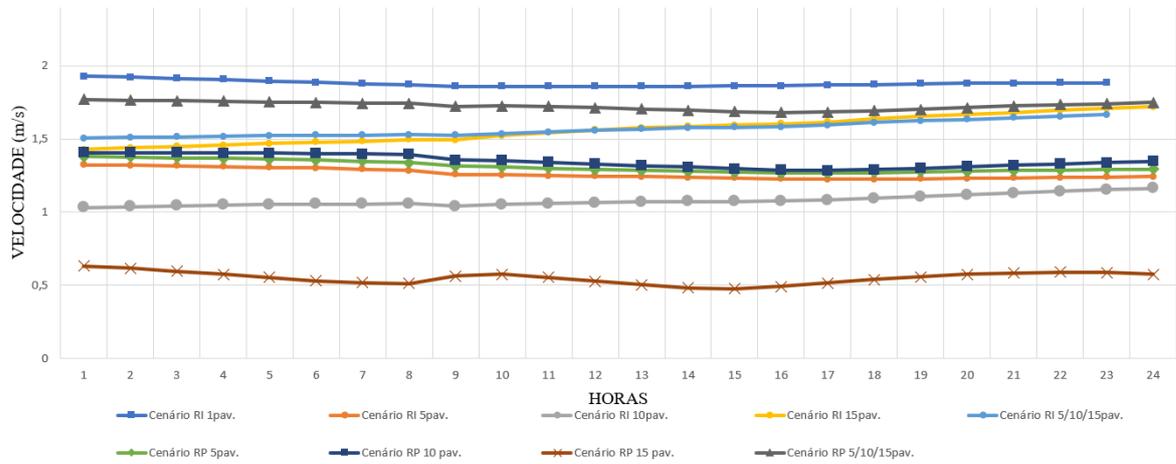
Velocidade do vento (m/s) no Ponto 02: 81, 58 (x,y)



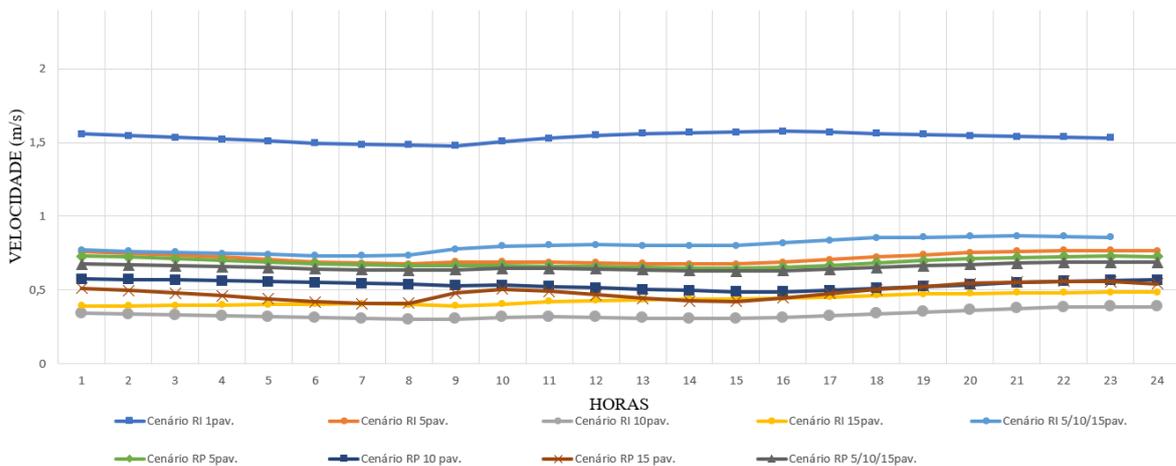
(continua)

(continuação)

Velocidade do vento (m/s) no Ponto 03: 159, 58 (x,y)



Velocidade do vento (m/s) no Ponto 04: 120, 57 (x,y)



Fonte: Elaborado pela autora, 2020