

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS:
ESTUDO DE CASO EM ÁREAS COMERCIAIS EM BRASÍLIA - DF.

Daniela Rocha Werneck
Orientador: Prof. Titular Dra. Marta Adriana Bustos Romero

BRASÍLIA/DF
Fevereiro de 2018

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

**ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS:
ESTUDO DE CASO EM ÁREAS COMERCIAIS EM BRASÍLIA - DF.**

Daniela Rocha Werneck

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre.

APROVADA POR:

Prof. Marta Adriana Bustos Romero, Dr. (PPG-FAU/UnB)
(Orientador)

Prof. Gustavo de Luna Sales, Dr. (FAU/UnB)
(Examinador Externo)

Prof. Caio Frederico e Silva, Dr. (PPG-FAU/UnB)
(Examinador Interno)

BRASÍLIA/DF
Fevereiro de 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

WERNECK, DANIELA ROCHA
ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS: ESTUDO DE CASO EM ÁREAS COMERCIAIS EM BRASÍLIA - DF.

[Distrito Federal] 2018.

xvii, 118p., 210 x 297 mm (PPG-FAU/UnB, Mestre, Arquitetura e Urbanismo, 2018).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

- | | |
|-----------------------------|--------------------------|
| 1. Ilha de calor urbana | 2. Calibração Envi-met 4 |
| 3. Simulação microclimática | 4. Materiais frios |
| 5. Plinths | |

I. FAU/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

WERNECK, D. R. (2018). ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS: ESTUDO DE CASO EM ÁREAS COMERCIAIS EM BRASÍLIA - DF.

Dissertação de Mestrado em Arquitetura e Urbanismo. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 118p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Daniela Rocha Werneck

TÍTULO: ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO DAS ILHAS DE CALOR URBANAS: ESTUDO DE CASO EM ÁREAS COMERCIAIS EM BRASÍLIA - DF. GRAU: Mestre ANO: 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Daniela Rocha Werneck

SQN 402, Bloco E

70.834-050 Brasília – DF - Brasil

e-mail: daniela.werneck@gmail.com

EPÍGRAFE

A ARQUITETURA COMO CONSTRUIR PORTAS,
DE ABRIR; OU COMO CONSTRUIR O ABERTO;
CONSTRUIR, NÃO COMO ILHAR E PRENDER,
NEM CONSTRUIR COMO FECHAR SECRETOS;
CONSTRUIR PORTAS ABERTAS, EM PORTAS;
CASAS EXCLUSIVAMENTE PORTAS E TECTO.
O ARQUITETO: O QUE ABRE PARA O HOMEM
(TUDO SE SANEARIA DESDE CASAS ABERTAS)
PORTAS POR-ONDE, JAMAIS PORTAS-CONTRA;
POR ONDE, LIVRES: AR LUZ RAZÃO CERTA.

ATÉ QUE, TANTOS LIVRES O AMEDRONTANDO,
RENGOU DAR A VIVER NO CLARO E ABERTO.
ONDE VÃOS DE ABRIR, ELE FOI AMURANDO
OPACOS DE FECHAR; ONDE VIDRO, CONCRETO;
ATÉ FECHAR O HOMEM: NA CAPELA ÚTERO,
COM CONFORTOS DE MATRIZ, OUTRA VEZ FETO.

(NETO, JOÃO CABRAL DE MELO. “FÁBULA DE UM
ARQUITETO”, P.345-346)

AGRADECIMENTOS

Nós somos o resultado de incontáveis interações ao longo desta incrível jornada que chamamos de vida. Este trabalho e muito de mim mesma são produto da convivência com pessoas maravilhosas que se materializa não só nestas páginas, mas também na pessoa que eu serei daqui em diante. Este é um singelo reconhecimento a todas estas pessoas que de alguma forma contribuíram nisso.

Agradeço a Deus por ter me apresentado grandes desafios para depois, pouco a pouco, revelar que seria possível superá-los com Sua ajuda.

Agradeço também à minha orientadora Marta Romero que me acolheu desde meu primeiro contato e desde então tem sido orientadora e motivadora.

Agradeço ao meu marido Fred, que sempre me apoiou neste e em vários outros projetos.

Aos meus queridos pais, meu irmão Daniel e minha irmã Brunna, que me recebeu com carinho em sua casa, sendo verdadeira amiga não apenas pelo período do Mestrado, mas desde minhas mais antigas lembranças de vida.

Por fim, agradeço aos meus colegas, professores e funcionários do PPG/FAU da UnB que pacientemente dividiram comigo minhas dificuldades (e também as suas próprias) tornando nossas jornadas muito mais leves. À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

Os padrões de desenvolvimento urbano produzem muitos impactos relacionados ao clima urbano, destacando o fenômeno de ilha de calor urbana (ICU). Este estudo investiga áreas destinadas ao comércio local com enfoque na mitigação de ICU de superfície na escala microclimática. Os locais selecionados para estudos de casos estão no Plano Piloto de Brasília-DF, localizado em uma região de clima Tropical de Altitude com estações quente-úmida e quente-seca. Esta proposta se insere na discussão da importância dos espaços públicos na escala do pedestre, mais precisamente onde se desenvolve as atividades da vida urbana, entre o nível térreo dos edifícios e as áreas públicas, também chamado de *plinth*s. Os usuários estão sujeitos às variações tanto de conforto quanto desconforto ambiental, em particular o térmico. Os procedimentos metodológicos deste trabalho se baseiam na revisão de literatura (clima urbano, espaço público, materiais frios, ICU e simulação microclimática), na análise de temperaturas superficiais intra-urbanas com utilização de imagens do satélite Landsat 8 (banda termal) para delimitação dos locais de estudo e simulação microclimática com o software ENVI-met 4. O programa foi validado com base em medições em campo de temperatura do ar e umidade relativa do ar, apresentando desempenho satisfatório quando comparados os dados simulados com os dados medidos em campo. Três cenários hipotéticos foram simulados com uso de materiais frios (alto refletância e emitância térmica) e vegetação para análise de impacto na temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante. Os resultados mostraram uma redução média máxima de $-0,38$ °C na temperatura do ar, evidenciando que as estratégias mitigadoras tiveram maior impacto na redução pontual da temperatura do ar que, foi de no máximo $-1,13$ °C. A estratégia que combinou pavimentos frios e sombreamento com arborização respondeu melhor à variação da temperatura média radiante. Já o cenário com coberturas frias teve um impacto muito pequeno na redução da temperatura do ar no nível do pedestre nas condições analisadas.

Palavras-chaves: ilha de calor urbana, calibração Envi-met 4, simulação microclimática, materiais frios, *plinth*s

ABSTRACT

The patterns of urban development produce many impacts related to urban climate, notably the urban heat island (UHI) phenomenon. This study investigates designated areas of local commerce with focus on mitigation of surface UHI and their effect on microclimatic aspects at the pedestrian level. The selected places for study cases are located at the Pilot Plan of Brasilia, DF, Brazil, a region of tropical altitude climate with hot-humid and hot-dry seasons. This proposal is related with the discussion of the importance of public spaces at pedestrian scale, more precisely where the activities of urban life take place, also known as plinths. Users are subject to variations of both comfort and discomfort, particularly thermal comfort. The methodological procedures of this study are based on literature revision (urban climate, public space, cool materials, UHI and computer simulation), analysis of intra-urban surface temperatures supported by Landsat 8 satellite imagery (thermal band) for delimitation of study areas and microclimatic simulations with ENVI-met 4.2. Different hypothetical scenarios were simulated with usage of cool materials (high thermal reflectance and emittance) and vegetation for effect analysis on air temperature reduction. Results showed a maximum average air temperature decrease of -0.38°C , pointing that mitigating strategies had greater impact in local air temperature reduction, which was, at maximum, -1.13°C . The strategy that combined cool pavements and tree shading presented better response to mean radiant temperature variation. On its turn, the scenario of cool roofs presented a slight reduction in terms of air temperature at the pedestrian level for the analyzed conditions.

Keywords: urban heat island, Envi-met 4 calibration, microclimate simulation, cool materials, plinths

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	PROBLEMA	3
1.2	JUSTIFICATIVA	4
1.3	OBJETIVOS	7
1.3.1	<i>Objetivo geral</i>	7
1.3.2	<i>Objetivos específicos</i>	7
1.4	MÉTODOS	7
2	CLIMA URBANO	11
2.1	DEFINIÇÃO DE CLIMA URBANO	12
2.1.1	<i>Escalas climáticas</i>	13
2.1.2	<i>Fatores e elementos climáticos</i>	16
2.2	O MICROCLIMA URBANO	16
2.2.1	<i>Radiação solar no ambiente urbano</i>	18
2.2.2	<i>Geometria urbana</i>	21
2.2.3	<i>Ventilação urbana</i>	22
2.2.4	<i>Influência das áreas verdes no microclima urbano</i>	24
2.2.5	<i>Calor antropogênico</i>	25
2.3	ILHA DE CALOR URBANA	26
2.3.1	<i>Monitoramento de ilhas de calor</i>	30
2.4	MITIGAÇÃO DE ICU PARA MELHORIA DO MICROCLIMA URBANO: O PAPEL DOS MATERIAIS FRIOS	32
2.4.1	<i>Pavimentos frios</i>	34
2.4.2	<i>Coberturas frias</i>	37
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	38
3	BRASÍLIA: CONTEXTO URBANO E CLIMÁTICO	40
3.1	CONTEXTO URBANO	41
3.2	O COMÉRCIO LOCAL	43
3.2.1	<i>Estratégias para os Plinths</i>	47
3.3	CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DE BRASÍLIA	48
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	51
4	APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ESTUDOS DE MICROCLIMAS	53
4.1	MODELAGEM MICROCLIMÁTICA COM ENVI-MET 4	55
4.1.1	<i>Processo de simulação do programa ENVI-met 4</i>	56
4.1.2	<i>O ambiente de modelagem: Spaces</i>	57
4.1.3	<i>Banco de dados</i>	58
4.1.4	<i>Editor de modelos de vegetação 3D: Albero</i>	58

4.1.5	<i>Extração dos resultados</i>	59
4.2	VALIDAÇÃO DO MODELO	60
4.3	PESQUISAS COM BASE EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O ENVI-MET	60
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	62
5	PESQUISA DE CAMPO E SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA	63
5.1	FASE PREPARATÓRIA	65
5.1.1	<i>Seleção de recortes urbanos para estudo</i>	65
5.1.2	<i>Levantamento dos dados para arquivo climático de Brasília</i>	73
5.2	FASE DE CALIBRAÇÃO E CAMPANHAS DE MEDIÇÃO EM CAMPO: ESTUDOS PILOTOS	73
5.2.1	<i>Calibração para o período quente-úmido – estudo piloto 1</i>	77
5.2.2	<i>Calibração para o período quente-seco – estudo piloto 2</i>	80
5.3	FASE DE SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE ICU.....	82
5.3.1	<i>Construção dos cenários para simulação microclimática</i>	82
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	86
6.1	VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO ENTRE DADOS MEDIDOS E SIMULADOS	87
6.1.1	<i>Validação da calibração do ENVI-met 4.2: Período quente-úmido</i>	87
6.1.2	<i>Validação da calibração do ENVI-met 4.2: Período quente-seco</i>	88
6.2	ANÁLISE DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS.....	91
6.2.1	<i>Área de estudo 1: CLN 202-203 – Asa Norte</i>	91
6.2.2	<i>Área de estudo 2: CLS 113-114 – Asa Sul</i>	97
6.2.3	<i>Discussões</i>	103
7	CONCLUSÕES	105
7.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	107
7.2	PERSPECTIVAS PARA ESTUDOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS.....	110
	APÊNDICE I.....	115
	APÊNDICE II.....	117

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ESFERA PÚBLICA.....	6
FIGURA 2 – CAMPO CONCEITUAL DA PESQUISA.....	6
FIGURA 3 – ESQUEMATIZAÇÃO DAS ETAPAS DA PESQUISA.	7
FIGURA 4 - EXEMPLO DO AMBIENTE URBANO HETEROGÊNEO DE BRASÍLIA: PLANO PILOTO (A, B, C E D) E REGIÃO ADMINISTRATIVA ITAPOÃ (E).....	18
FIGURA 5 – INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR COM A ATMOSFERA, NÚVENS E SUPERFÍCIE TERRESTRE.	19
FIGURA 6 – ESPECTRO ELETROMAGNÉTICO.	19
FIGURA 7 – ESQUEMA DA SEÇÃO DE UM CÂNION URBANO E RELAÇÃO W/H.....	22
FIGURA 8 – VELOCIDADE DO VENTO E RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE.....	23
FIGURA 9 – ESTUDO DE VENTILAÇÃO SQN 308 – BRASÍLIA – DF.	23
FIGURA 10 – RECOBRIMENTO DO SOLO E CAPACIDADE DE INFILTRAÇÃO DE ÁGUA.....	24
FIGURA 11 – (A E B) PRESENÇA DE EQUIPAMENTOS DE AR CONDICIONADO NO NÍVEL DAS CALÇADAS NO CLN303.....	25
FIGURA 12 - ILHA DE CALOR URBANA ATMOSFÉRICA	27
FIGURA 13 – ESCALAS DE INFLUÊNCIA DA ICU.....	28
FIGURA 14 – MAPA DE TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE EM ÁREA DE EXPANSÃO URBANA EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – SP OBSERVADAS PELO SENSOR HSS EM 31/05/2006.....	32
FIGURA 15 – COMPORTAMENTO DOS MATERIAIS	34
FIGURA 16 – REFLETÂNCIA SOLAR DE PAVIMENTOS CONVENCIONAIS DE ACORDO COM A IDADE.	35
FIGURA 17 – APLICAÇÃO DE REVESTIMENTO FRESCO SOBRE RUA ASFALTADA EM LOS ANGELES – EUA.....	36
FIGURA 18 – GRÁFICO DE TEMPERATURAS SUPERFICIAIS DAS AMOSTRAS DE TINTAS CONVENCIONAIS E REFLETIVAS.	38
FIGURA 19 – FATORES QUE INFLUENCIAM A FORMAÇÃO DE MICROCLIMAS URBANOS.	39
FIGURA 20 – LOCALIZAÇÃO DE BRASÍLIA E EXEMPLO DAS QUATRO ESCALAS: (1) MONUMENTAL, (2) BUCÓLICA, (3) RESIDENCIAL E (4) GREGÁRIA.	41
FIGURA 21 – DESENHO DE LUCIO COSTA PARA O COMÉRCIO LOCAL	44
FIGURA 22 – COMÉRCIO LOCAL NORTE EM BLOCOS ISOLADOS E USO MISTO	45
FIGURA 23 - COMÉRCIO LOCAL SUL.....	45
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO DO CLS (ESQUERDA DA IMAGEM) E DO CLN (DIREITA DA IMAGEM).....	46

FIGURA 25 – BLOCO DE CARNAVAL EM UMA COMERCIAL DA ASA NORTE	46
FIGURA 26 – TEMPERATURA MÉDIA MÁXIMA DO AR.	49
FIGURA 27 – TEMPERATURA MÉDIA MÍNIMA DO AR.....	49
FIGURA 28 – MÉDIA DA UMIDADE RELATIVA DO AR.....	50
FIGURA 29 – MÉDIA DO VALOR DA PRECIPITAÇÃO TOTAL.....	50
FIGURA 30 – UMIDADE RELATIVA X TEMPERATURA MÁXIMA DO AR PARA DIA DE INVERNO EM BRASÍLIA (24/07/2009)	50
FIGURA 31 – VELOCIDADE MÉDIA MENSAL DO VENTO EM BRASÍLIA (M/S) E DIREÇÕES PREDOMINANTES – SÉRIE 2001-2013.....	51
FIGURA 32 – REPRESENTAÇÃO GENÉRICA DE UM FENÔMENO A SER ANALISADO	54
FIGURA 33 – ESQUEMA DA ESTRUTURA DO MODELO NO ENVI-MET	56
FIGURA 34 – FLUXO DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO NO ENVI-MET 4	57
FIGURA 35 – BARRA DE TAREFAS ENVI-MET 4.....	57
FIGURA 36 – AMBIENTE DE MODELAGEM DO ENVI-MET 4.....	58
FIGURA 37 – EDIÇÃO DE MODELO DE VEGETAÇÃO NO ALBERO.	59
FIGURA 38 – INTERFACE DO PROGRAMA LEONARDO VERSÃO 4.....	59
FIGURA 39 – FLUXOGRAMA DAS FASES INTEGRANTES DO TRABALHO.....	64
FIGURA 40 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO MÉTODO PARA OBTENÇÃO DE MAPA DE TEMPERATURA SUPERFICIAL.	66
FIGURA 41 – TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE DE BRASÍLIA DERIVADA DA IMAGEM DO SATÉLITE LANDSAT 8 EM 21/09/2015 ÀS 13:14H GMT E IMAGEM PANCROMÁTICA CORRESPONDENTE.	68
FIGURA 42 – ILUSTRAÇÃO COM A LOCALIZAÇÃO DOS ESTUDOS DE CASOS.	70
FIGURA 43 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS CAMPANHAS DE MEDIÇÃO: A) TERMOHIGRÔMETRO HT-270 E B) REGISTRADOR DE TEMPERATURA DO AR HOBO MX100	74
FIGURA 44 – PONTO DE MEDIÇÃO FIXA DO ESTUDO PILOTO 2 DESTACANDO O ABRIGO METEOROLÓGICO UTILIZADO PARA PROTEGER O DA.....	75
FIGURA 45 – FLUXOGRAMA PARA PROCESSO DE CALIBRAÇÃO ENVI-MET 4	76
FIGURA 46 – ÁREA SELECIONADA PARA O ESTUDO PILOTO 1.....	77
FIGURA 47 – EDIÇÃO DE SISTEMA CONSTRUTIVO DAS PAREDES.....	78
FIGURA 48 – CONFIGURAÇÃO DO MODELO PARA A VILA PLANALTO	78
FIGURA 49 – EDIÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS	78

FIGURA 50 – MODELAGEM DA ÁREA DE ESTUDO NA VILA PLANALTO EM PLANTA (A) E 3 D (B).	79
FIGURA 51 – ÁREA SELECIONADA PARA O ESTUDO PILOTO 2.....	80
FIGURA 52 – MODELAGEM DA ÁREA DE CALIBRAÇÃO SQN402.....	81
FIGURA 53 – MODELAGENS DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 1 (CLN201- 201).....	83
FIGURA 54 – MODELAGENS DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 2: CLS 113- 114.....	83
FIGURA 55 – PERFIL LAD PROPOSTO PARA A ESPÉCIE ARBÓREA <i>LICANIA TOMENTOSA</i>	85
FIGURA 56 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E SIMULADOS PARA TEMPERATURA DO AR NA ALTURA DE 1,50 METROS (INMET = 2,0 METROS).	87
FIGURA 57 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES MEDIDOS E SIMULADOS PARA UMIDADE RELATIVA DO AR	88
FIGURA 58 – GRÁFICO COM RESULTADOS INICIAIS DA CALIBRAÇÃO PARA O PERÍODO QUENTE- SECO.....	88
FIGURA 59 – GRÁFICO DE UMIDADE RELATIVA DO AR DA CALIBRAÇÃO DO PERÍODO QUENTE- SECO.....	89
FIGURA 60 – GRÁFICO COM RESULTADOS FINAIS DA CALIBRAÇÃO PARA O PERÍODO QUENTE- SECO.....	90
FIGURA 61 – MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR REFERENTE AOS CENÁRIOS SIMULADOS NO NÍVEL DE 1,50 M ACIMA DO SOLO PARA O PERÍODO QUENTE-SECO.....	92
FIGURA 62 - CENÁRIO 3 DO CLN 201-202: MAPA COMPARATIVO COM DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL EM PLANTA (ALTURA = 1,5M) E VERTICAL EM CORTE DOS VALORES DAS DIFERENÇAS DA TEMPERATURA DO AR ENTRE OS CENÁRIOS 3 E 0 PARA OS PERÍODOS QUENTE-SECO E QUENTE-ÚMIDO.	93
FIGURA 63 – CENÁRIO 2 DO CLN 201-202: MAPA COMPARATIVO COM DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL EM PLANTA (ALTURA = 1,5M) E VERTICAL EM CORTE DOS VALORES DAS DIFERENÇAS DA TEMPERATURA DO AR ENTRE OS CENÁRIOS 2 E 0 PARA OS PERÍODOS QUENTE-SECO E QUENTE-ÚMIDO.	94
FIGURA 64 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE REFERENTE AOS CENÁRIOS SIMULADOS PARA O PERÍODO QUENTE-SECO.....	95
FIGURA 65 – MAPA COMPARATIVO COM DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE SIMULADA NA ÁREA DE ESTUDO 1 ENTRE OS CENÁRIOS 0 – 2 E 0 – 3.....	96
FIGURA 66 – MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE PARA O PERÍODO QUENTE-SECO. ALTURA DE REFERÊNCIA = 1,5M.....	97
FIGURA 67 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DO AR REFERENTE AOS CENÁRIOS SIMULADOS NO NÍVEL DE 1,50 M ACIMA DO SOLO PARA O PERÍODO QUENTE-SECO.....	98

FIGURA 68 - CENÁRIO 2 DO CLS 113-114: MAPA COMPARATIVO COM DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL EM PLANTA (ALTURA = 1,5M) E VERTICAL EM CORTE DOS VALORES DAS DIFERENÇAS DA TEMPERATURA DO AR ENTRE OS CENÁRIOS 2 E 0 PARA OS PERÍODOS QUENTE-SECO E QUENTE-ÚMIDO.	99
FIGURA 69 - CENÁRIO 3 DO CLS 113-114: DISTRIBUIÇÃO HORIZONTAL EM PLANTA (ALTURA = 1,5M) E VERTICAL EM CORTE DOS VALORES DAS DIFERENÇAS DA TEMPERATURA DO AR ENTRE OS CENÁRIOS 3 E 0 PARA OS PERÍODOS QUENTE-SECO E QUENTE-ÚMIDO.....	100
FIGURA 71 – MAPAS COMPARATIVOS COM DISTRIBUIÇÃO DO POTENCIAL DE REDUÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE SIMULADA NA ÁREA DE ESTUDO 2.....	101
FIGURA 70 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE REFERENTE AOS CENÁRIOS SIMULADOS PARA O PERÍODO QUENTE-SECO.....	101
FIGURA 72 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA RADIANTE PARA O PERÍODO QUENTE-SECO. ALTURA DE REFERÊNCIA = 1,5M.....	102

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – ALBEDO DE MATERIAIS URBANOS	20
TABELA 2 – TABELA SÍNTESE COM DESCRIÇÃO E ANÁLISES DE VENTILAÇÃO E SOMBREAMENTO DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	71
TABELA 3 – PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO (REF. DIA 21/01/2017)	80
TABELA 4 - PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA SIMULAÇÃO (REF. DIA 04/09/2017)	82
TABELA 5 – CENÁRIOS HIPOTÉTICOS PARA SIMULAÇÃO	82
TABELA 6 – CONFIGURAÇÃO NO ENVI-MET DOS DADOS CORRESPONDENTES À CARACTERIZAÇÃO ORIGINAL DAS ÁREAS DE ESTUDO.....	83
TABELA 7 – CARACTERÍSTICAS DA ESPÉCIE ARBÓREA SELECIONADA PARA O CENÁRIO 3.....	85
TABELA 8 – ÁREA DE ESTUDO 1: RESUMO DAS DIFERENÇAS DAS MÉDIAS DE TEMPERATURA DO AR SIMULADAS ENTRE OS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO E O CENÁRIO 0 (CONTROLE). ALTURA DE REFERÊNCIA = 1,5M.....	91
TABELA 9 – ÁREA DE ESTUDO 2: RESUMO DAS DIFERENÇAS DAS MÉDIAS DE TEMPERATURA DO AR SIMULADAS ENTRE OS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO E O CENÁRIO 0 (CONTROLE). ALTURA DE REFERÊNCIA = 1,5M.....	98

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – ESCALAS GEOGRÁFICAS DO CLIMA E SUAS ARTICULAÇÕES COM O CLIMA URBANO	14
QUADRO 2 – MÉTODO KATZSCHNER	15
QUADRO 3 - ILHA DE CALOR URBANA DE SUPERFÍCIE E ATMOSFÉRICA	28
QUADRO 4 – CARACTERIZAÇÃO DAS ÁREAS DE ESTUDO	72

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CDU – Camada dossel urbano

CLN – Comércio local Norte

CLS – Comércio local Sul

CLU – Camada limite urbana

EPA – Environmental Protection Agency (USA)

FVC – Fator de visão do céu

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICU – Ilha de calor urbana

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

Tmr – Temperatura média radiante

OMM/WMO – World Meteorological Organization

1 INTRODUÇÃO

A complexa relação entre arquitetura, clima e pessoas é tema de pesquisa de diversos autores no âmbito da sustentabilidade urbana, clima urbano, consumo energético dos edifícios, qualidade de vida, entre outras temáticas, evidenciando a importância de se pensar a produção do ambiente construído em seu contexto urbano e climático (OLGYAY, 1998; YANNAS, 2015; ROMERO, 2015). Espera-se que a população urbana mundial até 2050 representará o dobro da atual, segundo estimativa da Nova Agenda Urbana-Habitat III (2016), apontando o quão transformador será o processo de urbanização no século XXI.

Essa transformação urbana implica em mais emissões de poluentes e calor, redução da cobertura natural do solo e modificações nos padrões de uso e ocupação do solo. Soma-se a isso as características térmicas e óticas dos materiais urbanos e alterações dos parâmetros de ventilação contribuindo para alterações no clima local em direção de uma condição climática potencialmente mais quente (GARTLAND, 2010; STEWART e OKE, 2012; MONTEIRO e MENDONÇA, 2015; SYNNEFA e SANTAMOURIS, 2016).

Uma alteração relacionada ao clima que pode ser observada nas cidades é a ilha de calor urbana (ICU) que, segundo a Agência de Proteção Ambiental Norte-americana EPA (*Environmental Protection Agency*, 2008), se caracteriza por áreas urbanas mais aquecidas que a vizinhança menos urbanizada e rural. O efeito pode ser observado na superfície e na atmosfera urbana (GARTLAND, 2010; STEWART e OKE, 2012).

Como decorrência da expansão urbana, a importância dos estudos de clima urbano é debatida e, nesse contexto, são fundamentais para o entendimento da ICU através das escalas de análise, integrando desde a qualidade ambiental do cidadão até os impactos da ICU no clima regional (UMMUS EICHEMBERGER et al., 2008). Os efeitos negativos das ICU incluem degradação do meio ambiente como baixa qualidade do ar, aumento consumo de energia para resfriamento das edificações, doenças respiratórias e baixa produtividade (HEAT ISLAND GROUP BERKELEY LAB, 2017).

Pensando-se na escala de análise mais próxima da vida cotidiana, entram em evidência os estudos de microclimas urbanos. Baseado no campo da arquitetura e urbanismo, um microclima pode ser entendido como a alteração do clima de uma área

de uma pequena escala urbana constituída pela influência do ambiente natural e construído (MASCARÓ e MASCARÓ, 2009; ROMERO, 2015; DUARTE, 2015). Os microclimas formam o entorno imediato de pessoas na cidade e exercem grande impacto em seu bem-estar.

Tendo em vista esse cenário, esta dissertação se insere na reflexão das condições microclimáticas geradas nos espaços públicos abertos, mais precisamente os espaços ligados ao térreo dos edifícios, no nível do pedestre. Em uma atual releitura, esses espaços deixam de ser apenas um lugar de passagem utilizando os conceitos cunhados por Romero (2015) acerca do espaço público e ganham uma importância diferenciada. No livro *A Cidade ao Nível dos Olhos* (KARSENBERG et al, 2015) o papel de ruas e espaços públicos é reforçado como uma matriz que conecta as cidades saudáveis, inclusivas e conectadas.

No espaço público, os pedestres estão sujeitos às variações tanto de conforto quanto desconforto ambiental, sendo influenciado pela paisagem urbana do entorno e dos edifícios das suas imediações que, “[...] aquecidos ou resfriados, naturalmente ventilados ou mecanicamente controlados, os edifícios irão liberar no ambiente urbano ao seu redor a energia utilizada em sua operação, sob a forma de calor” (YANNAS, 2015, p.46).

Este estudo se limita em discutir os efeitos negativos da ICU por sua relevância em climas tropicais e os impactos que as ações de mitigação podem propagar, explorando oportunidades para o resfriamento das cidades. Nesse sentido, observa-se que o campo de estudo para ações mitigadoras e de monitoramento de ICU tornou-se alvo de pesquisas multidisciplinares que discutem qualidade de vida, desenvolvimento de materiais, climatologia e da arquitetura e urbanismo devido aos seus impactos econômicos, sociais e ambientais advindos dos benefícios da redução da temperatura do ar.

1.1 PROBLEMA

Observa-se que áreas urbanas se aquecem mais rapidamente e se resfriam mais lentamente que o entorno menos urbanizado e o meio rural, acentuando zonas urbanas

potencialmente mais quentes (OKE, 1987; HEAT ISLAND GROUP BERKELEY LAB, 2017). Segundo Martins (2014), as cidades reúnem pessoas, atividades, elementos naturais e superfícies artificiais dispostos de forma heterogênea no seu espaço físico, como um mosaico. “Também a este mosaico de texturas e formas corresponde um outro mosaico: aquele da diversidade climática e ambiental (MARTINS, 2014, p. 28)”.

Essa problemática se agrava com o processo crescente de urbanização e, como consequência, as interações entre o contexto urbano e climático da cidade são cada vez mais complexas. Esse problema fomenta a abordagem deste trabalho com foco no estudo de ilhas de calor presentes nas superfícies dos espaços públicos abertos em busca de uma melhor ambiência térmica urbana para o pedestre.

O termo ambiência térmica urbana utilizado nesta dissertação partiu do trabalho de Lucia Mascaró e Juan Mascaró (2009), onde definem a ambiência urbana como consequência do ambiente projetado da cidade em que o “clima urbano e seus microclimas não se explicam nem são compreendidos sem a intervenção da arquitetura” e estabelecem uma relação entre o ambiente construído, a forma urbana e o “clima modificado pelos atributos do recinto urbano como materiais, equipamentos, usos e costumes (MASCARÓ e MASCARÓ, 2009, p. 9)”.

As propriedades térmicas dos materiais juntamente com outras características da malha urbana como rugosidade, geometria, impermeabilização do solo e a ação antropogênica têm um papel crucial no incremento da temperatura abrindo um campo para o estudo da formação, monitoramento e mitigação de ilhas de calor urbanas.

Lombardo (1985, p.77) reitera a complexidade das alterações climáticas locais: “A superfície da cidade [...] influi de maneira tridimensional na interação que existe entre a estrutura urbana e a atmosfera”. As formas de controle do clima com elementos naturais e artificiais são diversas, assim como sua eficiência, indicação e parametrização para a realidade das cidades,

1.2 JUSTIFICATIVA

Face aos desafios de amenizar os efeitos adversos do clima urbano ao conforto térmico humano, consumo energético, entre outros aspectos, entende-se que é

necessário compreender melhor como o microclima urbano pode ser influenciado por agentes naturais e construídos.

Essa compreensão permite ir além na intervenção dos espaços abertos públicos de forma a propiciar a sua função social na dinâmica da cidade. Como Romero (2013, p. 47) destaca: "o espaço produzido deve conter as diversas manifestações culturais e sociais do homem; a forma de vida da população deve ser contemplada".

Tais observações enfatizam questões importantes a serem incorporadas ao planejamento urbano e projeto, em que não bastam apenas as consultas de índices urbanísticos e variáveis climáticas durante o processo projetual. Como aponta Brandão (2009):

Estas edificações, que compõem as cidades, interceptam e transformam a energia térmica e cinética, modificando as condições ambientais do seu entorno. Isso gera situações microclimáticas específicas nos diferentes recintos urbanos e altera a condição da atmosfera superior até onde segue a sua área de influência. (BRANDÃO, 2009, p. 24)

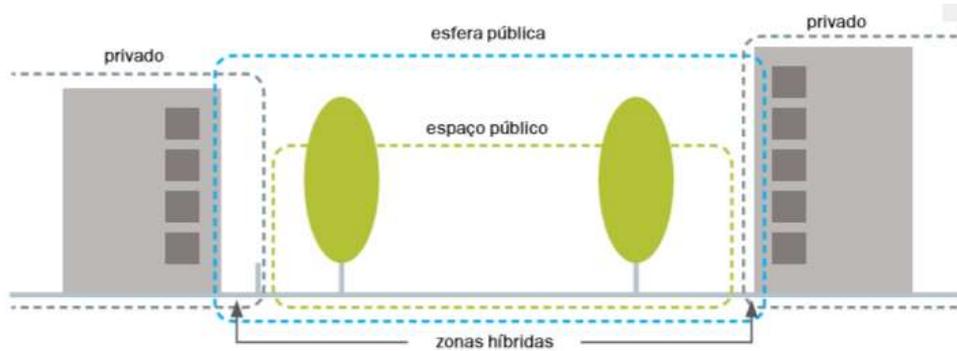
Como consequência, estudos voltados para análise microclimática estão em crescimento destacando as contribuições de Oke (1987), Katzchner (1997), Santamouris (2001, 2015 e 2016) e Romero (2013, 2015) evidenciando a análise do desenho urbano.

Este trabalho utiliza como contexto a cidade de Brasília, projetada pelo urbanista Lucio Costa segundo princípios do movimento modernista e reconhecida como Patrimônio Cultural da Humanidade pela Unesco desde 1987. Concebida como cidade-parque Brasília enfrenta atualmente muitos desafios na gestão dos recursos naturais, transporte, habitação, saúde, entre outros. A população estimada para a região metropolitana de Brasília em 2017 é de 3.039.444 habitantes, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), superando o planejamento da capital que previa 500.000 habitantes para o ano 2000.

Para esta pesquisa foi delimitado como objeto de estudo os espaços da esfera pública entre os andares térreos dos edifícios e espaço público (Figura 1), também chamados de *plinths*, que em inglês significa base (KARSSENBERG et al., 2015, p.6). A leitura que este trabalho propõe para o termo *plinth* abrange os espaços públicos

adjacentes aos andares térreos dos edifícios, que formam seu entorno e se conectam funcionalmente, fisicamente, visualmente e termicamente, sendo essa última o foco de investigação dentro do comportamento ambiental destes espaços.

Figura 1 – Esfera Pública.



Fonte: Karssenberget al, 2015, p.15

As zonas de entorno das edificações são de suma importância pois essas “zonas de transição entre os edifícios e os espaços urbanos se tornam o espaço natural para uma ampla variedade de atividades potenciais que ligam funções interiores com a vida na rua” (KARSSENBERG et al., 2015, p.30). Dessa forma, o campo de abrangência da pesquisa foi elaborado partindo da ambiência térmica urbana com foco no estudo de estratégias de mitigação de ilhas de calor e delimitando-se espacialmente no espaço público representativo dos *plinths* (Figura 2).

Figura 2 – Campo conceitual da pesquisa



1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

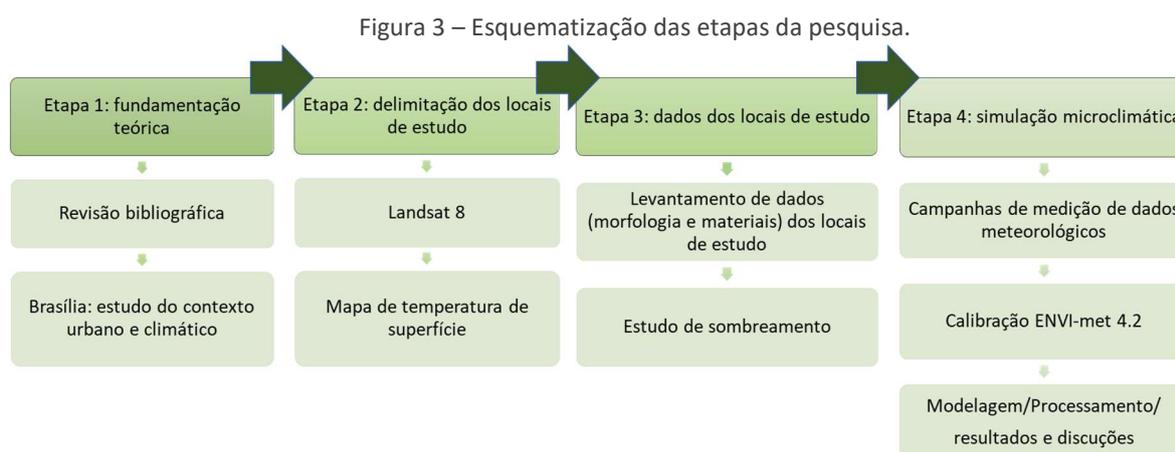
O objetivo geral é contribuir para o estudo sobre mitigação de ICU no ambiente térmico para o pedestre em espaços públicos no entorno dos edifícios no contexto do Plano Piloto de Brasília.

1.3.2 Objetivos específicos

- Verificar o impacto do uso de revestimentos de cobertura e pavimentos com diferentes valores de refletância e emitância na temperatura do ar e temperatura média radiante em espaços públicos abertos, em especial nas áreas comerciais selecionadas para estudos de caso em Brasília;
- Estimar o potencial das estratégias de mitigação de ilhas de calor urbanas com uso combinado de materiais frios e vegetação.

1.4 MÉTODOS

Para alcançar o objetivo da pesquisa, são adotadas as seguintes etapas (Figura 3), esquematizadas de forma a propiciar um roteiro para a concretização do trabalho, onde o produto de cada etapa alimenta a seguinte.



Na primeira etapa realiza-se uma revisão bibliográfica sobre o tema e a apresentação da cidade de Brasília acerca dos espaços públicos ao nível do pedestre, principalmente das áreas comerciais das superquadras do Plano Piloto e suas principais

características climáticas disponibilizadas pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia.

A segunda etapa teve foco na delimitação dos locais de estudo por meio de análises em macro escala de imagens do satélite Landsat 8 (termal e de alta resolução espacial) da área urbana de Brasília, disponibilizadas no portal do Serviço Geológico dos Estados Unidos. O critério de escolha dos locais foi determinado a partir da variação significativa de temperatura de superfície que foi possível de ser espacializada com aplicação de métodos de geoprocessamento apoiados pelo programa ArcGis versão 10.3. Posteriormente foi realizado um levantamento das características morfológicas e dos materiais que compõem os locais de estudo. Para uma análise de sombreamento das áreas de estudo foi utilizado o programa Ecotect versão 5.50.

Na etapa 3 foram realizadas simulações microclimáticas com o *software* ENVI-met versão 4.2, desenvolvido para análise de microclimas urbanos a partir de modelagem holística tridimensional. A sua utilização demandou um estudo de calibração dos dados meteorológicos antes das simulações dos cenários hipotéticos para fins de validação do programa. A calibração foi realizada com base na comparação dos dados medidos em campo (temperatura do ar e umidade relativa do ar) com os simulados. Para tal foram feitas duas campanhas de medição dos dados meteorológicos citados para representar o período quente-úmido e quente-seco de Brasília. Após ajustes dos dados meteorológicos, o ENVI-met 4.2 foi validado para a pesquisa e prosseguiu-se para as simulações dos cenários de mitigação de ICU propostos.

Foi denominado o cenário 0 como controle, para qual foram simulados os materiais de superfície originais das áreas de estudo. Posteriormente foram implementados cenários hipotéticos com uso de materiais frios na cobertura e pavimentos e arborização. Os resultados de cada cenário foram comparados com o caso original discutindo o potencial de mitigação de ICU de cada estratégia com base em três parâmetros: temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante. Para esse propósito, valores médios de cada parâmetro foram calculados considerando os resultados de todas as grades referentes às ruas e entorno das edificações, em um plano de corte de 1,50 metros acima do solo, no nível do pedestre.

Foram destacados três horários para a investigação em função dos resultados encontrados serem mais representativos: 12h e 15h (condições de insolação no período da manhã e tarde respectivamente) e 20h (duas horas após o pôr-do-sol). Para finalização partiu-se para discussão dos resultados e conclusão.

A estrutura da dissertação está dividida em sete capítulos que são sintetizados a seguir:

- Capítulo 1: tem o objetivo de introduzir o tema, discutir a problemática e a justificativa. Apresenta os objetivos da dissertação e os métodos adotados para concretização do trabalho.
- Capítulos 2: agrupa os conceitos teóricos de suporte para esta pesquisa acerca de microclima urbano, ilha de calor urbana, monitoramento do clima urbano e mitigação de ICU com materiais frios. Para o embasamento conceitual de clima urbano e microclima foram destacados como referências os autores Oke (1987), Olgyay (1998), Tarifa e Armani (2001), Monteiro e Mendonça (2015) e Romero (2015). No eixo ilha de calor urbana e materiais frios a revisão foi baseada em Lombardo (1985), Voogt e Oke (2003), Doulos, Santamouris e Salata (2004), EPA (2008), Gartland (2010) e Santamouris e Synnefa (2016).
- Capítulos 3: aborda a aplicação da simulação microclimática em estudos de clima urbano e estudo do programa ENVI-met reforçando a discussão do uso de simulação em metodologias de pesquisas que envolvem essa temática.
- Capítulo 4: explora o contexto urbano e climático de Brasília. Foram abordadas as obras de Romero (2015), Holanda (2010), Panerai (2014) e Tenorio e Gondim (2014) sobre as escalas de análise representativas do Plano Piloto e como as áreas comerciais se configuram. A caracterização climática apoiou-se nos gráficos do INMET e estudos de Zanoni (2015).
- Capítulo 5: são descritos nesse capítulo os procedimentos metodológicos para a seleção dos recortes urbanos baseada na análise de imagem do

satélite Landsat 8, calibração do ENVI-met, modelagem dos cenários de mitigação de ICU e simulação microclimática.

- Capítulo 6: são apresentados os resultados das simulações e as respectivas análises e discussões baseadas nos parâmetros analisados de temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante.
- Capítulo 7: conclusão da dissertação sobre as estratégias de mitigação estudadas além da exposição das limitações da pesquisa e perspectivas para estudos futuros.

2 CLIMA URBANO

Este capítulo apresenta a investigação teórica que fundamentou o trabalho. Procurou-se reunir pesquisas dos autores que trataram dos temas relacionados ao clima urbano, sua definição, características principais e escalas de análise tendo como recorte temporal estudos a partir da publicação da obra de Oke (1987) chamada *Boundary Layer Climates*. O foco do estudo são os microclimas e observou-se as pesquisas sobre a formação de ilhas de calor urbana, seu monitoramento e estratégias de mitigação com soluções passivas que surgem da necessidade de um ambiente térmico ameno para o pedestre em espaços públicos abertos.

2.1 DEFINIÇÃO DE CLIMA URBANO

A experiência vivenciada pela expansão das cidades é tema de numerosos estudos multidisciplinares que apontam para os efeitos das emissões de poluentes, redução da cobertura natural do solo, seu uso e ocupação sobre o clima e qualidade de vida (LOMBARDO, 1985; OKE, 1987; MONTEIRO E MENDONÇA, 2015; SYNNEFA e SANTAMOURIS, 2016). A substituição da camada natural, geralmente por materiais de baixa permeabilidade e alta capacidade de acumulação térmica tem implicações significantes na temperatura superficial da malha urbana, contribuindo para a ocorrência de anomalias relacionadas ao clima.

Segundo Voogt e Oke (2003), a temperatura superficial modula a temperatura do ar das camadas mais baixas da atmosfera urbana, é fundamental para o equilíbrio de energia da superfície, ajuda a determinar os climas internos dos edifícios e modifica as trocas de energia que afetam o conforto térmico dos habitantes da cidade. Nesse sentido contribui para a formação de um clima específico: o clima urbano, caracterizado por anomalias na temperatura, umidade do ar, precipitação, dentre outros fatores, que diferenciam o clima do campo para o clima das cidades.

As primeiras pesquisas realizadas sobre clima urbano tiveram início na cidade de Londres no século XIX, com a documentação de Luke Howard sobre um excesso de calor na cidade em comparação com o campo atribuindo essa condição à maior absorção da radiação solar pelas superfícies da cidade e à falta de umidade para evaporação (GARTLAND, 2010). Posteriormente destacam-se os trabalhos clássicos da climatologia moderna com Landsberg em 1956 com o livro *The climate of towns*, e Chandler em 1965 com *The climate of London*.

Em um estudo pioneiro no Brasil na década de 70, Monteiro (2015, p.19) define o Sistema Clima Urbano (SCU): “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”, conceito que fundamenta essa dissertação. O pesquisador elaborou um modelo teórico para a investigação do comportamento climático das cidades, por meio de articulações com subsistemas de canais de percepção. O SCU é caracterizado como singular, aberto, evolutivo, dinâmico, adaptativo e possível de auto-regulação. Os níveis que formam a estrutura do S.C.U. podem ser representados por três

canais de percepção humana: Canal I- Conforto Térmico; Canal II- Qualidade do Ar; Canal III- Impacto Meteorológico, que se associam, respectivamente, aos seguintes níveis de resolução do sistema: termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico.

Também no Brasil, Romero (2015) analisou a relação entre radiação solar e geometria urbana na temperatura do ar. Dentro do campo do planejamento urbano, ainda descreveu os elementos climáticos que são influenciados pela urbanização: vento, áreas verdes, som, a água, os pavimentos nos espaços públicos e o mobiliário urbano. Salientou que os edifícios constituem as principais rugosidades da cidade e que de todos os elementos climáticos, as condições do vento são as mais modificadas pela urbanização.

2.1.1 Escalas climáticas

A definição das escalas climáticas é fundamental para a delimitação do objeto de estudo sobre o clima urbano, diferenciando sua ordem de grandeza, meios de observação, representação, análise e tratamento. A abrangência das escalas também varia de forma horizontal e vertical. Para subsidiar o entendimento do impacto da cidade no clima urbano são apresentadas aqui abordagens do campo da geografia e climatologia que relacionam as escalas climáticas com as de intervenção urbana.

Em um estudo consolidado, Oke (1987) relaciona horizontalmente quatro escalas climáticas sobrepostas, sendo três delas aplicadas ao meio urbano: a microescala, a escala local e mesoescala, podendo englobar desde o tamanho de bairros até a cidade como um todo. Na situação vertical o pesquisador elenca camadas de acordo com as trocas térmicas. Para o nível das intervenções urbanas e estudos de ilhas de calor uma camada importante é a chamada camada de rugosidade, onde se compreende a *Urban Canopy Layer* (UCL) ou camada dossel urbano localizada abaixo do nível das coberturas, influenciada pelos aspectos tridimensionais da forma urbana nos processos de troca de calor podendo produzir diversas condições microclimáticas.

Em um diagnóstico realizado para a cidade de São Paulo visando o zoneamento de climas urbanos, Tarifa e Armani (2000, p.1) indicaram níveis de análises e reforçam que os fenômenos devem ser tratados em “todas as suas interações com os fatos

associados à produção do espaço através das práticas sociais vigentes no cotidiano desta sociedade urbana”. Dessa forma, as delimitações dos níveis de análise propostas por estes autores seguem associadas não só à um processo físico, mas também à produção do espaço construído:

- Nível 1: engloba toda a mancha urbana contínua da metrópole;
- Nível 2: unidades topoclimáticas, onde as diferenças estão associadas aos padrões de uso do solo bem como às diferenças constatadas na concentração de poluentes atmosféricos decorrentes dos meso e topoclimas naturais e urbanos;
- Nível 3: do habitar, do viver e do trabalhar, onde interessam os ambientes microclimáticos, tanto internos às edificações, como externos a elas, na rua, na praça ou no trabalho.

Essa possibilidade de relacionar de modo escalonado as unidades de urbanização (da habitação até a região urbana) também foi explorado por Monteiro (MONTEIRO e MENDONÇA, 2015) na elaboração de um quadro taxonômico (Quadro 1) da organização geográfica do clima, estabelecendo a grandeza dos espaços climáticos de forma inversamente proporcional à criação e alteração dos espaços urbanizados pelo homem e sua influência.

Quadro 1 – Escalas geográficas do clima e suas articulações com o clima urbano

Ordem de grandeza	Unidades de superfície	Escalas cartográficas	Espaços climáticos	Espaços urbanos	Estratégias de abordagem		
					Meios de observação	Fatores de organização	Técnicas de análise
II	(milhões de Km)	1:45.000.000 1:10.000.000	Zonal	-	Satélites análises	Latitude Centros de ação atmosférica	Caracterização geral comparativa
III	(milhões de Km)	1:5.000.000 1:2.000.000	Regional	-	Cartas sinóticas Sondagens aerológicas	Sistemas meteorológicos (Circulação secundária)	Redes transectos
IV	(centenas de Km)	1:1.000.000 1:5.000.000	Sub-Regional (fácies)	Megalópole Grande área Metropolitana	Rede meteorológica de superfície	Fatores geográficos	Mapeamento sistemático

V	(dezenas de Km)	1:250.000 1:100.000	Local	Área metropolitana Metrópole	Posto meteorológico Rede complementar	Integração geológica Ação antrópica	Análise espacial
VI	(centenas de Km)	1:50.000 1:25.000	Mesoclima	Cidade grande bairro ou subúrbio de metrópole	Registros móveis episódicos	Urbanismo	Especiais
-	Dezenas de metros	1:10.000 1:5.000	Topoclima	Pequena cidade Fácies de bairro/subúrbio de cidade	(Detalhe)	Arquitetura	
-	Metros	1:2.000	Microclima	Grande edificação Habitação Setor de habitação	Baterias de instrumentos especiais	Habitação	

Fonte: Monteiro e Mendonça, 2015, p.29.

A proposta de Katzchner (1997) tem como finalidade elaborar uma avaliação das condições do clima urbano, evidenciando o entendimento da ventilação como ferramenta de análise para as diretrizes de melhoria das condições de conforto e redução da poluição do ar, integrando as escalas climáticas e as de planejamento urbano (Quadro 2). Seguindo essa linha de raciocínio, a delimitação desta pesquisa encontra-se no nível microclimático.

Quadro 2 – Método Katzschner

Metas de planejamento	Ferramentas climáticas urbanas	Escalas de planejamento
Redução da poluição do ar	Análise do padrão de circulação local, análise das correntes de ar e zonas de ventilação, localização das zonas de produção de ar frio, localização dos efeitos de barreiras causados por prédios ou usinas	Planejamento de desenvolvimento urbano 1:25.000 a 1:10.000
Desenvolvimento da vida urbana	Análise da diversidade do clima urbano, localização das áreas com tensão fria e quente, extremos climáticos	Planejamento de espaços livres 1:2.000 a 1:500
Melhorias na qualidade de vida no entorno das edificações	Criação de condições bioclimáticas moderadas com poluição do ar reduzida; análise das condições microclimáticas, dependendo do uso de espaços livres nas quadras; redução da ilha de calor urbana	Planejamento de espaços 1:2.000 a 1:500

Fonte: Katzchner, 1997, p.51.

2.1.2 Fatores e elementos climáticos

Os elementos climáticos representam os valores relativos de cada clima, já os fatores climáticos são divididos quanto à sua atuação na escala do clima: os fatores climáticos globais originam o macroclima e os locais o microclima (ROMERO, 2013). A referida autora explica que todos os fatores e elementos climáticos interagem conjuntamente.

Dessa forma podemos listar os fatores climáticos globais como sendo a radiação solar, latitude, altitude, ventos, massas de água e terra. Os fatores climáticos locais são: topografia, vegetação e superfície do solo (natural ou construído). Os elementos climáticos são: temperatura, umidade do ar, precipitações e movimento do ar.

A partir do conhecimento das interações desses diversos fatores para a formação de microclimas, pode-se compreender melhor a alteração do balanço energético no meio urbano, influenciando também o conforto térmico dos habitantes e o consumo de energia das edificações. As propriedades térmicas dos materiais de construção frequentemente empregados no meio urbano são determinantes para o balanço de radiação: albedo, emissividade, capacidade térmica, entre outras, caracterizando-os com alta capacidade térmica e bons condutores (DOULOS et al., 2004; SALATA et al., 2015; SYNNEFA e SANTAMOURIS, 2016).

Dessa forma, os microclimas criados no meio urbano produzem diferentes consequências em relação à variação de temperatura e à percepção sensorial do espaço. Um exemplo é o que ocorre em cidades de clima frio em latitudes e altitudes elevadas, onde a elevação das temperaturas resultante da ilha de calor pode trazer uma condição diferenciada de conforto térmico. Em outro extremo, áreas sombreadas por edificações ou arborizadas e irrigadas podem criar microclimas mais frescos, chamado efeito oásis. Esse fenômeno de arrefecimento em áreas urbanizadas produz picos de temperaturas mais frias que as áreas do entorno sem vegetação (GARTLAND, 2010).

2.2 O MICROCLIMA URBANO

A partir do entendimento do clima da cidade, busca-se a compreensão do nível microclimático, ou seja, do clima em um ponto restrito com variações dos padrões de

vento, umidade, radiação solar e temperatura, causada por elementos naturais como topografia e vegetação ou elementos construídos (ROMERO, 2013). Em uma descrição bastante urbana, Gehl (2015, p.168) complementa a definição deste nível: “pode ser tão pequeno como uma única rua, em reentrâncias e recuos, ou em torno de um banco no espaço público”.

Na sua constituição, o microclima inclui “numa relação integradora os aspectos térmicos, luminosos e acústicos, inseparáveis no espaço construído” (CUNHA, 2006, p.36). Corbella e Yannas reúnem vários elementos que influenciam um microclima afirmando que:

As formas e a densidade urbana, a geometria das ruas tipo "cânions", o albedo das superfícies e as propriedades térmicas dos materiais, a presença de água e sua disposição e as massas de vegetação existentes constituem influências críticas sobre o microclima que é formado dentro da cidade (CORBELLA e YANNAS, 2003, p. 130).

Embora seus efeitos já fossem conhecidos e explorados na arquitetura vernacular (OLGYAY, 1998), foi no século XX que se ampliou a investigação sobre o assunto a partir dos estudos de clima urbano nas áreas da climatologia com os pesquisadores Helmut Landsberg, Timothy Oke, entre outros. Na área da arquitetura e urbanismo destacam-se as pesquisas pioneiras de Barush Givoni (GIVONI, 1976) e Victor Olgyay (OLGYAY, 1998). As ilhas de calor urbanas (ICU), caracterizadas pela elevação de temperatura resultante do processo de urbanização em relação ao entorno é um exemplo de condição microclimática que pode ser encontrada nas cidades.

De acordo com Alcoforado *et al.* (2006), a maior parte das cidades compreende um mosaico de áreas mais quentes como bairros de alta densidade de construção e de tráfego de veículos e outras mais frescas como áreas verdes e corpos d'água. Dessa forma é incorreto o termo microclima urbano no singular para designar uma estrutura por sua vez tão diversificada. Na Figura 4 observa-se o ambiente urbano heterogêneo de Brasília.

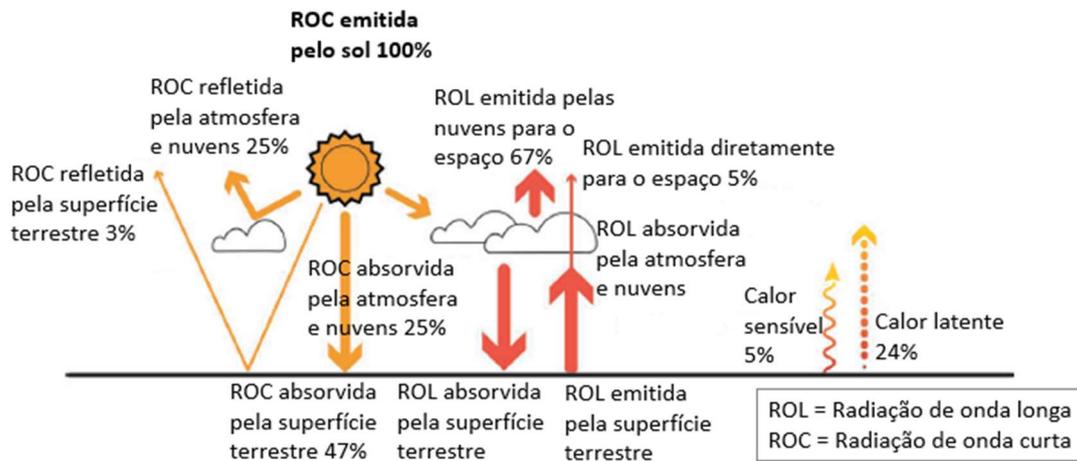
Figura 4 - Exemplo do ambiente urbano heterogêneo de Brasília: Plano Piloto (a, b, c e d) e Região Administrativa Itapoã (e).



2.2.1 Radiação solar no ambiente urbano

A radiação é uma variável fundamental no estudo do ambiente térmico das cidades e das edificações. A radiação se propaga como radiação eletromagnética na forma de ondas. Corpos com temperaturas mais elevadas como o Sol emitem radiação térmica em ondas curtas. Antes de aquecer as superfícies da cidade, a radiação solar passa através da atmosfera, onde suas partículas constituintes e as nuvens refletem parte da radiação solar de ondas curtas para o espaço e absorvem a outra parte. A radiação restante é transmitida diretamente para as superfícies terrestres. A superfície terrestre, por sua vez, reflete parte dessa radiação direta (3%) e absorve o restante. Esta radiação absorvida é emitida para a atmosfera como radiação de onda longa. A radiação solar de onda curta absorvida pelas nuvens e pela atmosfera também é emitida como radiação de onda longa, em parte para a terra e em parte para o espaço. Um exame desses fenômenos complexos, descrito simplificadamente, pode ser observado na Figura 5.

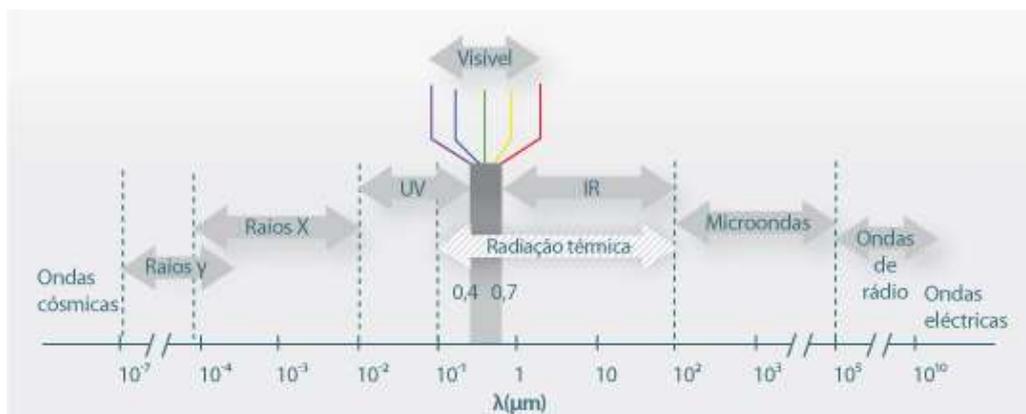
Figura 5 – Interação da radiação solar com a atmosfera, núvens e superfície terrestre.



Fonte: Esch (2015, p.87).

A radiação solar, durante sua passagem pela atmosfera, sofre uma decomposição formando um espectro eletromagnético com diferentes comprimentos de onda (Figura 6). Ainda em consequência da passagem pela atmosfera, a radiação incidente na superfície terrestre ocorre de duas formas: componente solar direta e a componente solar difusa, radiação que é redistribuída pela abóbada celeste.

Figura 6 – Espectro eletromagnético.



Fonte: Imagem disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt>. Acesso em 25 de janeiro de 2018.

Para o estudo do conforto térmico é interessante analisar as faixas de comprimentos de ondas de radiação ultravioleta (UV) e radiação infravermelha (IR), pois afetam o equilíbrio térmico das pessoas e aquecem as superfícies (CORBELLA e YANNAS, p.228). Partindo do princípio que todo corpo aquecido emite radiação térmica, constata-

se que superfícies, pessoas e animais em nosso meio ambiente estão em constante troca de calor por radiação.

A forma como as trocas de calor por radiação é percebida pelo corpo humano é indicada pela temperatura média radiante (TMR), que pode ser definida como temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação com o corpo humano é igual ao ambiente real não uniforme que inclui o entorno e o céu. Dessa forma sua influência é muito importante no sistema termorregulador do corpo, que consiste em mecanismos que regulam a temperatura corporal para manutenção das funções metabólicas.

Com relação à interação entre radiação solar e geometria urbana, Oke (1988) enumera dois aspectos relevantes: o albedo da superfície e o acesso solar. O albedo da superfície (também chamado de refletância solar) é a fração da radiação solar refletida por ela. As superfícies urbanas apresentam albedos variados em função da forma como interagem com a radiação, como pode ser visto na Tabela 1. A configuração geométrica do tecido urbano bloqueia a radiação solar podendo alterar o valor do albedo urbano pelo sombreamento e radiação refletida por exemplo. Dessa forma, esses dois aspectos determinam o potencial de uma área urbana absorver radiação solar (SANTAMOURIS, 2001). O autor propõe um albedo médio de 0,15 para as cidades, sendo que esse índice varia de 0 a 1.

Tabela 1 – Albedo de materiais urbanos

Superfície	Albedo	Superfície	Albedo
Asfalto (novo-antigo)	0.05 – 0.2	Coberturas	
Paredes		Aço galvanizado	0.35
Concreto	0.10 – .035	Alumínio branco	0.80
Tijolo cor clara	0.30 – 0.50	Área urbana (média)	0.15

Fonte: Adaptado de Santamouris (2001, p. 162). Tradução da autora.

Quando uma superfície recebe radiação direta sua temperatura aumenta, nesse caso há um fluxo de calor sensível entre diferentes superfícies ou entre o ar e uma superfície, em função da orientação em relação à trajetória solar. Com temperatura de

superfície mais elevada há aumento da radiação emitida no espectro de ondas longas (LOMBARDO, 1985).

O fluxo de calor latente é o calor necessário para os processos de trocas úmidas como o processo de evapotranspiração onde o calor é retirado do ar ou da superfície para a mudança de fase da água. As superfícies impermeabilizadas da cidade bloqueiam os processos naturais de evaporação e evapotranspiração, alterando temperatura, umidade e velocidade do vento na superfície.

Já no período noturno, com a ausência da radiação solar direta, o meio urbano começa a dissipar toda energia acumulada. De acordo com o Centro Nacional de Pesquisas Meteorológicas da França (CNRM - FRANCE, 2017), o efeito do acúmulo de calor é potencializado pela geometria tridimensional da cidade que, à noite, limita o resfriamento do ar em comparação com o meio rural. Dessa forma a ICU não é criado apenas porque o ar urbano aquece rapidamente, mas também porque se resfria lentamente. No item seguinte a geometria urbana será melhor discutida.

2.2.2 Geometria urbana

A geometria urbana tem ação direta na alteração do fluxo de ventilação, absorção de energia e na emissão de radiação de onda longa para a atmosfera por meio de suas superfícies aquecidas (EPA, 2008).

O estudo da geometria urbana e microclima urbano pode ser explorado por meio do fator de visão do céu (FVC), medida da fração do céu visível em um ponto de observação no espaço urbano, quantificando assim o grau de obstrução gerado pelo entorno. Esse aspecto atua principalmente nas alterações de trocas térmicas com o céu dificultando o resfriamento das superfícies.

Outro aspecto é a relação geométrica formada pela rua e edificações chamada relação W/H (*wide/height* - distância entre edifícios/altura dos edifícios). Essa relação também tem impacto direto na radiação solar incidente nas superfícies e sua absorção pelas edificações, sendo proporcional à elevação dos edifícios e o espaço entre eles (ROMERO, 2001).

Essa proporção oferece uma classificação dos espaços em: claustrofóbicos, de recolhimento ou expansivos. Pesquisas atuais têm em foco o cânion urbano (Figura 7), definido pelo espaço confinado entre uma via linear, edificações e coberturas compreendendo o volume de ar entre esses elementos (ESCH, 2015).

Figura 7 – Esquema da seção de um cânion urbano e relação W/H.



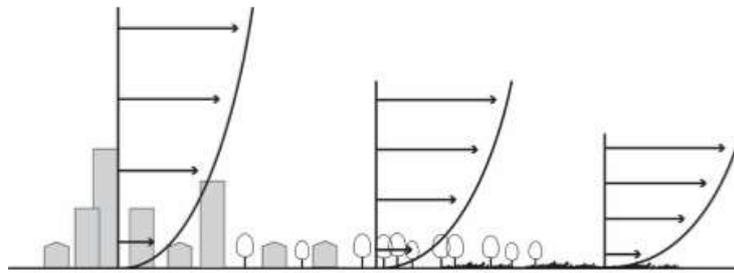
A configuração de um cânion apresenta efeitos diferentes quanto ao sombreamento durante o dia: por um lado edifícios altos criam sombreamento reduzindo a temperatura das superfícies, por outro lado, quando o sol atinge as superfícies a energia é absorvida e refletida por elas, variando de acordo com o albedo e propriedades térmicas dos materiais.

Durante a noite essa conformação geométrica influencia no resfriamento das superfícies uma vez que os edifícios obstruem o FVC dificultando que o calor seja liberado para a atmosfera (EPA, 2008). Dependendo das alturas, também ocorrem diferentes alterações na iluminação natural, carga solar, radiação solar refletida, radiação infravermelha emitida, umidade do ar, direção e intensidade do vento (CORBELLA e YANNAS, 2003).

2.2.3 Ventilação urbana

O movimento do ar ocorre por diferença de pressão que é diretamente influenciada pela temperatura do ar, alterando a sua densidade. O movimento acontece a partir da área de maior pressão para a área de menor pressão. O ambiente urbano provoca alterações na velocidade e direção dos ventos produzindo efeitos aerodinâmicos como canalização, barreira, entre outros. Já a velocidade do vento também está relacionada com a rugosidade da superfície da cidade, aumentando a velocidade com a altura (Figura 8).

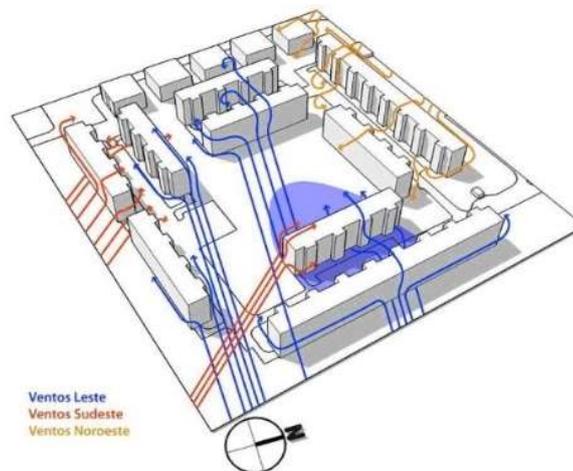
Figura 8 – Velocidade do vento e rugosidade da superfície



Fonte: Esch (2015, p.159).

Para Romero (2013), o vento é o dado meteorológico mais variável e na escala microclimática afeta os pedestres e as edificações, por exemplo, aumentando as perdas de calor por convecção. As características geométricas dos obstáculos urbanos são determinantes para a ocorrência dessas variações acrescentando bastante complexidade para um estudo de ventilação. A Figura 9 exemplifica a ação modificada da ventilação na escala microclimática pela presença das construções, alterando seu padrão de distribuição.

Figura 9 – Estudo de ventilação SQN 308 – Brasília – DF.



Fonte: Romero (2011, p.67).

A ventilação no ambiente urbano desempenha um papel importante contribuindo para a formação de ICU a medida que a redução da sua velocidade prejudica as trocas térmicas impactando também no consumo energético das edificações para resfriamento. Mirzaei (2015), apontou que as investigações sobre ventilação frente ao aquecimento das cidades sugerem medidas de adaptação da sua

morfologia incorporando corredores de ventilação, áreas verdes, forma dos edifícios, orientação e relação W/H das vias.

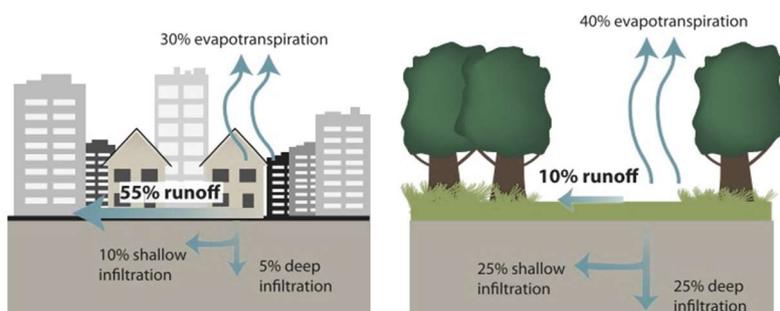
Para o conforto térmico nos espaços abertos o vento é uma variável atuante nas trocas térmicas entre os pedestres o meio circundante e atua também na questão da qualidade do ar. Para Mascaró e Mascaró (2009), a produção e transporte de poluentes é bastante problemática nas cidades, havendo casos de lançamento de poluentes em áreas com escoamento nulo entre edificações levando a um aumento da sua concentração para valores prejudiciais à saúde pública.

2.2.4 Influência das áreas verdes no microclima urbano

Os efeitos da vegetação nas cidades vão além dos atributos estéticos e se confirmam no efeito oásis ou ilhas de frescor descrito anteriormente. As pesquisas nesse sentido enfatizam sua contribuição na redução da temperatura do ar, fixação de poluentes, umidificação e controle dos ventos agindo sobre os elementos climáticos dos microclimas urbanos. Os mecanismos que mais influenciam o balanço energético são captação da radiação solar e evapotranspiração, processo em que as plantas absorvem água do solo e a reemite para a atmosfera em forma de vapor de água (ROMERO, 2011; TUMINI, 2012; SHINZATO e DUARTE, 2012).

Conforme se materializa a expansão urbana, a cobertura natural do solo e a vegetação perdem espaço para as superfícies impermeabilizadas e edifícios, diminuindo o sombreamento e a umidade com desdobramentos na elevação da temperatura de superfície e do ar. A Figura 10 ilustra a capacidade de infiltração de água para o solo de acordo com o seu recobrimento e a redução da evapotranspiração.

Figura 10 – Recobrimento do solo e capacidade de infiltração de água.



Fonte: EPA (2008, p.7).

De acordo com Duarte (2015), outra variável microclimática bastante afetada pelo sombreamento das árvores é a temperatura média radiante, uma vez que a diminuição desta interfere positivamente na sensação de conforto térmico, o que pode ser verificado pelos índices de conforto para espaços abertos como o PET (*Physiologically Equivalent Temperature*).

2.2.5 Calor antropogênico

O calor antropogênico se refere ao calor gerado por atividades humanas de fontes variadas como edifícios, processos industriais, meios de transporte e pelos habitantes, contribuindo para a formação de ilhas de calor urbanas (EPA, 2008; GARTLAND, 2010).

Nas cidades observa-se o aumento do uso de ar condicionado em residências e comércios com instalação de equipamentos em fachadas em baixas alturas, modificando a situação microclimática do local quando em funcionamento, expulsando o ar quente do interior para o exterior. Conseqüentemente afeta o conforto térmico dos pedestres que utilizam as calçadas do espaço público. A Figura 11 ilustra um caso onde a presença de equipamentos de ar condicionado nas calçadas do comércio local no Plano Piloto de Brasília lançando o ar quente no nível do pedestre.

Figura 11 – (a e b) Presença de equipamentos de ar condicionado no nível das calçadas no CLN303.



(a) Janela do subsolo parcialmente bloqueada com equipamento de ar condicionado



(b) Janela do subsolo totalmente bloqueada com equipamentos de ar condicionado

Os meios de transporte também são grandes geradores de calor na altura do pedestre, além de lançarem poluentes na atmosfera. Lombardo (1985) explorou essa questão em sua pesquisa sobre ilhas de calor em São Paulo ressaltando que “é importante notar que a interferência antropogênica gerada pela intensa atividade humana diminui as anomalias climáticas no fim de semana” (LOMBARDO, 1985, p.210).

Os fatores mais importantes do calor antropogênico que, individualmente ou combinados afetam a formação de ilha de calor urbana são: forma urbana, uso do solo e propriedades térmicas dos materiais de construção. Os padrões de desenvolvimento urbano produzem muitos impactos incluindo a redução de vegetação e de áreas naturais.

Em um trabalho de aprofundamento do conhecimento científico sobre os processos que ocorrem no sistema cidade-atmosfera, especialmente o clima urbano, o CNRM - França (2017) desenvolveu uma metodologia para estimar a quantidade de calor antropogênico em medições de turbulência atmosférica utilizando inventários de consumo de energia. A participação relativa desses fluxos foi relacionada com o aquecimento dos edifícios no inverno e o resfriamento no verão com uso de ar condicionado, apontando um aumento da temperatura do ar externo.

2.3 ILHA DE CALOR URBANA

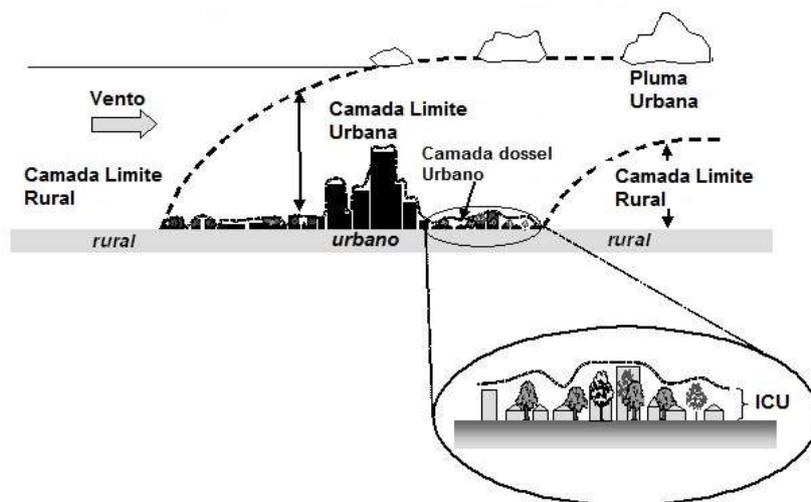
A ilha de calor urbana (ICU) é um dos principais fenômenos associados ao clima urbano. Segundo a Agência de Proteção Ambiental Norte-americana EPA (*Environmental Protection Agency*, 2008), o termo se caracteriza por áreas urbanas mais aquecidas que a vizinhança rural. Em uma cidade com aproximadamente 1 milhão de pessoas a temperatura do ar média anual pode ser de 1°C a 3°C mais elevada que o entorno. Durante o período da tarde, a diferença pode ser superior a 12°C. Os efeitos negativos da ilha de calor se manifestam desde aumento da demanda de energia para resfriamento, custos com ar condicionado, poluição do ar, emissões de gases de efeito estufa até doenças relacionadas com calor e mortalidade.

Voogt e Oke (2003) resumem os principais aspectos, implicações e efeitos da ilha de calor, com destaque para sua forma, intensidade e a localização do seu núcleo

mais quente. Nesse sentido, são categorizados dois diferentes tipos de ilha de calor: de superfície e atmosférica. A ilha de calor de superfície se refere ao aquecimento relativo das superfícies urbanas. A ilha de calor atmosférica (Figura 12) se forma nas seguintes camadas:

- Camada dossel urbano (CDU): próxima às superfícies da cidade, se estendendo verticalmente desde o solo até a influência do edifício mais alto. Compreende a camada de ar onde as pessoas vivem (EPA, 2008).
- Camada limite urbana (CLU): situa-se acima do dossel, formando um domo de ar aquecido sobre a cidade, que pode ter sua forma modificada pelo vento (VOOGT, 2004).

Figura 12 - Ilha de calor urbana atmosférica



Fonte: Adaptado de Voogt e Oke, 2003. Tradução da autora. Disponível em: <http://www.actionbioscience.org/environment/voogt.html>. Acessado em 15/06/2016

As principais diferenças entre essas categorias de ICU estão relacionadas no Quadro 3, baseadas no desenvolvimento temporal, intensidade, método de identificação e representação.

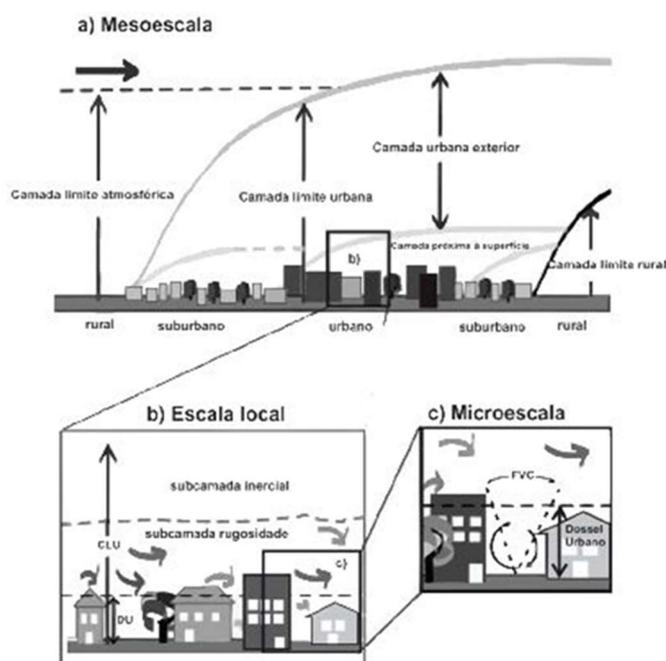
Quadro 3 - Ilha de Calor Urbana de Superfície e Atmosférica

Características	ICU Superfície	ICU Atmosférica
Desenvolvimento Temporal	<ul style="list-style-type: none"> • Presente em todas as horas do dia e noite. • Mais intensa durante o dia e no verão. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pode ser pequena ou inexistente durante o dia. • Mais intensa durante a noite e no inverno.
Intensidade (Condição mais intensa)	Maior variação espacial e temporal: <ul style="list-style-type: none"> • Dia: 10 a 15°C • Noite: 5 a 10°C 	Menor variação: <ul style="list-style-type: none"> • Dia: -1 a 3°C • Noite: 7 a 12°C
Método de Identificação	Medição indireta: <ul style="list-style-type: none"> • Sensoriamento remoto 	Medição direta: <ul style="list-style-type: none"> • Estação meteorológica fixa • Transectos em rede de estações móveis
Representação Típica	<ul style="list-style-type: none"> • Imagem termal 	<ul style="list-style-type: none"> • Mapa isotérmico • Gráfico de temperatura

Fonte: Adaptado de EPA (2008, p.2). Tradução da autora.

Uma outra aproximação sobre o tema é a análise referente à sua escala de influência: a mesoescala e a microescala, representadas na Figura 13.

Figura 13 – Escalas de influência da ICU.



Fonte: Adaptado de Oke, 2006, p.3. Tradução da autora.

No Brasil, o primeiro estudo sobre ICU foi realizado para a cidade de São Paulo por Lombardo (1985), onde foram analisados os parâmetros naturais e de uso do solo urbano compatibilizados por imagens de satélites e coleta de dados em campo. A autora encontrou um gradiente de temperatura horizontal superior a 10°C entre o centro e a área rural e confirmou, em termos espaciais, uma alta relação entre ilha de calor e concentração de poluentes, alterações nos padrões de humidade relativa e precipitações.

As condições climáticas de uma área urbana extensa e de construção densa são totalmente distintas daquelas dos espaços abertos circundantes, podendo haver diferenças de temperatura, de velocidade do vento, de umidade, de pureza do ar, etc. (LOMBARDO, 1985, p.77).

No Distrito Federal foi realizado um estudo detalhado para a região administrativa de Sobradinho por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos para compreensão dos efeitos desse fenômeno nessa cidade satélite (BIAS; BAPTISTA; LOMBARDO, 2003). Os resultados mostraram variações de temperaturas intra-urbanas de até 9°C às 9:45h entre uma lagoa e o entorno com presença de grande área asfaltada, chamando atenção para o adensamento urbano e os materiais empregados na construção civil. Baptista (2010) analisou a evolução da temperatura no Distrito Federal por meio de imagens termais com o sensor TM5 do Landsat nos anos de 1984 e 2001 e análise estatística. O pesquisador observou na comparação desses anos um aumento médio de 2°C da temperatura de superfície e salientou que a relação entre o aumento de temperatura e o crescimento urbano é verificada em diversas áreas do Distrito Federal.

Vianna e Romero (2016) também utilizaram o sensoriamento remoto para analisar a formação de ICU em Brasília por meio de uma análise quantitativa com gráficos de temperatura da superfície urbana e correlacionaram qualitativamente com as atividades humanas e uso do solo. As autoras compararam Brasília com outra cidade tropical, Cingapura, e enfatizaram a necessidade de estudos individualizados para as cidades.

2.3.1 Monitoramento de ilhas de calor

O monitoramento das ICU pode ser realizado por diversas abordagens que dependerão da escala, recursos e objetivo da análise. Gartland (2010, p.38) cita algumas abordagens utilizadas para medição e monitoramento, sendo as mais comuns as estações fixas, transectos móveis e sensoriamento remoto. Uma ênfase maior será dada no tópico seguinte ao sensoriamento remoto, utilizado neste trabalho para observação da variação da temperatura de superfície na cidade.

As estações meteorológicas fixas podem ser encontradas em diversas cidades podendo ser operadas por serviços meteorológicos, universidades, entre outros, oferecendo registros de temperatura do ar, umidade e radiação solar como exemplo. Os estudos comumente são feitos por comparação de dados de uma estação na cidade e outra nos arredores e pela investigação de dados históricos. A localização das estações na cidade pode não representar corretamente as condições para medição de ICU. Barbirato et al. (2016), afirma que para uma análise climática urbana o ideal seria estações de monitoramento posicionadas em diversos pontos para formação de uma rede de informações sobre o clima da cidade.

Já os transectos móveis são geralmente utilizados de forma complementar à estação fixa para levantamento das variáveis climáticas. Trata-se da utilização de veículos para realizar a medição dos dados podendo abranger diversos pontos da cidade em um percurso, mostrando as diferenças entre as variáveis medidas. Silva (2016) aponta que uma das limitações da técnica é a definição de dias representativos para se fazer a análise, tendo em vista a inviabilidade de fazer os registros durante todos os dias.

Sensoriamento remoto

O sensoriamento remoto¹ pode ser empregado em metodologias aplicadas às pesquisas de clima urbano, principalmente para ilhas de calor urbana de superfície.

¹ Sensoriamento remoto é definido como a ciência que visa o desenvolvimento da obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação eletromagnética com os materiais terrestres” (MENEZES e ALMEIDA, 2012, p.3).

Dentre os sensores mais utilizados em trabalhos científicos estão o Ikonos, Modis, Aster e a série Landsat. Em estudos de temperaturas intra-urbanas, a partir do uso das informações de bandas termiais, pode-se obter detalhes da distribuição da temperatura superficial da malha urbana e fazer correlações com uso do solo, forma urbana, presença de corpos d'água e áreas verdes, por exemplo.

Nesse aspecto, a resolução espectral das imagens é um fator importante na detecção e identificação dos objetos, tendo em vista a diversidade da composição do espaço intra-urbano, onde os alvos apresentam grande diversidade, como edifícios, loteamentos, praças, estacionamentos, gramados, asfalto, etc., cada um com uma assinatura espectral diferente (MENEZES e ALMEIDA, 2012, p.241). Esses autores ressaltam as interferências das condições ambientais e climáticas nessa temperatura de superfície, modificando-a em curtos intervalos de tempo, podendo variar temporalmente os dados na faixa do termal.

Sobre o processamento das imagens destaca-se que os sensores termiais orbitais realizam uma medida indireta da ilha de calor de superfície, o que exige uma correção das propriedades da superfície radiativa que influenciam a emissão e reflexão da radiação de comprimentos de ondas espectrais detectadas pelo sensor (VOOGT e OKE, 2003). Por ser uma técnica mais elaborada observa-se o emprego de produtos de um ou mais satélites associados às ferramentas computacionais como o sistema de informação geográfica (GIS).

A aplicação do sensoriamento remoto tem limitações quanto à resolução espacial da imagem e sua disponibilidade. A maior parte dos sensores orbitais não imageiam à noite, o que representa uma restrição para os estudos de ilhas de calor urbanas, já que estas são mais proeminentes neste horário.

Nessas situações, outra vertente do sensoriamento remoto termal urbano se destaca, baseada no uso de sensores em câmeras portáteis termográficas e sensores aerotransportados de alta resolução espacial na faixa do termal. Os aerotransportados são empregados realizando-se voos em baixa altitude e com baixa interferência atmosférica, porém com um custo muito elevado (UMMUS EICHEMBERGER et al., 2008).

Essa tecnologia foi aplicada no estudo brasileiro de Andrade et al. (2007) utilizando imagem do satélite Landsat-5 e do sensor aerotransportado HSS (*Hyperspectral Scanner System*) em sobrevôos na cidade de São José dos Campos, coletando imagens com maior resolução. Foram localizadas ilhas de calor com amplitude térmica de 6°C a 10°C (10h local) entre a área urbana e o entorno. Os pesquisadores ressaltaram pontos com temperaturas de superfície mais elevadas supostamente devido aos materiais das coberturas como telhados metálicos, da morfologia urbana e processos industriais (Figura 14).

Figura 14 – Mapa de temperatura de superfície em área de expansão urbana em São José dos Campos – SP observadas pelo sensor HSS em 31/05/2006.



Fonte: Andrade et al., 2007, p.478

2.4 MITIGAÇÃO DE ICU PARA MELHORIA DO MICROCLIMA URBANO: O PAPEL DOS MATERIAIS FRIOS

Os desafios para a efetividade das estratégias de mitigação dos efeitos da ICU dependem bastante do grau de certeza dos métodos de identificação, que incluem uma combinação de complexos fenômenos interagindo em diversas escalas, desde a escala humana até a escala da cidade e a regional (MIRZAEI, 2015). Este autor revisou estudos recentes a partir do ano de 2013 sobre modelagem do efeito da ICU e das estratégias de mitigação investigadas por arquitetos, especialistas em climatologia urbana, meteorologistas e geógrafos. De acordo com sua pesquisa, as estratégias de mitigação mais estudadas incluem ventilação urbana e alteração dos materiais de recobrimento do solo visando melhorar o conforto dos pedestres e reduzir a demanda energética dos edifícios. As escalas dos modelos variam de acordo com os objetivos das pesquisas:

- Escala do edifício (conhecidos como Building Energy Models – BEM): limitada à análise do edifício isolado. Investigam as respostas do envelope do edifício frente aos cenários futuros de mudanças climáticas.
- Microescala: análise de modelagem de microclimas (microclimate models – MCM) baseada em técnicas computacionais de dinâmica dos fluidos (CFD). Analisa os impactos da orientação das edificações, materiais de superfície, ruas tipo cânion, vegetação, entre outros atuantes no conforto térmico do pedestre e na ventilação urbana.
- Escala da cidade: investigação da variação da ICU em larga escala utilizando ferramentas para mesoescala (MM). A modelagem da ICU nessa escala é uma das aplicações do sensoriamento remoto, por meio das imagens térmicas tomadas por satélites.

O desempenho térmico dos materiais de construção são determinados por suas características térmicas e óticas: o albedo e a emitância de radiação de ondas longas são as mais significativas (DOULOS, SANTAMOURIS e LIVADA, 2004). Esses autores abordam o uso dos chamados materiais frios (termo traduzido do inglês - *cool materials*) que se caracterizam por alta refletância para radiação de ondas curtas e alta emitância para radiação de ondas longas.

De acordo com a ABNT (2005), a refletância é a taxa de radiação solar refletida por uma superfície pela taxa de radiação solar incidente. Dessa forma, o desempenho térmico dos materiais no meio urbano também dependerá da radiação solar incidente. Parcelas da radiação solar serão absorvidas, refletidas e transmitidas dependendo se a superfície é opaca ou transparente, sempre havendo um ganho de calor (PERALTA, 2006).

A Figura 15 relaciona os fatores de absorção, reflexão e emissão solar de materiais de construção à temperatura ambiente. De acordo com seu comportamento térmico os materiais são classificados em: seletivos frios, seletivos quentes, refletores e corpos negros. Para Corbella e Yannas (2003, p. 231) o “jogo de absorção e emissão das superfícies determinará (em partes) sua temperatura”.

Nesse sentido, muitas propostas se voltam para a redução de ganhos térmicos nas edificações e no ambiente urbano, em particular para a redução da absorção da radiação solar em busca de um balanço energético positivo e moderação da ICU (Synnefa e Santamouris, 2016). Neste estudo serão avaliadas as estratégias de mitigação de ICU alterando materiais de pavimentação e das coberturas pelos materiais frios, cujas características serão detalhadas nos tópicos seguintes.

Figura 15 – Comportamento dos materiais



Fonte: Corbella e Yannas, 2003, p. 229

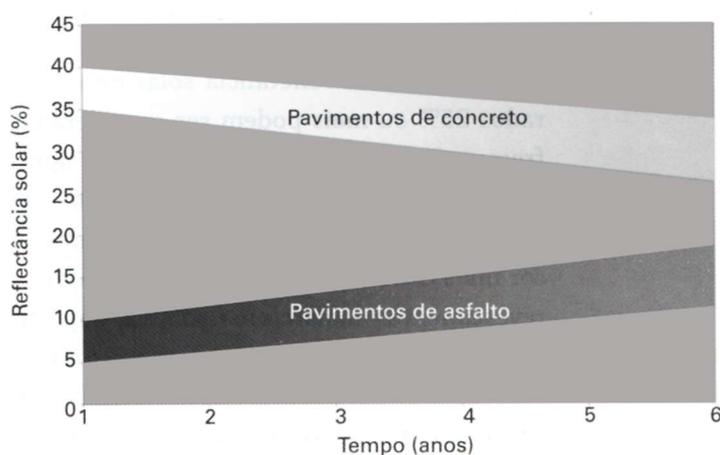
2.4.1 Pavimentos frios

Uma estratégia de mitigação do impacto dos pavimentos sobre a moderação da ICU necessita de redução do fluxo de calor sensível entre a atmosfera e a superfície pavimentada (SANTAMOURIS, 2013). Uma vantagem para uma ação mitigadora envolvendo pavimentos é a grande disponibilidade de áreas nas cidades para sua implementação (ruas, calçadas e estacionamentos).

A temática dos materiais de construção para pavimentação é bastante ampla e os enfoques principais encontrados na literatura para moderação das altas temperaturas de superfície são baseados no aumento da reflexão solar e no aumento da permeabilidade do solo.

Os pavimentos convencionais de asfalto e concreto possuem valores de refletância diferentes quando novos e envelhecidos (Figura 16) e emissividade térmica alta, em torno de 85% ou mais segundo Gartland (2012, p.63), que reforça que em um pavimento impermeável a refletância é o fator que mais afeta a sua temperatura. Como as cores claras estão relacionadas com maiores refletâncias, os pavimentos mais claros tendem a ser mais frescos que os pavimentos mais escuros.

Figura 16 – Refletância solar de pavimentos convencionais de acordo com a idade.



Fonte: Gartland (2012, p.106).

O pavimento com alta refletância solar se mantém mais frio que um pavimento convencional sob ação da radiação solar contribuindo assim para a redução da temperatura do ar (HEAT ISLAND GROUP LAWRENCE BERKELEY LAB, 2017). O quadro atual conta com o uso de pinturas refletivas brancas, pintura colorida com o uso de partículas refletivas do espectro infravermelho e pigmentação mais clara para alterar a cor dos agregados visando aumentar o albedo das superfícies (SYNNEFA e SANTAMOURIS, 2016). A utilização de pigmentação nos pavimentos frios, que geralmente são brancos ou cinza claro, também atua no conforto visual do pedestre uma vez que cores muito reluzentes podem causar ofuscamento (GARTLAND, 2010).

As opções podem ser aplicadas em obras novas e para renovação de pavimentos existentes, porém é restrita a demonstração desse pavimento em larga escala para avaliação dos impactos relacionados a ICU. Los Angeles se coloca como uma cidade pioneira nesse sentido, implementando essa tecnologia em espaços públicos com um

estudo piloto visando moderação da temperatura do ar e conseqüentemente redução de riscos de morte e do consumo de energia para resfriamento dos edifícios (Figura 17).

Figura 17 – Aplicação de revestimento fresco sobre rua asfaltada em Los Angeles – EUA.



Fonte: <http://bss.lacity.org/highlights.html>

Outras perspectivas se abrem com relação ao ciclo de vida dos materiais uma vez que a temperatura dos pavimentos possui uma influência sobre sua durabilidade. Li (2012) coloca que em climas quentes as altas temperaturas podem deformar pavimentos asfálticos e de concreto e que a tecnologia de pavimentos frios pode mitigar esse tipo de deterioração e reduzir custos de manutenção.

Entretanto, o aumento do albedo pode intensificar as interações térmicas entre o pavimento e outras superfícies do entorno como paredes dos edifícios e o próprio corpo humano por causa do aumento da radiação refletida. Outro ponto a ser estudado se refere à probabilidade de pavimentos claros escurecerem com o tempo em função do depósito de sujidades perdendo sua capacidade de reflexão (LI, 2012).

As pesquisas com os pavimentos permeáveis estão direcionadas para o aumento de sua capilaridade, constatando que sua resposta térmica depende da disponibilidade de água para evaporação (SANTAMOURIS, 2013). O autor chama atenção para o fato de que há limitadas informações científicas sobre seu desempenho térmico.

2.4.2 Coberturas frias

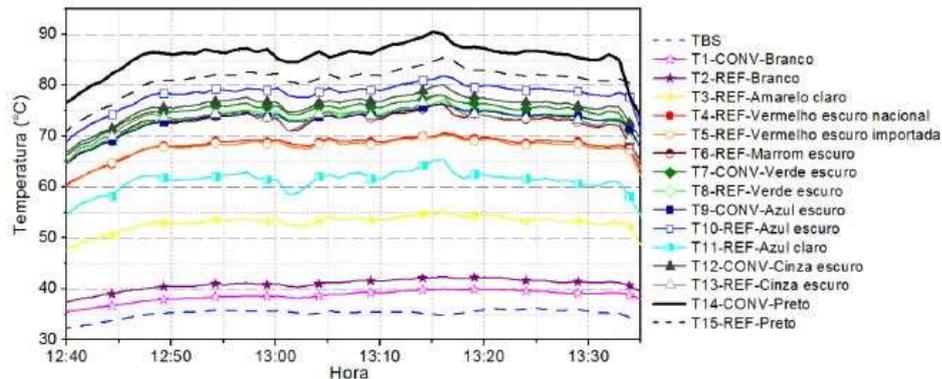
De acordo com o Grupo de Estudo de Ilha de Calor do Laboratório Lawrence Berkeley (2017), uma cobertura se mantém mais fria sob ação da radiação solar refletindo essa radiação (minimizando a absorção solar) e emitindo radiação térmica contribuindo para a dissipação do ganho de calor. Segundo Gartland (2010), temperaturas de superfície de materiais frios geralmente ficam abaixo de 50°C, enquanto em materiais tradicionais podem chegar até 90°C. Por se tratar de cobertura, o fator inclinação do telhado é também relevante interferindo no valor da refletância solar para que faça parte dessa categoria. O EPA (2008) define com alta refletância o valor de 65% para coberturas com pequena inclinação e 25% para grande inclinação.

Nos Estados Unidos diversos órgãos estaduais definem a refletância e emissividade mínimas para coberturas em seus códigos de obras, limitando também o uso de cores como uma medida de eficiência energética. No Brasil, as normas para telhas tratam de questões de fabricação, forma, dimensões, empenamento, entre outros aspectos específicos e deixam lacunas em relação ao desempenho térmico, com exceção das telhas termoacústicas. Medidas que incorporam redução do consumo energético das edificações para resfriamento podem trazer benefícios para o microclima, como foi visto no item que tratou do calor antropogênico.

Um estudo brasileiro de Dornelles et al. (2013) investigou o desempenho térmico de tintas frias e convencionais disponíveis no mercado, caracterizando suas absorptâncias e emissividades e medindo a temperatura de superfície de amostras expostas ao sol na Universidade Federal de São Carlos. O resultado (Figura 18) mostrou que o potencial de uso das tintas frias resulta da redução da absorptância solar na região do infravermelho, possibilitando a utilização de cores mais escuras para fins de melhor desempenho térmico quando comparadas às tintas convencionais. A menor temperatura superficial foi com o uso de tinta branca convencional (amostra com menor

absortância solar = 10,2%), mostrando que essa também é eficiente na redução da temperatura superficial de coberturas.

Figura 18 – Gráfico de temperaturas superficiais das amostras de tintas convencionais e refletivas.



Fonte: Dornelles et al., 2013, p.7.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica sobre clima urbano, escala climática, fatores e elementos climáticos, ilha de calor atmosférica e de superfície, monitoramento e estratégias de mitigação de ICU destacando os materiais frios. Esses materiais são caracterizados por alta refletância térmica (albedo) e emitância de ondas longas. Estudos pilotos com aplicação de pavimentos frios já são encontrados no cenário internacional e assim espera-se um monitoramento do potencial dessa estratégia de mitigação de forma a ampliar as discussões sobre sua utilização em contextos climáticos e morfológicos diferentes.

Foi discutido o papel da vegetação, do calor antropogênico e da geometria urbana, cujas estruturas formam barreiras (menor visão do céu) que impedem que a radiação emitida pelas superfícies aquecidas seja liberada para a atmosfera e altera o movimento do ar dificultando as trocas convectivas e intensificando o fenômeno da ICU. Adicionalmente, as superfícies impermeabilizadas e as propriedades térmicas dos materiais de construção proporcionam temperaturas de superfície mais altas e reduzem a infiltração de água para o solo. A Figura 19 abarca esquematicamente alguns fatores que contribuem para a formação de ICU discutidos neste trabalho.

Figura 19 – Fatores que influenciam a formação de microclimas urbanos.



Dessa forma conclui-se que o crescimento das cidades exerce uma maior pressão por espaço, infraestrutura e energia resultando em alterações na paisagem urbana e consequentemente no clima urbano rumo a uma condição potencialmente mais quente gerando núcleos capazes de produzir mais calor tendo em vista a heterogeneidade da sua morfologia e atividades humanas.

3 BRASÍLIA: CONTEXTO URBANO E CLIMÁTICO

O capítulo 3 abarca informações sobre a cidade de Brasília, mais propriamente sobre as áreas de comércio local, objeto de estudo. A motivação para estudar os ambientes de atividade comercial surgiu da observação do ordenamento funcional da cidade onde, no Plano Piloto, encontram-se áreas projetadas para essa finalidade integradas às unidades de vizinhança. Soma-se à forma e o uso a experiência proporcionada pela vida pública que ali acontece em torno dos edifícios. Nesse sentido, a preocupação com o ambiente térmico é relevante e aqui é apresentado também o contexto climático da cidade como suporte para as análises e construção da configuração dos dados climáticos para as simulações microclimáticas.

Pois a arquitetura não pode ser outra coisa senão o interesse pela vida cotidiana, tal como vivida por todas as pessoas; é como o vestuário, que não deve apenas nos vestir, mas ajustar-se bem a nós. (HERTZBERGER, 2015, p. 174).

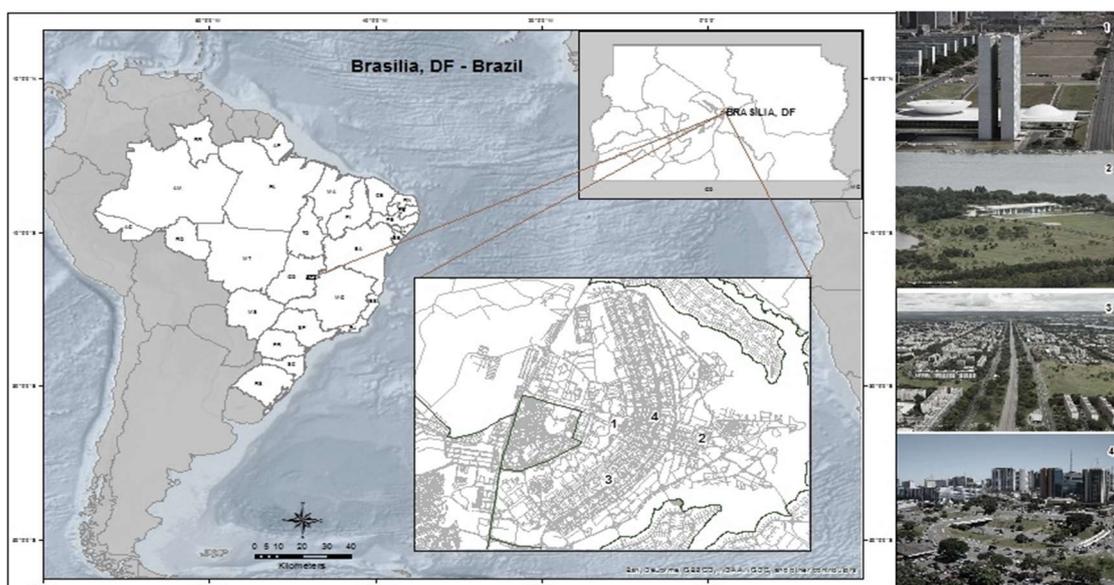
3.1 CONTEXTO URBANO

A capital do Brasil foi inaugurada em 1960 e tornou-se um marco na história do planejamento urbano. Brasília é atualmente a maior cidade do mundo que não existia no início do século XX (UN-HABITAT, 2013) com uma população estimada em sua região metropolitana de 3.039.444 habitantes (IBGE, 2017) evidenciando um rápido crescimento populacional e consequentemente a expansão urbana sobre seu território.

Seu Plano Piloto é um Patrimônio Mundial do Unesco projetado por Lucio Costa com base nos princípios do movimento modernista lançados por Le Corbusier: monumentalidade, ordem, forma e função com foco na coletividade. A concepção urbana pode ser observada em quatro escalas distintas, baseadas na separação de funções: monumental, residencial, gregário e bucólico (Figura 20).

É o jogo de três escalas que vai caracterizar e dar sentido a Brasília... a escala residencial ou cotidiana... a dita escala monumental, em que o homem adquire dimensão coletiva; a expressão urbanística desse novo conceito de nobreza... Finalmente a escala gregária, onde as dimensões e o espaço são deliberadamente reduzidos e concentrados a fim de criar clima propício ao agrupamento... Poderemos ainda acrescentar mais uma quarta escala, a escala bucólica das áreas abertas destinadas a fins-de-semana lacustres ou campestres (COSTA, L., 1961 apud BARATTO, R., 2017).

Figura 20 – Localização de Brasília e exemplo das quatro escalas: (1) Monumental, (2) Bucólica, (3) Residencial e (4) Gregária.



Fonte: Mapa produzido pela autora e imagens disponíveis em: <https://www.fotografiasaereas.com.br>

A descrição de cada escala será realizada observando a classificação de Romero (2015) para os espaços públicos segundo aspectos funcionais agrupados em: cotidiano, simbólico e de passagem. Os espaços do cotidiano são onde desenvolvem-se atividades próprias do dia a dia como passear, descansar e encontrar pessoas. O simbólico representa principalmente as funções do governo e espaços cívicos onde desenvolvem-se atividades como manifestar e comemorar. O espaço de passagem é reconhecido pela sua principal função que é o acesso a outros espaços.

A escala monumental é representada pelo eixo leste-oeste, que concentra as atividades administrativas mais importantes, marcos visuais e edifícios projetados por Oscar Niemeyer, destacando a Esplanada dos Ministérios e a Praça dos Três Poderes. O espaço público nessa escala é proeminentemente simbólico com forte materialização do poder público.

A escala residencial, localizada no norte e áreas do Sul ao longo do eixo norte-sul, é constituída essencialmente pelas superquadras, dispostas em blocos com edifícios residenciais, ora quatro pavimentos ora seis pavimentos sobre pilotis, entrequadras com escolas, igrejas e áreas verdes públicas. O espaço público eminente é do cotidiano havendo também espaços de passagem entre os blocos e ao comércio local.

A escala gregária situa-se em torno da intersecção de leste-oeste e norte-sul dos eixos e é configurado em setores: financeiro, comercial, hotel, hospital, rádio e TV. Compreende espaços públicos do cotidiano como a Praça do Povo e espaços de passagem. Este trabalho se concentra nessa escala, especificamente no comércio local, mais próxima da vida dos usuários e moradores e seu espaço público pertence ao grupo do cotidiano.

A escala bucólica foi guiada pela incorporação de paisagens naturais e edificações espaçadas e de baixa densidade. Um exemplo é a Universidade de Brasília (UnB) e o Palácio da Alvorada. Nessa escala observa-se o três grupos de espaços públicos e, dependendo da seleção, um grupo pode ser mais evidente que o outro. A praça do Teatro de Arena na UnB, por exemplo, possui características de um espaço simbólico e a orla do Lago Paranoá um espaço do cotidiano.

Essas escalas são bastante legíveis no território do Plano Piloto pela sua conformação espacial, os marcos, estética dos edifícios e as áreas verdes, contudo, a paisagem urbana do Distrito Federal “é mais complexa do que sugere a dicotomia Plano Piloto/Cidades-Satélites” (HOLANDA, 2010, p.19). O autor se refere ao surgimento de favelas, dos acampamentos de trabalhadores que resistiram às pressões para deixar o espaço, do desenho das primeiras cidades satélites com conceitos modernistas e dos recentes condomínios fechados agregando uma nova forma de expansão urbana.

Ferreira (2010) estudou a produção do espaço urbano da cidade e o divide em três momentos: a implantação, a consolidação e a expansão. A autora coloca Brasília como “cidade de frente pioneira” (FERREIRA, 2010, p.71), exercendo forte influência desde sua fase inicial atraindo o fluxo migratório para o Centro-Oeste com uma alta taxa de crescimento populacional e a extensão do seu espaço urbano já é marcada no território antes da conclusão da construção do Plano Piloto. Na fase seguinte consolida-se a centralidade do Plano Piloto e os núcleos periféricos (cidades-satélites), que são interligados mas muito diferenciados em termos de urbanização. Após a consolidação da capital e evolução urbana continua e culmina com a formação de uma metrópole onde não é mais identificada apenas pelo seu Plano Piloto.

Ainda na pauta do desenho urbano, outra crítica recorrente é devido à sua orientação ao transporte motorizado, o que acaba interferindo em seu aspecto social e cotidiano, onde a “rua não existe” (UM-HABITAT, 2013, p.24).

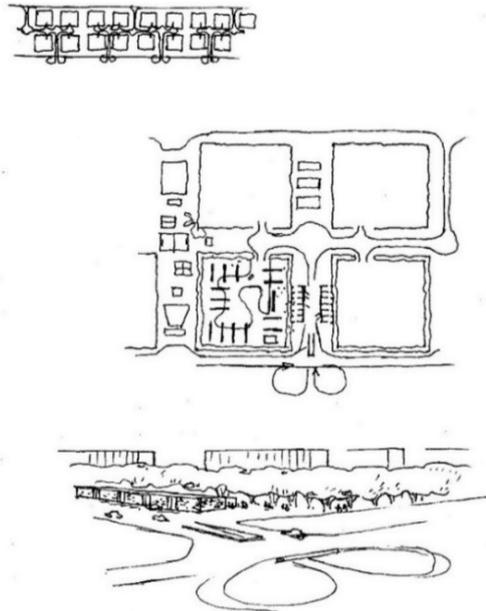
Galbinski (2014) discute esse aspecto e reflete sobre as ruas locais de Brasília e o conceito original da Carta de Atenas na qual a rua não é mais destinada às pessoas. Ainda coloca ênfase na necessidade de facilitar o fluxo das pessoas ao nível do solo e da luta entre a adaptação dos edifícios e a topografia se atentando para a qualidade da paisagem urbana e a experimentação do espaço.

3.2 O COMÉRCIO LOCAL

As áreas comerciais em Brasília sofreram alterações formais e de uso a partir do desenho conceitual de Lucio Costa (Figura 21). Foram criadas com o propósito de abastecer os moradores com itens cotidianos em um pequeno comércio voltado para as

superquadras e que pudessem ser acessados a partir do seu interior. Uma via de acesso para veículos foi criada junto a fachada posterior para acesso de serviço. Essas vias de acesso possuem quatro faixas de rolamento cercadas por estacionamentos.

Figura 21 – Desenho de Lucio Costa para o comércio local



Fonte: Imagem disponível em: <http://www.itaucultural.org.br/explore/blogs/rumos-2/rumos-2013-2014-lucio-costa-o-pai-da-moderna-arquitetura-brasileira-e-sua-confianca-inabalavel-no-pais/>. Acesso em 25 de maio de 2017.

Essa alteração do desenho do comércio local remonta a fase de construção do Plano Piloto, mais precisamente no CLS 107-108, a primeira comercial de Brasília. Mais uma vez foi destacado o desenho urbano orientado ao carro, em que as vitrines dos blocos comerciais também se reorganizaram voltando-se para a rua e onde os carros estacionam. As fachadas voltadas para as superquadras passaram a exibir uma característica de serviço e as fachadas voltadas para os carros transformaram-se em uma espécie de praça comercial segundo análise de Panerai (2014), atribuindo o fato à uma dinâmica comercial que impulsionou essas transformações.

Galbinski (2014) relata que a vida urbana nos primeiros 8 anos da capital foi suficientemente forte para reorganizar a diretriz original e as lojas foram abrindo as portas para as vias-locais, aproximando-as do conceito de rua de uma cidade tradicional e humanizando-as.

O comércio local norte (CLN), construído posteriormente (Figura 22), difere do típico bloco alongado com passagens cobertas para pedestres ligando o comércio ao interior das superquadras da Asa Sul (Figura 23). Foi substituído por blocos isolados medindo aproximadamente 26 x 26 metros com subsolo, um pavimento de lojas, sobrelojas e um pavimento residencial, que em alguns blocos não existe. Essa concepção elimina os critérios de frente e fundos da anterior, apresentando vitrines em todas as fachadas dos blocos e incorpora o uso misto. Uma comparação das duas configurações espaciais relacionadas ao comércio das superquadras do Plano Piloto pode ser observada também na Figura 24.

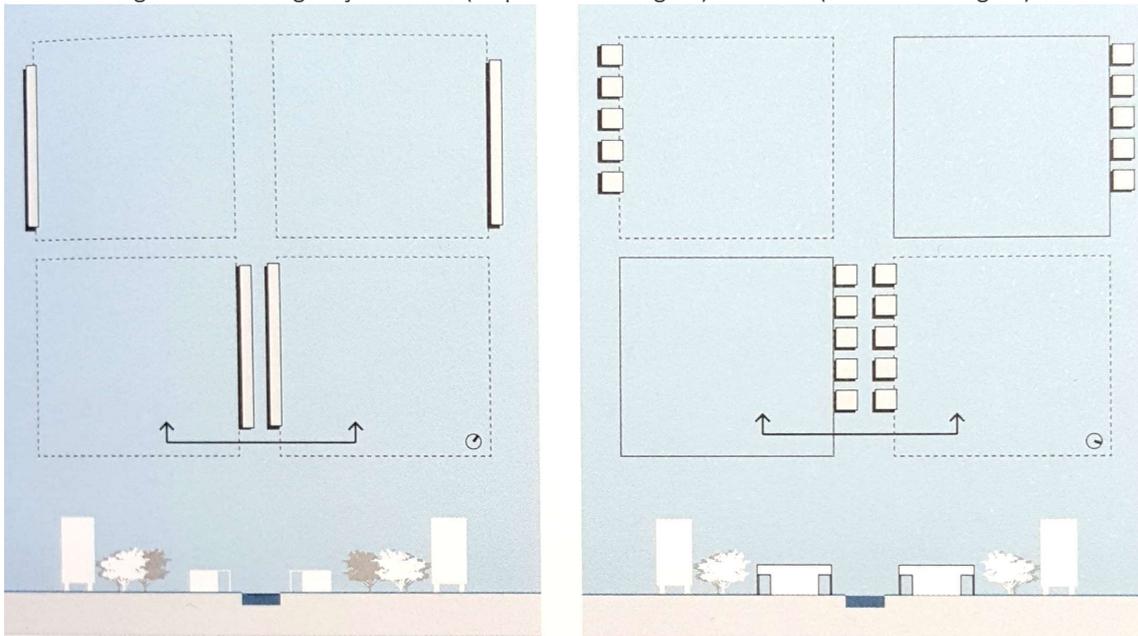
Figura 22 – Comércio Local Norte em blocos isolados e uso misto



Figura 23 - Comércio Local Sul



Figura 24 - Configuração do CLS (esquerda da imagem) e do CLN (direita da imagem).



Fonte: Tenorio e Gondin, 2014, p.85.

Mascarenhas (2013) registrou que a alteração da tipologia original no comércio local da Asa Norte não acometeu a apropriação social que existe entre as áreas comerciais e residenciais das superquadras. Ainda conclui que essa “reconfiguração do espaço apropriou-se da via modernista e a aproximou da rua ao estabelecer uma relação direta do espaço privado com a calçada e o espaço público com os pedestres e os veículos (MASCARENHAS, 2013, p.153)”. Pode-se observar essa apropriação durante a maior festa popular do país, o carnaval, em que os blocos de rua como são chamados tomam esses espaços públicos (Figura 25).

Figura 25 – Bloco de carnaval em uma comercial da Asa Norte



Fonte: <http://g1.globo.com/distrito-federal/noticia/2016/02/pacotao-e-destaque-do-segundo-dia-de-carnaval-em-brasilia.html>

Tenorio e Gondin (2014) fizeram um estudo nas superquadras e comércios locais avaliando sua evolução em termos de mobilidade sustentável. Com os resultados concluíram que ambas áreas tenderam a valorizar mais o automóvel em seu desenho por meio da disponibilidade de estacionamentos, estimulando o transporte particular gerando mais poluição, impermeabilização do solo e redução de áreas para pedestres e verdes. Na área comercial do bairro Noroeste são 4,35 vagas de automóveis para cada 100 m² de área construída versus 0,76 vagas por área construída na Asa Sul.

3.2.1 Estratégias para os Plinths

O objeto deste estudo, as áreas comerciais locais, foi determinado por conter maior complexidade de usos dentro do panorama do Plano Piloto. Observando os critérios que o Centro de Pesquisa para o Espaço Público de Copenhagen propõe como estratégias para fomentar os *plinths* vibrantes, confortáveis, e economicamente ativos pode-se relacionar: o edifício, a rua e o contexto (KARSSENBERG et al., 2015, p.214). Nessas categorias elenca-se estratégias desse centro de pesquisa referentes ao ambiente térmico para o pedestre, observando a sua importância nas três frentes que moldam esses espaços públicos no entorno dos térreos dos edifícios.

1. O edifício:

- Fachadas (orientação, transparência)
- Materiais (superfícies horizontais e verticais)
- Variação de alturas
- Usos mistos
- Zona híbrida: transição entre o público e o privado

2. A rua:

- Caminhabilidade
- Conforto ambiental
- Definição (relação W/H)

- Variação de tipos de edificações
- Arborização para sombreamento
- Densidade
- Disponibilidade de lugares para se sentar
- Estacionamentos

3. O contexto:

- Conexão com parques e praças
- Programação para uso econômico e cultural
- Coerência com o desenho urbano
- Usos mistos
- Atratividade para os pedestres se deslocarem durante o dia e noite

Entende-se neste estudo o pensamento global para as atividades nos *plinths*, mas estabeleceu-se dentro da temática de estudo de microclimas urbanos e mitigação de ICU o recorte para a investigação no item rua, abordando o ambiente térmico que contribui para o conforto ambiental dos pedestres. Nesse sentido, para a construção das estratégias agrupou-se questões relacionadas ao desenho do espaço público como o sombreamento com arborização e pavimentação e do edifício abordando materiais das coberturas.

3.3 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DE BRASÍLIA

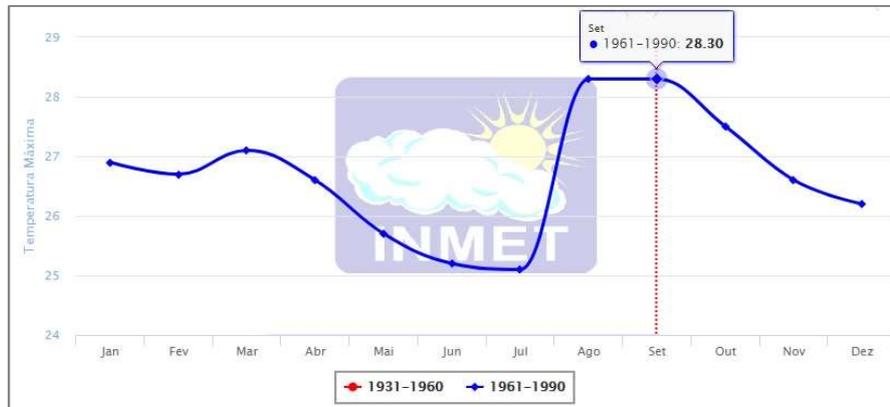
A cidade de Brasília está localizada na região Centro-Oeste do país, entre os paralelos 15°30' e 16°03' e os meridianos 47°18' e 48°17' (oeste de Greenwich) e aproximadamente 1.070 metros acima do nível do mar. Pertence às categorias Aw, Cwa e Cwb de Köppen e Geiger, que equivalem aos climas mesotérmicos úmidos de verão quente e de verão fresco. Segundo a classificação do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), apresenta o Tropical Brasil Central com duas estações com características distintas:

- Temporada quente e úmida: verão;
- Temporada quente e seca: inverno.

Essas estações podem ser visualizadas através dos gráficos das normais climatológicas do INMET - Instituto Nacional de meteorologia. As normais climatológicas são obtidas através do cálculo das médias de parâmetros meteorológicos, obedecendo a critérios recomendados pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e referem-se a períodos padronizados de trinta anos: 1901-1930, 1931-1960 e 1961-1990 (INMET, 2017). Em Brasília, os dados climáticos começaram a ser registrados em 1961. O INMET possui uma estação localizada no bairro Sudoeste e outra no Aeroporto Internacional de Brasília.

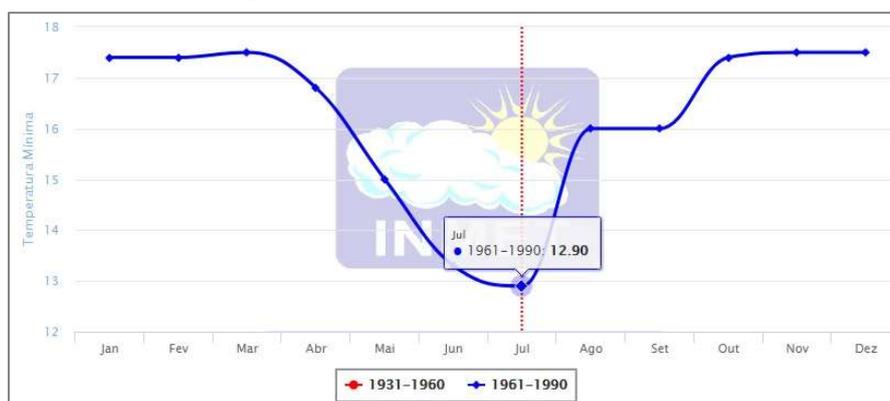
De acordo com o referido Instituto, a temperatura média máxima ocorre em setembro com 28.30°C e a temperatura média mínima em julho com 12.90°C. A umidade relativa do ar média diminui no inverno, atingindo um nível próximo de 50%. A precipitação média é mais baixa em junho, cerca de 7 mm. A maior média ocorre em janeiro com 247.40 mm. A Figura 26 até a Figura 29 mostram os gráficos extraídos do INMET para os parâmetros citados.

Figura 26 – Temperatura média máxima do ar.



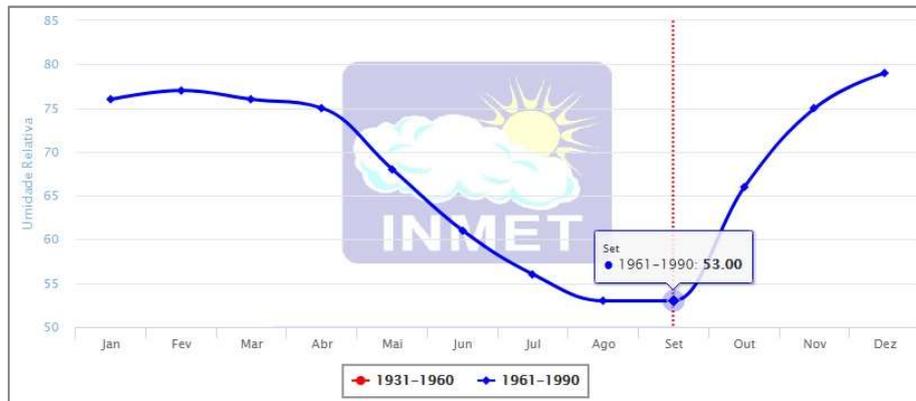
Fonte: INMET, 2017.

Figura 27 – Temperatura média mínima do ar



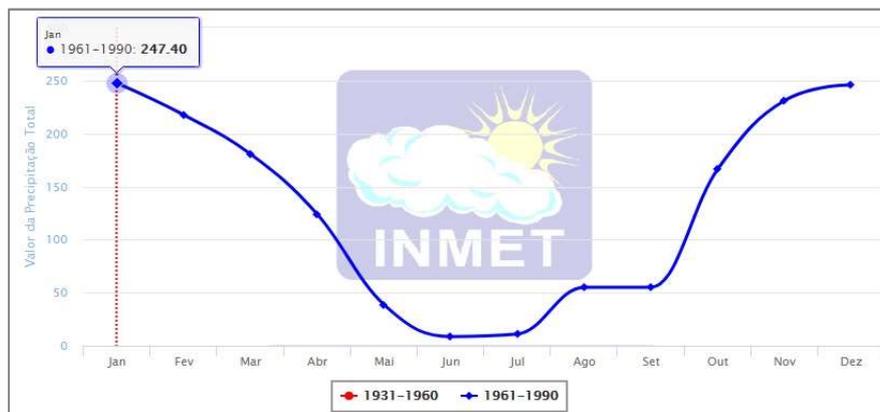
Fonte: INMET, 2017.

Figura 28 – Média da umidade relativa do ar



Fonte: INMET, 2017.

Figura 29 – Média do valor da precipitação total



Fonte: INMET, 2017.

Outra variável importante é amplitude térmica, que relaciona a diferença diária entre a temperatura máxima e a mínima. A amplitude é uma variável que depende da umidade do ar e em um dia seco as temperaturas podem ser acentuadas (ZANONI, 2015). A Figura 30 mostra o comportamento da relação entre temperatura e umidade do ar para Brasília.

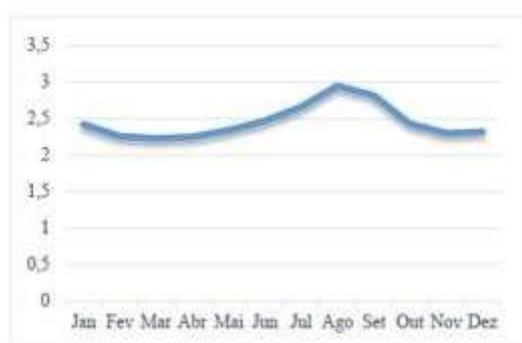
Figura 30 – Umidade relativa x Temperatura máxima do ar para dia de inverno em Brasília (24/07/2009)



Fonte: Zanoni, 2015, p.38.

O padrão de ventos pode ser observado na Figura 31. Os dados são registrados pelo INMET por meio de um sensor instalado a 10 metros de altura, seguindo o padrão internacional de meteorologia. Observa-se, no período seco, que a direção predominante do vento é a direção Leste. Já no período chuvoso a direção predominante é a Noroeste.

Figura 31 – Velocidade média mensal do vento em Brasília (m/s) e direções predominantes – Série 2001-2013



	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Média mensal da velocidade	2,42	2,26	2,23	2,25	2,34	2,47	2,66	2,95	2,82	2,43	2,3	2,32
Direção – 1ª predominância	NO	L	L	L	L	L	L	L	L	L	NO	NO
Direção – 2ª predominância	L	NO	NO	SE	L	N						

Fonte: Zanoni, 2015, p.53.

Sobre a radiação solar, as normais climatológicas de 1961-1990 fornecem dados de insolação onde constata-se o valor máximo de 266 horas para o mês de julho e o mínimo de 138 horas em dezembro. A radiação global começou a ser registrada no ano 2000 pela estação automática do INMET de forma horária expressa em KJ/m². Uma variável que influencia a radiação global é a nebulosidade. Expressa em décimos, a média (1961-1990) chega a 8 em dezembro e 3 de junho a agosto.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Este capítulo teve como objetivo apresentar brevemente o contexto urbano de Brasília com foco no Plano Piloto e sua caracterização climática. Seu desenho tem uma forte identidade e o crescimento da cidade se distingue bastante do conceito original

projetado por Lucio Costa. Foram vistas as quatro escalas que compõem o espaço urbano do plano piloto: monumental, residencial, gregária e bucólica.

Os espaços públicos existentes nas escalas foram classificados de acordo com o agrupamento proposto por Romero (2015) em simbólico, cotidiano e de passagem. Os espaços públicos das áreas de comércio local foram destacados pois são objeto de estudo deste trabalho como espaço do cotidiano e da vida pública da cidade. Não fez parte do objetivo do trabalho um aprofundamento na questão legal e real do comércio local em Brasília, uma vez que essa temática leva a outras discussões de história, planejamento e preservação.

A caracterização climática da cidade abordada nesse capítulo permitiu conhecer as estações quente-seca e quente-úmida, a alta amplitude térmica e a relação entre umidade relativa e temperatura do ar. Esses dados serão muito importantes para a simulação computacional tanto para a configuração dos dados climáticos quanto para a interpretação dos resultados simulados.

4 APLICAÇÃO DE MÉTODOS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL EM ESTUDOS DE MICROCLIMAS

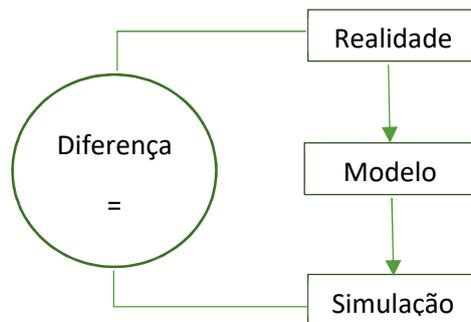
Este capítulo tem como objetivo destacar a utilização da simulação microclimática como uma metodologia para o estudo do clima urbano com destaque para o programa ENVI-met. Posteriormente são elencadas pesquisas acadêmicas com base em simulação microclimática com o ENVI-met que trabalharam essa temática e analisaram diferentes parâmetros de saída calculados pelo programa como temperatura do ar, umidade relativa do ar e índice PMV (voto médio predito). Buscou-se também estudos que analisaram temperatura de superfície e temperatura média radiante.

A simulação computacional pode ser empregada como um método de pesquisa para a compreensão dos fenômenos relacionados ao clima urbano e avaliar as estratégias mitigadoras dos impactos da ICU antes de sua implementação. Este recurso tem sido amplamente aplicado em trabalhos didáticos e de pesquisa, podendo ser uma alternativa aos trabalhos de campo para obtenção de informações para diagnóstico (BARBIRATO et al., 2016). As categorias de modelagem atendem as camadas:

- Intra-urbana – camada dossel urbano (CDU): simulação térmica de edifícios para avaliação de consumo energético, simulações de cânions urbanos e conforto ambiental;
- Camada limite urbana (CLU): simulação de modelos em mesoescala.

Para Hernandez (2015), as ferramentas de simulação geram um modelo que traduz o comportamento de um fenômeno por meio de equações e hipóteses e demonstra uma incerteza entre esse modelo e a realidade, como representado esquematicamente na Figura 32. O autor ressalta que o resultado simulado é uma estimativa cuja precisão dependerá dos dados de entrada.

Figura 32 – Representação genérica de um fenômeno a ser analisado



Fonte: Adaptado de Malkawi e Augenbroe (2004) *apud* Hernandez (2015, p.292).

Este trabalho tem foco na camada intra-urbana para estudo de microclimas. Essas simulações abrangem transferência de calor entre edifícios e o entorno incluindo a vegetação, solo, geometria urbana, padrões de ventos, cargas solares e sombreamento ao longo do dia (GARTLAND, 2010). Nesse sentido, várias ferramentas têm sido desenvolvidas para avaliar condições microclimáticas e de conforto térmico

urbano destacando-se como exemplo os programas TownScope, RayMan, SOLWEIG, Umi e o ENVI-met, o mais popular para modelagem microclimática urbana.

4.1 MODELAGEM MICROCLIMÁTICA COM ENVI-MET 4

O programa ENVI-met² foi desenvolvido para análises urbanas microclimáticas a partir de uma modelagem holística tridimensional. O seu prognóstico é baseado nas leis da termodinâmica e dinâmica dos fluidos promovendo simulações das interações entre o edifício isolado, superfícies e vegetação (Bruse, 2017) abrangendo:

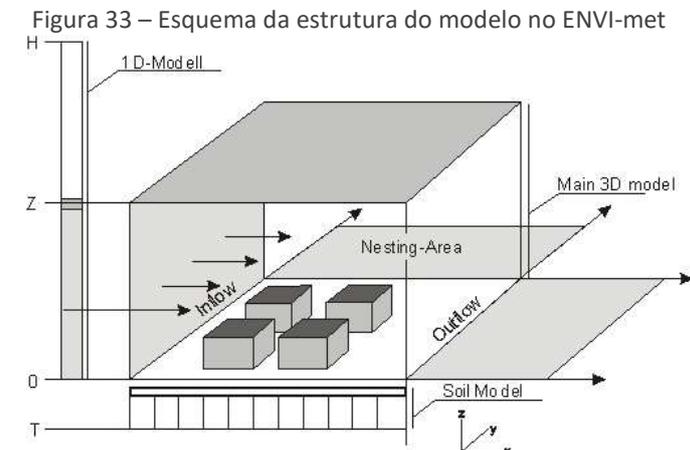
- Fluxos de radiação de onda curta e onda longa, incluindo o sombreamento, reflexões dos edifícios e da vegetação;
- Transpiração, evaporação e fluxo de calor sensível das áreas vegetadas;
- Temperatura de superfície dinâmica e temperatura das paredes para cada fachada e elementos de cobertura suportando até três camadas de materiais;
- Trocas de calor e umidade com o solo;
- Representação 3D da vegetação incluindo o balanço hídrico;

A mesa de simulação corresponde ao espaço para criação do modelo correspondendo ao tamanho real da malha a ser simulada através da configuração do tamanho da grade que contém informações de largura x comprimento x altura.

A estrutura básica de um modelo no ENVI-met possui duas dimensões horizontais (x e y) e uma dimensão vertical (z). Dentro do modelo são inseridos os elementos que representam a área real como edificações, vegetação e demais superfícies de acordo com os valores numéricos atribuídos à grade que compõe a mesa de simulação (Figura 33). Quanto menor a grade, maior resolução terá o modelo. Por

² O software foi desenvolvido pelo Professor Michael Bruse da Universidade de Mainz, na Alemanha, e seu time. Atualmente a ferramenta está na versão 4.1 e possui uma versão gratuita (*basic*) para aplicações não comerciais. Há uma versão profissional que inclui opções mais avançadas de modelagem, análises e maior tamanho para mesa de simulação.

exemplo uma área de 100 x 100 metros pode ser configurada para uma mesa de simulação de 100 x 100 x 40 (mesa disponível na versão gratuita) com cada grade valendo 1 x 1 x 1 metro (x, y e z).



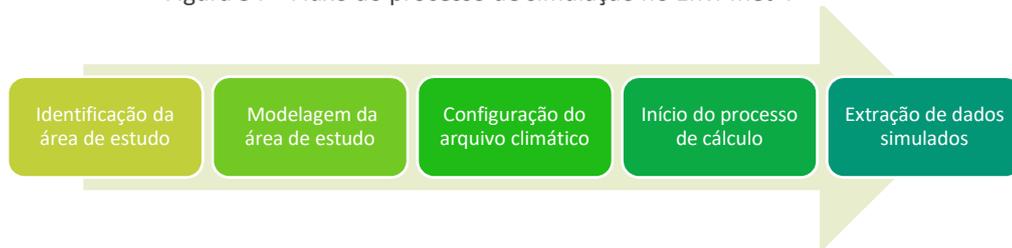
Fonte: ENVI-met, 2017. Disponível em: <http://www.model.envi-met.com/hg2e/doku.php?id=kb:modellayout>

De forma geral, o modelo gerado pelo ENVI-met consiste em um modelo que inclui perfis verticais de diferentes parâmetros meteorológicos até uma altura de 2500 metros (aproximadamente a altura da camada limite planetária) e um núcleo tridimensional que inclui dados de atmosfera, solo, vegetação e construções. Uma área chamada "*nesting*" envolve esse núcleo e sua finalidade é criar condições estáveis de contorno (ENVI-met, 2017), como uma borda. O programa recomenda a utilização de 5 pixels para essa borda.

4.1.1 Processo de simulação do programa ENVI-met 4

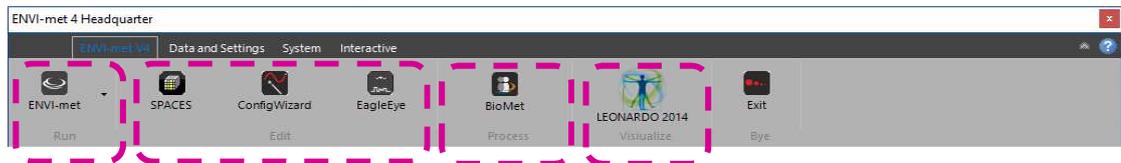
Para um entendimento geral da simulação no ENVI-met 4 é apresentado na Figura 34 um fluxo com as etapas do processo. A barra de tarefas do programa contém os botões para acessar as configurações e aplicações (Figura 35) que foram resumidas a seguir. Um detalhamento sobre a modelagem será demonstrado na construção dos cenários de calibração, base e de mitigação de ICU.

Figura 34 – Fluxo do processo de simulação no Envi-met 4



Fonte: Adaptado de Silva e Werneck (2016)

Figura 35 – Barra de tarefas ENVI-met 4

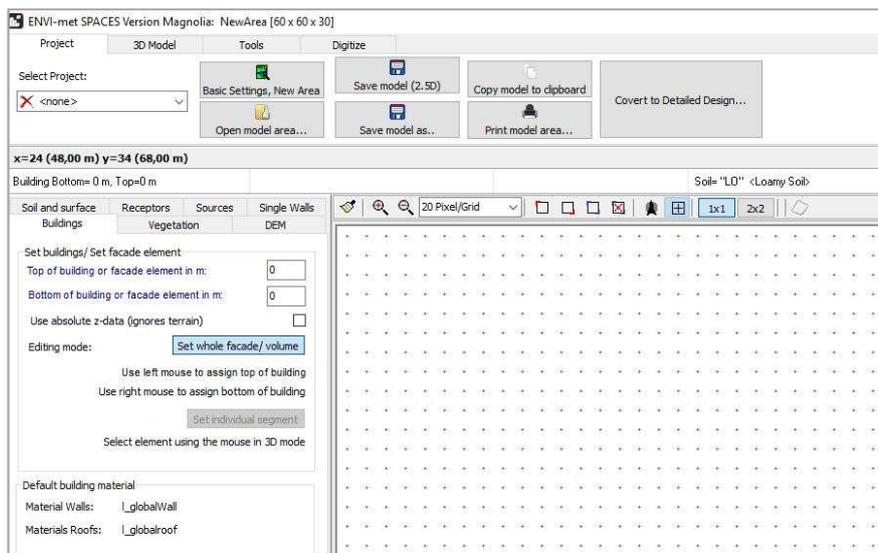


- *Run* = Simulação: inicia o processo de cálculo propriamente dito. Permite três tamanhos de mesa de simulação correspondendo proporcionalmente ao tamanho real da área: 100x100x100, 150x150x35 e 250x250x25. A versão gratuita, utilizada nesta dissertação, possibilita apenas a seleção da primeira mesa;
- *Edit* = Edição: inicia a área de modelagem, configuração do arquivo climático e a inserção da localização geográfica;
- *Process* = Processamento do índice de conforto do usuário;
- *Visualise* = Visualização: extração dos dados simulados (mapas e planilhas).

4.1.2 O ambiente de modelagem: *Spaces*

O ambiente de modelagem do ENVI-met é chamado de *Spaces* onde é definido o tamanho da grade do desenho em metros (X, Y, Z) que irá determinar o tamanho da mesa de simulação já descrito anteriormente. O desenho começa com a sobreposição de informações a partir de uma imagem com vista aérea do local como tipo de terreno, solo, materiais urbanos, altura das edificações, arruamento e vegetação, preenchendo toda a imagem. Também são atribuídas informações de latitude e longitude do local, horário de referência, altitude e nome da cidade (Figura 36).

Figura 36 – Ambiente de modelagem do ENVI-met 4.



Fonte: autor (captura de tela).

4.1.3 Banco de dados

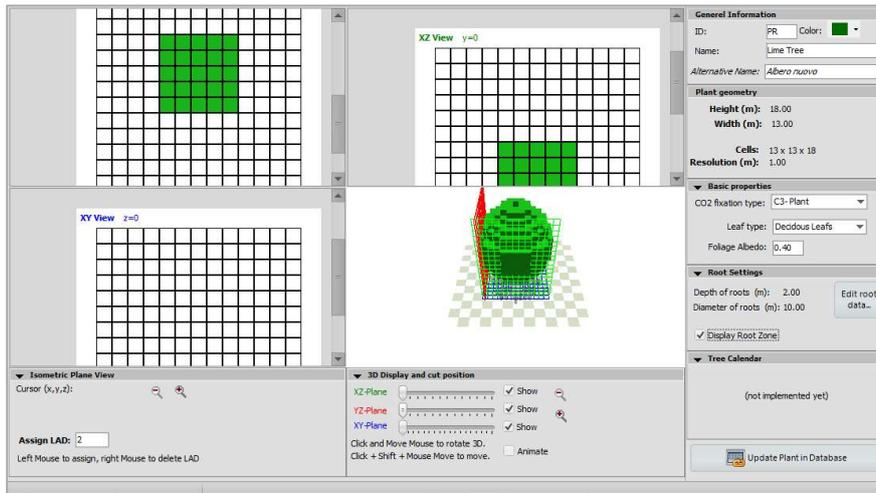
O ENVI-met contém um gerenciador de banco de dados (*Manage Database*) onde é possível visualizar e adicionar materiais para composição de paredes e coberturas, perfis de solo (naturais e artificiais), plantas (1D), sistemas construtivos, localização geográfica e fontes de água. O banco de dados de materiais é limitado a materiais típicos. Para adicionar materiais é necessário informar as propriedades termo-físicas como densidade, calor específico, condutividade térmica, emissividade para radiação térmica de onda longa e absorção de radiação de onda curta.

4.1.4 Editor de modelos de vegetação 3D: Albero

O banco de dados de vegetação 3D contém espécies divididas em decíduas e coníferas com características que podem ser editadas com a ferramenta Albero: altura e largura da copa, capacidade de fixação de CO₂, albedo da folhagem, profundidade e diâmetro das raízes e densidade de área foliar³ (LAD – *leaf area density*). Este banco permite inserção de novas espécies e a criação de pastas pelo usuário para organização dos seus modelos de vegetação (Figura 37).

³ Densidade de área foliar é definida pela relação entre a área total de folhas e o volume da copa, expressa em m²/m³. É utilizada em estudos de interceptação de luz em árvores, fotossíntese e evapotranspiração.

Figura 37 – Edição de modelo de vegetação no Albero.

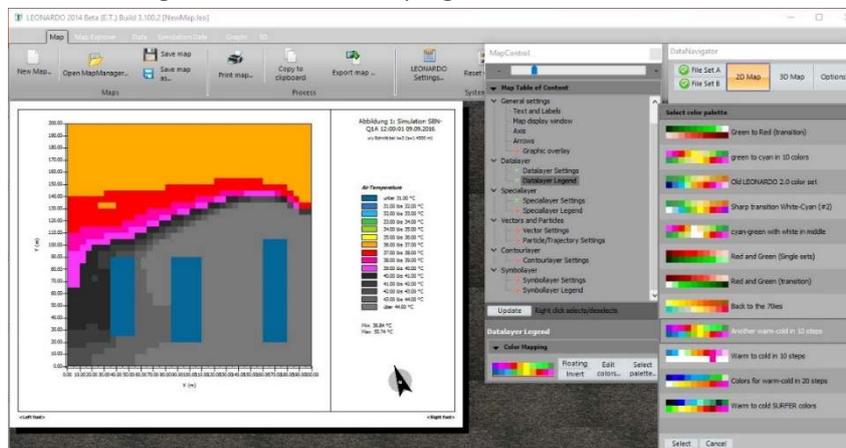


Fonte: autor (captura de tela).

4.1.5 Extração dos resultados

Os resultados das simulações são gerados em duas formas: em um arquivo de texto que contém os dados em formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e em um arquivo com formato binário. O arquivo de texto pode ser acessado com um programa visualizador de texto e o arquivo binário é acessado com o programa Leonardo, que faz parte do pacote de ferramentas do ENVI-met e permite a elaboração de mapas e tabelas para análise dos resultados. O programa oferece saídas do processamento com possibilidade de ajuste da altura da escala vertical que se deseja analisar para variáveis climáticas como: temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, temperatura média radiante, entre outros. A interface do programa pode ser visualizada na Figura 38.

Figura 38 – Interface do programa Leonardo versão 4.



Fonte: autor (captura de tela).

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Uma análise crítica deve ser feita a partir dos resultados simulados, podendo ser empregados procedimentos metodológicos para fins de verificação dos resultados gerados pelo ENVI-met para a calibração do modelo. Basicamente são comparados os dados simulados com dados medidos em campo e determina-se assim a margem de erro. As variáveis microclimáticas mais utilizadas para a calibração do modelo foram temperatura do ar e umidade relativa.

Alguns dos testes estatísticos encontrados na literatura para validar os valores das séries temporais medidas e simuladas pelo modelo ENVI-Met 4 foram: indicador de desvio médio de valores (MBE), medida de dispersão dos valores estimados em relação aos valores medidos (RMSE), coeficiente de correlação, coeficiente de determinação (R^2) e erro médio absoluto (MAE). Esses indicadores foram utilizados de forma recorrente nos estudos de calibração do ENVI-met 4 (GUSSON, 2014; SOUZA et al., 2016; GÄAL, 2017).

A validação a partir do objetivo de comparação entre dados reais e dados simulados possui uma limitação no sentido que se define para a simulação um “clima tipo” segundo Tumini (2012, p. 194), baseado em valores estatísticos médios para o lugar estudado, enquanto que os valores medidos são de um dia do ano e não representativos de uma condição média.

Nesse sentido, Barbirato et al. (2016) apontam como desafio a dificuldade de se obter parâmetros de entrada físicos e meteorológicos intensificando diferenças entre modelagens e observações de campo com simplificações da complexa realidade do clima urbano no modelo numérico. Sobre o uso de simulações computacionais microclimáticas no contexto brasileiro, as autoras concluem que é importante para a consolidação desse enfoque na área do planejamento urbano.

4.3 PESQUISAS COM BASE EM SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM O ENVI-MET

O programa foi consolidado no contexto de pesquisas internacionais (MALEKI e MAHDAVI, 2016; SALATA *et. al*, 2016; LOBACCARO e ACERO, 2015) e nacionais,

compondo métodos de pesquisas acadêmicas tanto na versão anterior (versão 3.1) quanto na mais recente (versão 4). Selecionou-se como referência algumas teses e dissertações brasileiras a partir de dois recortes temporais: do ano de 2009 que engloba as publicações sobre a utilização do ENVI-met para o Distrito Federal e a partir do ano de 2014 para outras regiões do país, ano em que foi disponibilizado a versão 4 do programa.

O estudo de Castelo Branco (2009) analisou o comportamento microclimático em uma superquadra da capital com foco na vegetação urbana, utilizando a versão 3.1 do programa. Medições em campo foram realizadas tomando como referência os meses de setembro de 2008 e janeiro de 2009 para caracterizar o período quente-seco e quente-úmido da cidade. Foram analisados três pontos com percentuais diferentes de vegetação e relação W/H. No processo de calibração foi assumido um erro de 15% entre os dados medidos e simulados e as análises apontaram a importância da vegetação em relação à temperatura do ar entre os pontos estudados.

O trabalho de Silva (2013) investigou o conforto térmico em cavidades urbanas utilizando o índice PMV (voto médio predito) fazendo análises comparativas entre cenários hipotéticos com diferentes valores de W/H e orientações no Plano Piloto de Brasília, definindo três categorias de cavidades urbanas. Os meses de referência para representar as estações da cidade foram setembro e janeiro e as configurações climáticas do ENVI-met utilizadas seguiram as definições de Castelo Branco (2009).

Em São Paulo, Gusson (2014) usou a versão 4 do programa para estudar o efeito da densidade construída sobre o microclima urbano, simulando diferentes cenários de ocupação de quadras e tipologias edilícias para a cidade. A calibração foi realizada para comparar dados medidos em campo e simulados e os resultados foram confiáveis. O cenário com torres apresentou menores temperaturas do ar nos períodos diurno e noturno.

No contexto climático de Campinas - SP, Gäal (2017) estudou a influência da geometria e da legislação de uso e ocupação do solo no microclima de cânions urbanos. Foram realizados testes de validação da versão 4 *preview* para as variáveis temperatura do ar e umidade relativa obtendo-se coerência entre os dados medidos e simulados para

períodos de inverno e verão. Os resultados mostraram correlação entre a relação H/W e o conforto térmico nos cânions utilizando o índice PET.

No cenário internacional, a pesquisa de Tsoka *et al* (2017) realizada na Grécia com materiais frios em pavimentos sob variações meteorológicas sazonais foi uma referência importante para este trabalho pois segue a mesma linha de investigação. O ENVI-met 4.1 foi utilizado para as simulações microclimáticas do cenário original e dos modificados. Tendo em vista a temperatura do ar, as reduções foram pequenas para todas as condições meteorológicas testadas. O parâmetro de temperatura de superfície apresentou maior redução no verão, primavera e outono e baixa redução no inverno.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso de simulação computacional para estudos de microclimas urbanos. Foi estabelecido o programa ENVI-met 4.2 (versão *basic*) como ferramenta a ser utilizada para as simulações computacionais devido à confiabilidade dos resultados demonstrados pelos autores citados e porque reúne os principais componentes formadores de um microclima urbano (atmosfera, solo, vegetação e edifícios) em uma única ferramenta disponível gratuitamente, mesmo com algumas limitações de análises referentes à essa versão.

Foi visto que as implementações no ambiente de modelagem possibilitam o desenho em três dimensões de uma edificação e a edição de materiais urbanos e vegetação. Dessa forma, aumentam o detalhamento da modelagem atribuindo mais características de acordo com o cenário observado.

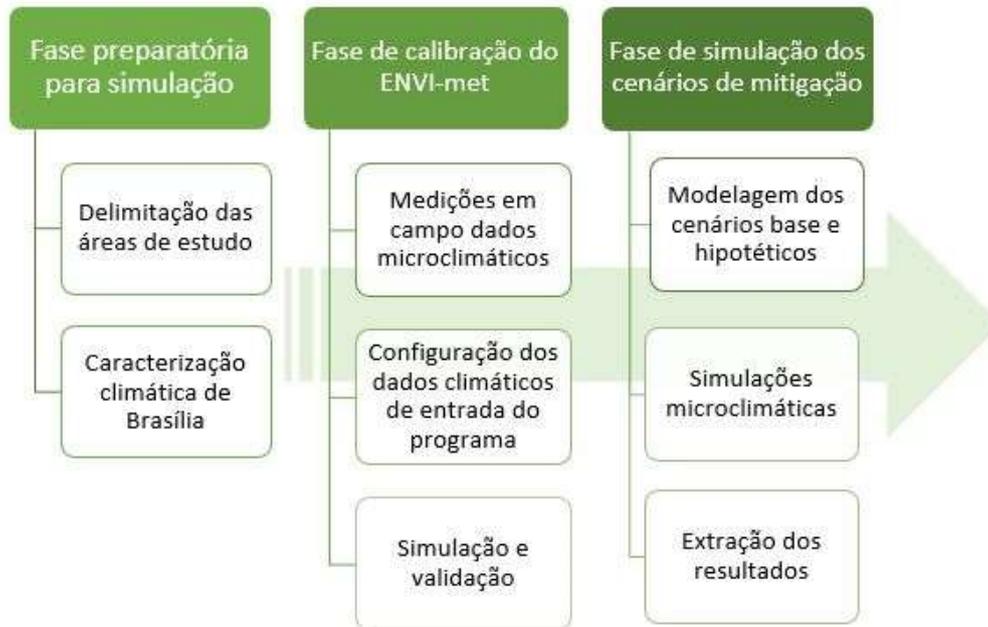
Os trabalhos que utilizam essa metodologia forneceram suporte quanto aos aspectos da modelagem, calibração e validação dos dados microclimáticos, limitações da ferramenta e aplicações em diversas análises incluindo morfologia, vegetação e conforto urbano. Os parâmetros mais analisados nesse recorte temporal foi a temperatura do ar, umidade relativa do ar e índices de conforto térmico como PMV e PET.

5 PESQUISA DE CAMPO E SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos empregado nesta etapa, que abrange pesquisa de campo e simulação microclimática. O embasamento teórico para sua organização inclui a revisão bibliográfica e os treinamentos dos programas ENVI-met 4.2.0 e ArcGis versão 10.3, programas de simulação microclimática e geoprocessamento utilizados para respaldar as análises que envolvem as complexidades do clima urbano.

O método empregado para realização das simulações microclimáticas foi dividido em três fases sequenciais: fase preparatória, fase de calibração do ENVI-met e fase de simulação. A Figura 39 sumariza as fases da investigação.

Figura 39 – Fluxograma das fases integrantes do trabalho



A fase preparatória relacionou as informações necessárias para delimitação das áreas de estudo e o conhecimento das principais características do clima de Brasília, organizando os dados meteorológicos para alimentação do ENVI-met visando a construção, na etapa seguinte, de um arquivo de simulação. Na fase de calibração foi realizado um estudo piloto para validação dos resultados do ENVI-met com base na comparação dos dados medidos em campo (temperatura do ar e umidade relativa) com os simulados. Na fase de simulação, os cenários de mitigação foram modelados em três dimensões e geradas as simulações. As três fases serão detalhadas nos itens 5.1, 5.2 e 5.3 respectivamente.

Os cenários hipotéticos foram implementados com estratégias utilizando materiais frios e vegetação visando mitigação de ilhas de calor. Os resultados de cada cenário foram comparados com o caso base para investigar o impacto de cada configuração alterada. O cenário base (controle) foi simulado assumindo os padrões originais de cobertura do solo (asfalto, concreto e grama). Para uma análise

comparativa, três parâmetros foram extraídos para avaliar o efeito de cada estratégia: temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante (TMR). O parâmetro de temperatura de superfície foi abordado em função da alteração do albedo e emitância térmica propostos pelos materiais frios. A temperatura do ar e TMR foram escolhidas por constituírem parâmetros que influenciam o equilíbrio térmico humano e assim relacionados ao conforto térmico.

Para a extração dos resultados trabalhou-se com mapas de distribuição dos parâmetros analisados e dados quantitativos do potencial de redução de temperatura do ar a partir da avaliação da temperatura média das áreas simuladas. Esse cálculo de temperatura média foi realizado reunindo dados de saída de cada *pixel* que forma a matriz da área simulada tendo como referência um corte na altura de 1,50 metros do nível do solo. O programa de extração de resultados do ENVI-met, chamado Leonardo, proporciona a opção de trabalhar com planilhas no formato xls permitindo calcular a média de cada horário. Foi aplicado um filtro na planilha para remover os *pixels* referentes às edificações, obtendo-se apenas valores do espaço aberto.

Também foram utilizados mapas comparativos onde são sobrepostos dois cenários (controle e modificado) no ambiente do Leonardo. O resultado final é um mapa fundamentado na operação matemática de subtração aplicada em cada pixel do cenário original e seu correspondente no cenário modificado determinando dessa forma onde houve aumento ou redução de temperatura.

5.1 FASE PREPARATÓRIA

5.1.1 Seleção de recortes urbanos para estudo

O processamento de imagens de satélites é uma técnica em desenvolvimento crescente para a detecção da temperatura da superfície da área urbana. Seu uso, combinado com imagens de alta resolução espacial, pode contribuir para o planejamento urbano em termos de compreensão da variação da temperatura da superfície e sua relação com os usos do solo urbano.

O programa ArcGIS versão 10.3 foi utilizado para o processamento das imagens. Ele pertence à família de ferramentas SIG (Sistema de Informação Geográfica) e permite

armazenar, organizar, processar e apresentar dados georeferenciados. Sendo assim, o produto do processamento constitui um mapa que foi obtido de acordo com o método representado na Figura 40.

Figura 40 – Representação esquemática do método para obtenção de mapa de temperatura superficial.



As imagens do satélite Landsat 8 são disponibilizadas gratuitamente via internet pelo Serviço Geológico Americano (USGS). O recorte desse estudo, a cidade de Brasília, foi pesquisado e selecionou-se a imagem do dia 21 de setembro de 2015, correspondente ao período de seca, pouca nebulosidade e com ocorrências de temperaturas elevadas em seu território, conforme observado na caracterização climática deste trabalho.

A imagem é disponibilizada com referência espacial WGS 1984 UTM Zona 23N, sendo necessário reprojeta-la para o hemisfério sul. Foi utilizada a ferramenta ArcMap do ArcGIS. Destacam-se as seguintes características da imagem capturada:

- Data de passagem do satélite: 21/09/2015
- Horário central: 13:14h GMT – equivalente às 10:14h do horário de Brasília
- Latitude: -14.84423
- Longitude: -48.97268

O sensor infravermelho do Landsat 8 (TIRS) mede a intensidade do fluxo radiante proveniente da superfície terrestre. Essa radiância é denominada radiância aparente por incluir influência da atmosfera e de objetos vizinhos, sendo convertida em números digitais no próprio sensor, escalonados em diferentes amplitudes (SANTOS et al., 2014). Para o tratamento da imagem infravermelha termal, os números digitais da banda 10 deverão ser convertidos para radiância espectral do topo da atmosfera (L_{λ}), posteriormente para temperatura de brilho em Kelvin (K) e graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$). As

equações foram disponibilizadas pelo USGS (2016) e as constantes e fatores multiplicativo e de redimensionamento estão sumarizadas no arquivo metadado da imagem. A ferramenta *raster calculator* do ArcMap, componente do *software* ArcGIS, foi utilizada para o processamento das imagens.

$$L\lambda = ML * Qcal + AL \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

$L\lambda$ = Radiância espectral no topo da atmosfera ($W / (m^2 * sr * \mu m)$)

ML = Fator multiplicativo de redimensionamento da banda 10 = 0.00033420

Qcal = número digital = imagem banda 10

L = Fator de redimensionamento aditivo específico da banda 10 = 0.10000

A temperatura de brilho do sensor assume que a Terra é um corpo negro (emissividade igual a 1) e inclui efeitos atmosféricos como absorção e outras emissões (SANTOS et al., 2014). Também chamada de temperatura radiante, pode ser estimada pela equação 2.

$$T_{rad} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

T_{rad} = Temperatura radiante em Kelvin (K)

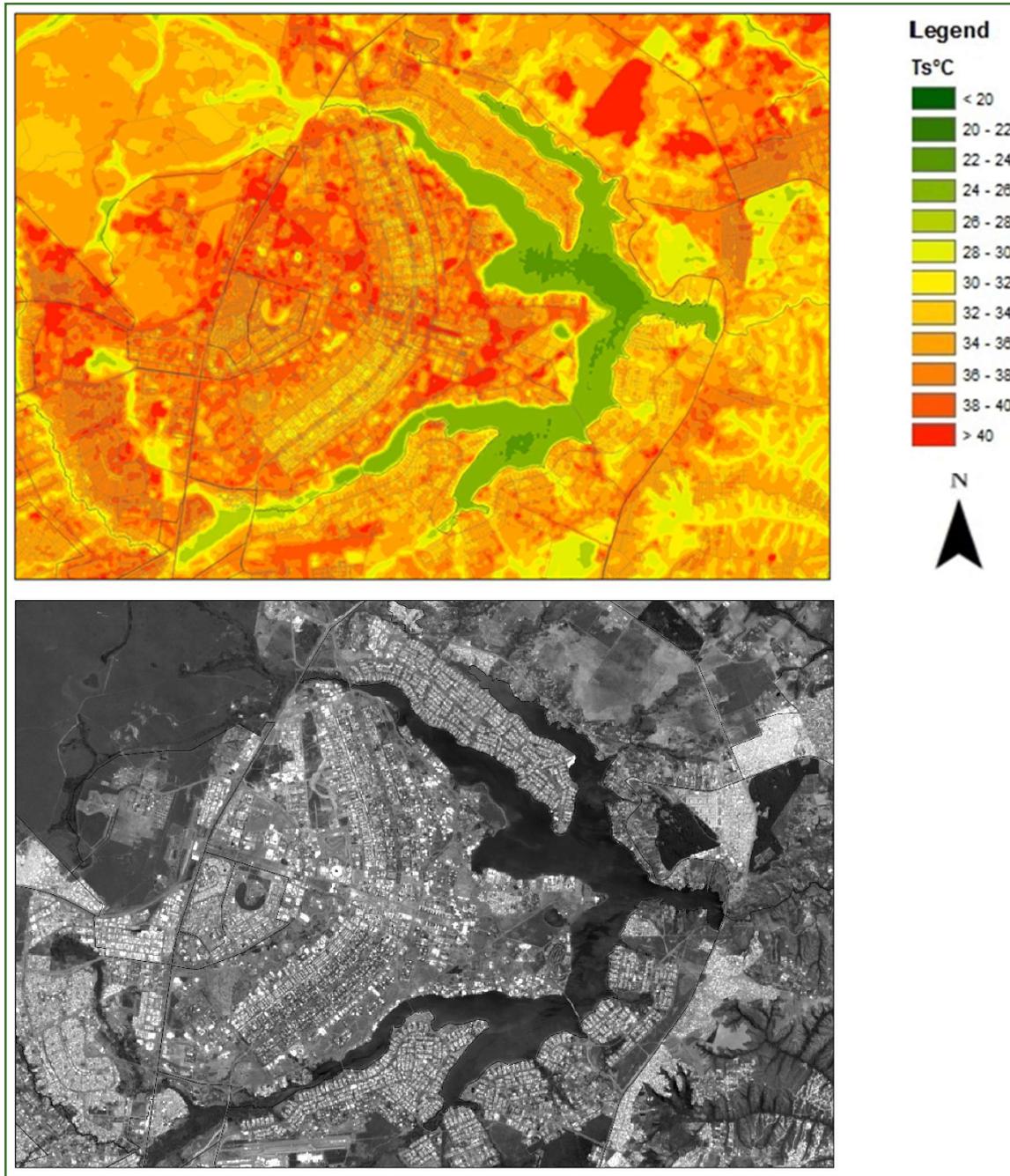
K2 = Constante termal 2 da banda 10 = 1321.08 (K)

K1 = Constante termal 1 da banda 10 = 774.89 (K)

$L\lambda$ = Radiância espectral em $W / (m^2 * sr * \mu m)$

Após este processamento aplicou-se a transformação das temperaturas de unidade Kelvin (K) para graus Celsius ($^{\circ}C$), subtraindo o seu valor absoluto igual a 273,15. Com a aplicação desse método foi elaborado um mapa de temperatura superficial, relativo à área de estudo. Com a conversão dos níveis de cinza da imagem da banda termal 10 para valores de temperaturas, em graus Celsius, obteve-se um mapa com as variações térmicas intra-urbanas na escala de 1:100.000 para o dia 21 de setembro de 2015. O resultado foi reclassificado em 12 faixas de temperaturas apresentadas na legenda da Figura 41.

Figura 41 – Temperatura de superfície de Brasília derivada da imagem do satélite Landsat 8 em 21/09/2015 às 13:14h GMT e imagem pancromática correspondente.



No mapa de distribuição de temperatura de superfície constata-se que, em geral, as áreas urbanizadas de Brasília apresentaram temperaturas de superfície variando de 28°C até registros maiores que 40°C para o dia em destaque. Observa-se a mancha urbana periférica potencialmente mais quente que no Plano Piloto, Lago Sul e Lago Norte. Os corpos d'água (Lago Paranoá e Lagoa do Jaburu) apresentaram temperaturas

em torno de 22°C. Em uma análise visual permitiu-se localizar frações urbanas com temperaturas de superfície mais amenas entre 28°C e 30°C em áreas residenciais da Asa Sul, Lago Sul, Parque da Cidade e contorno do Lago Paranoá.

Regiões periféricas, áreas com solo exposto e nas áreas cultivadas também ocorrem variações termais atingindo temperaturas acima de 40°C. Uma hipótese é que esse aumento intenso de temperatura configura ocorrência de vegetação seca ou de queimadas, propiciadas pela ausência de chuvas e baixa umidade relativa do ar, características desta época do ano na região segundo Azevedo e Souza (2013).

Nas áreas residenciais destacam-se temperaturas mais amenas nas superquadras da Asa Sul na faixa de 30°C a 34°C. Já no Eixo Rodoviário a variação é de 36°C a 40°C. No setor Sudoeste a variação ocorre na faixa de 34°C a 40°C e o Parque da Cidade aparece como uma área mais amena nas proximidades das pequenas lagoas. A Asa Sul foi a primeira a ser construída e possui maior arborização. Pesquisas de Romero (2011) afirmam que edifícios construídos nas superquadras a partir de 1990 possuem elementos que prejudicam o fluxo do vento e aumentam a temperatura do ar como pilotis descaracterizados, fachadas espelhadas e plantas ornamentais que não oferecem sombra.

Para essa etapa, duas áreas com comércio local no Plano Piloto foram selecionadas para simulação microclimática, localizadas de acordo com a Figura 42. A variação de temperatura de superfície foi um importante norteador para essa determinação onde optou-se por analisar duas áreas planejadas com morfologias diferentes: uma área para comércio na Asa Sul, o CLS 113/114, que apresentou temperatura de superfície mais amena em comparação com a segunda área escolhida, o CLN 201/202. Os recortes das imagens mostram o entorno das áreas de estudo com o intuito de evidenciar as variações de temperatura de superfície, já que a baixa resolução da banda termal não permite um enquadramento em microescala, que será investigada com as simulações microclimáticas.

Um estudo de sombreamento de cada área foi realizado com o programa Ecotect versão 5.5 e observa-se que o CLN 201/201 possui uma orientação Leste-Oeste que propicia que a via receba radiação solar direta com menor interferência de

sombreamento das edificações quando comparada à CLS 113/114, que possui orientação Noroeste-Sudoeste (Tabela 2).

Figura 42 – Ilustração com a localização dos estudos de casos.

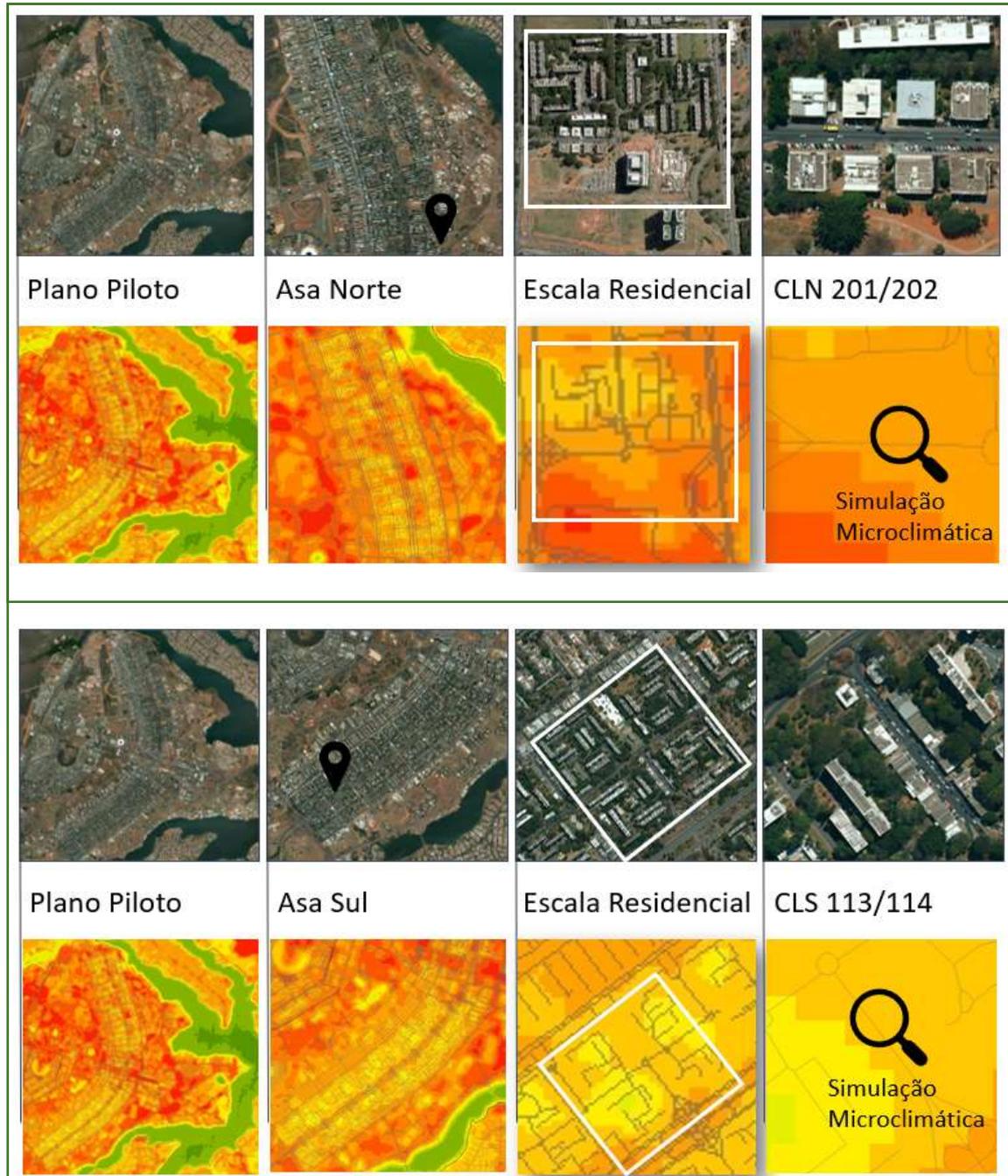
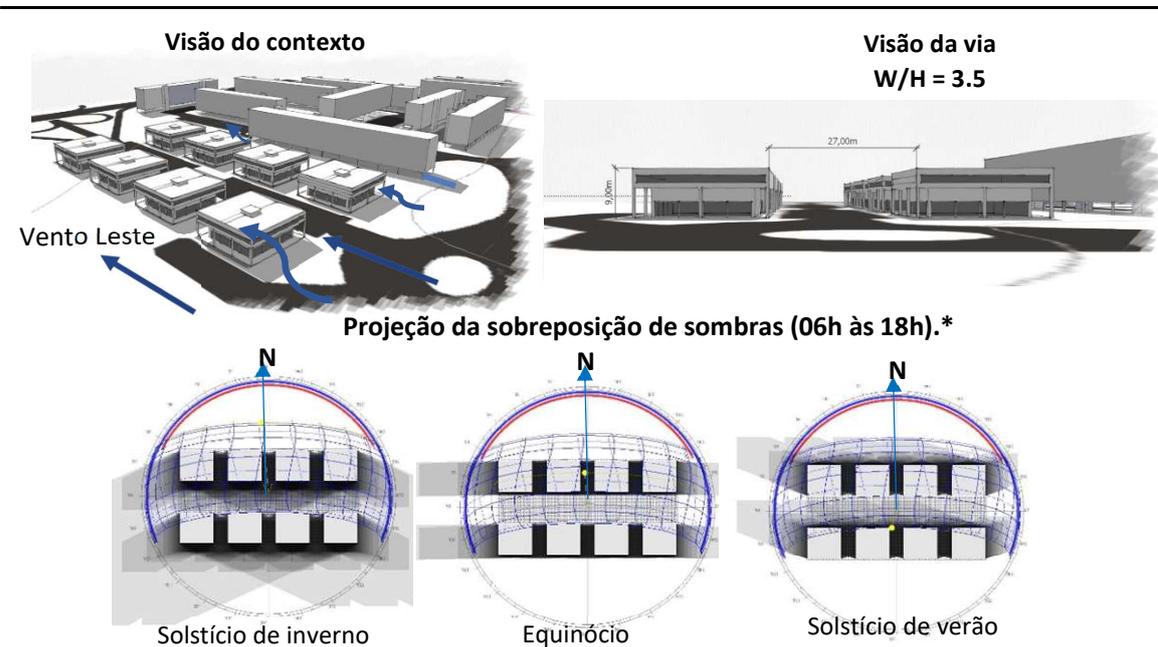
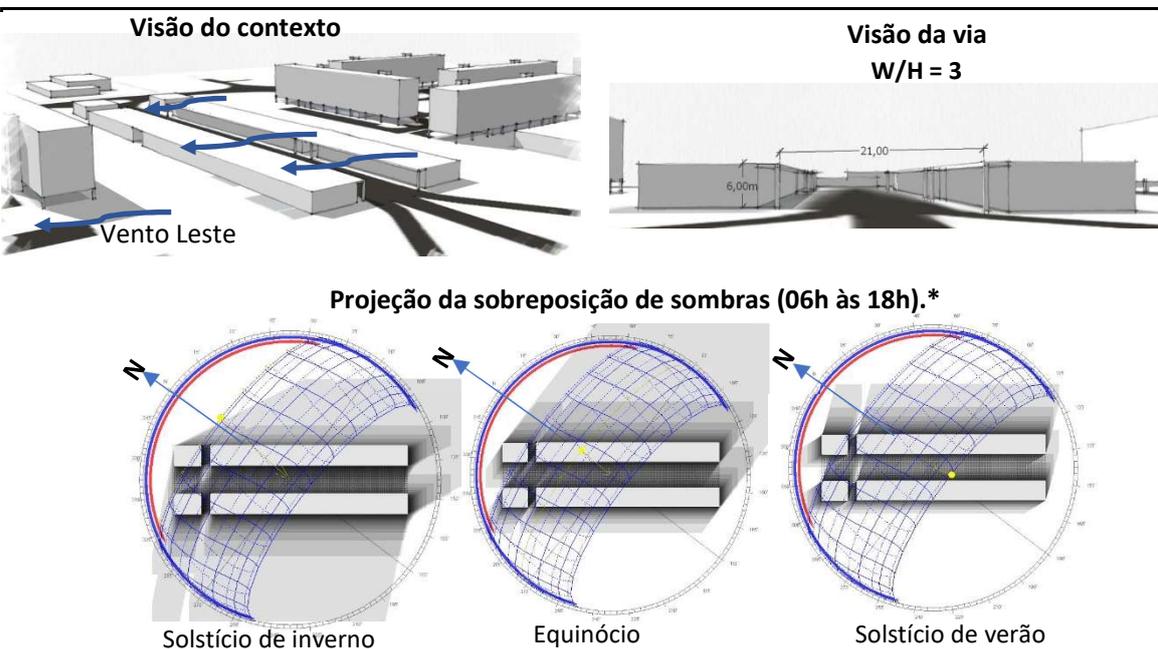


Tabela 2 – Tabela síntese com descrição e análises de ventilação e sombreamento das áreas de estudo.

CLN 201/202: área de uso misto com edifícios isolados de 9 metros de altura. A via de acesso tem direção L-O.



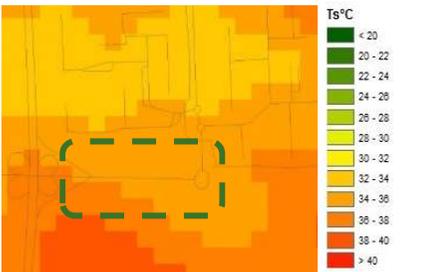
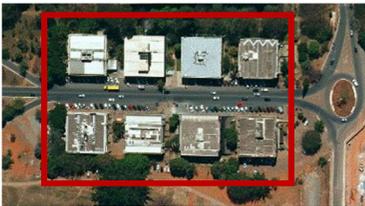
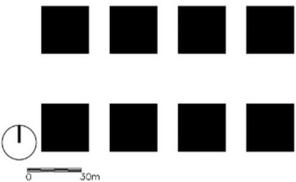
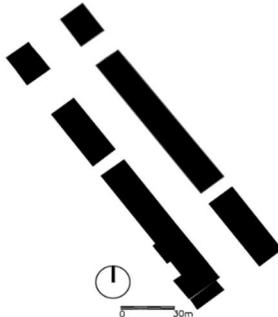
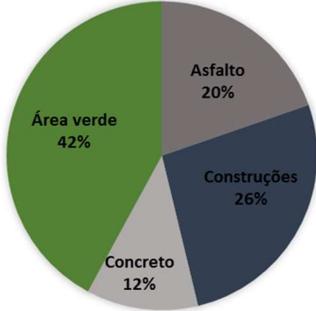
CLS 113/114: área exclusivamente comercial com edifícios de até 6 metros de altura. A via de acesso tem direção NO-SE.



* Estudo realizado com o programa Ecotect v5.5.

O Quadro 4 apresenta a caracterização das áreas selecionadas, mapa de cheios e vazios e materiais de recobrimento de superfícies.

Quadro 4 – Caracterização das áreas de estudo

Mapa de temperatura de superfície	Foto aérea (destaque recorte do estudo)	Mapa de cheios e vazios	Materiais	Descrição da área
				<p>CLN 201/202: recorte urbano de 105x168 m com edifícios de 9 metros de altura. A via de acesso tem direção L-O. Topografia: diferença de nível de 3 metros com declive sentido O-L.</p>
				<p>CLS 113/114: recorte urbano de 204x78 m com edifícios de até 6 metros de altura. A via de acesso tem direção NO-SE. Topografia: diferença de nível de 2 metros com declive sentido NO-SE.</p>

5.1.2 Levantamento dos dados para arquivo climático de Brasília

Para este estudo foram incorporados os meses de janeiro e setembro como meses representativos para investigação do período quente-úmido e quente-seco respectivamente. Outros estudos para Brasília assumiram os meses citados em suas investigações (CASTELO BRANCO, 2009 e SILVA, 2013).

Nesse sentido foi realizado um levantamento de dados climáticos para as duas estações que alimentaram a ferramenta de simulação. São eles: temperatura do ar, umidade relativa do ar, umidade específica do ar a 2500 metros de altura, velocidade do vento, direção do vento, rugosidade da superfície da medição, umidade específica a 2500 metros, radiação solar, nebulosidade, temperatura do solo e umidade do solo.

A umidade específica a 2500 metros foi obtida a partir da biblioteca digital da Universidade de Wyoming dos Estados Unidos referente à estação do Aeroporto Internacional de Brasília. Essa biblioteca reúne dados de diversos aeroportos no mundo. Os demais dados foram extraídos dos registros da estação automática do INMET de Brasília, localizada na região Sudoeste da cidade.

5.2 FASE DE CALIBRAÇÃO E CAMPANHAS DE MEDIÇÃO EM CAMPO: ESTUDOS PILOTOS

O crescente uso das ferramentas para modelagem numérica tem possibilitado uma melhor compreensão dos estudos de clima urbano. No entanto, o resultado depende em parte da precisão e qualidade dos dados de entrada evidenciando a importância do processo de calibração (VUCKOVIC et al., 2015).

Com esse propósito, dados de medições de campo da temperatura do ar e da umidade relativa foram comparados com os resultados simulados. Para tal, foram realizados estudos pilotos que solicitaram duas campanhas de medições em campo: uma para o período das chuvas, adotado o mês de janeiro como referência e outra para o período da seca, tendo como referência o mês de setembro.

O primeiro estudo piloto ocorreu dia 21 de janeiro de 2017 em uma praça com ocupação mista (residencial e comercial) na Vila Planalto, nos horários: 9 h, 12 h, 15 h e

18 h. Esses horários cobrem parcialmente uma faixa de horários padronizados pela Organização Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization - WMO*) para registro nas estações meteorológicas e são denominados horários sinóticos. Essa área foi objeto de análise de um estudo do Laboratório de Sustentabilidade Aplicada a Arquitetura e ao Urbanismo da Universidade de Brasília (Lasus). Foi utilizado um equipamento portátil, disponibilizado pelo mesmo laboratório, chamado termohigrômetro da marca INSTRUTHERM, modelo HT-270 (precisão $\pm 0,8$ °C). Visando obter dados na altura do pedestre, os registros foram realizados a uma distância de 1,50m em relação ao solo.

Na campanha seguinte, com o objetivo de obter uma série de dados maior para comparação dos dados simulados e medidos, os dados de temperatura do ar foram medidos por um registrador com sensor integrado de temperatura do ar modelo HOBO MX100 para ambiente externo do fabricante Onset com precisão de $\pm 0,5$ °C. O intervalo de medições foi de 1 hora. A Figura 43 contém a ilustração dos equipamentos utilizados.

Figura 43 – Equipamentos utilizados nas campanhas de medição: a) termohigrômetro HT-270 e b) registrador de temperatura do ar HOBO MX100



Tumini (2012) relata a importância de se planejar uma medição com estação fixa, escolher um local adequado e seguro de intempéries e furtos além de se atentar para a calibração do sensor. Nesse sentido, foi definido outro ponto de medição, que gerou um segundo estudo piloto, localizado a 400 metros de distância do centro da área de estudo 1 – CLC 201/202, na quadra SQN 402.

Foi possível instalar o registrador de temperatura do ar em um abrigo meteorológico indicado para evitar radiação solar direta. O conjunto foi fixado em um poste de iluminação desativado e o sensor estava a uma distância de 1,8 metros em relação ao solo, conforme Figura 44. Essa altura segue a recomendação da WMO, que recomenda que o sensor de temperatura deve estar exposto a uma altura de 1,25 a 2,0 metros em relação ao solo pois, um alto gradiente de temperatura pode existir em camadas mais baixas da atmosfera (WMO, 2014). Ainda segundo as recomendações da mesma organização, o ponto de medição é sobre um terreno plano, exposto à luz solar e ventos e com uma distância de edificações e árvores que possam gerar obstruções.

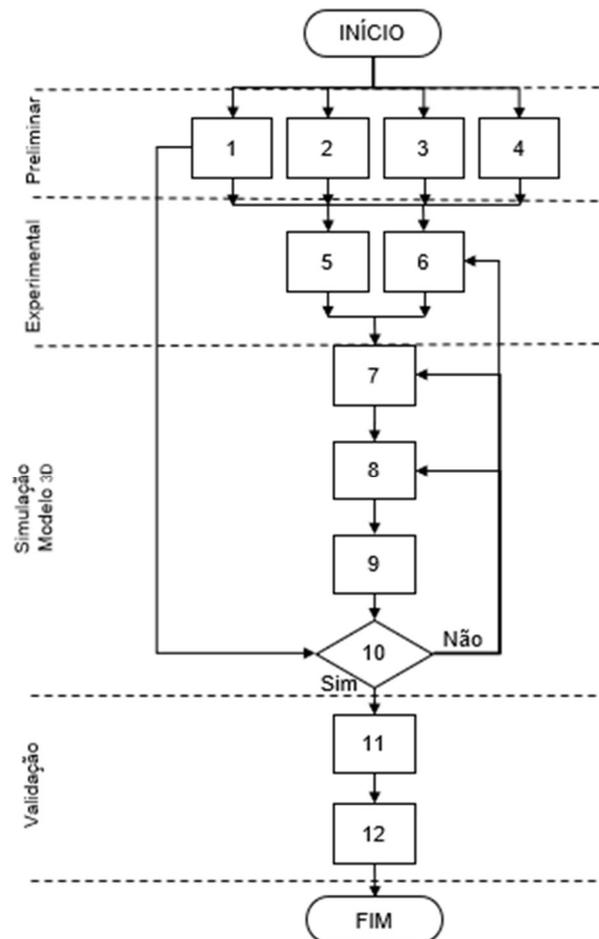
Dessa forma, a segunda campanha de medição ocorreu nos dias 03, 04 e 05 de setembro de 2017, após 104 dias consecutivos sem ocorrência de chuvas no local de acordo com o INMET. A medição da umidade relativa do ar seguiu o mesmo procedimento da campanha anterior, com registros manuais nos seguintes horários: 9h, 12 h, 15 h e 18 h.

Figura 44 – Ponto de medição fixa do estudo piloto 2 destacando o abrigo meteorológico utilizado para proteger o da



O processo de calibração seguiu o disposto no fluxograma (Figura 45) que contém os elementos e articulações necessárias divididas em quatro fases: preliminar, experimental, simulação 3D e validação.

Figura 45 – Fluxograma para processo de calibração ENVI-met 4



Fonte: Adaptado de Salata *et al.* (2016, p.341)

1. Levantamento do local
2. Identificação dos materiais e suas propriedades termofísicas
3. Criação em bancos de dados locais dos itens pertinentes como nova espécie de árvore e novo material para pavimentação
4. Identificação de pontos de monitoramento
5. Amostragem de variáveis micrometeorológicas (temperatura do ar, umidade relativa, entre outras) no local nos pontos de medição durante o período de monitoramento
6. Definição tamanho da grade de desenho (X, Y e Z)
7. Reconstrução 3D da geometria da área de estudo no ENVI-MET - Spaces
8. Configuração dos dados meteorológicos
9. Avaliação da sensibilidade da malha para determinação do tamanho mais apropriado da grade
10. Comparação entre os dados experimentais e os resultados do ENVI-MET (análise estatística como raiz do erro médio quadrático e índice de concordância)
11. Validação do modelo
12. Uso do modelo para a avaliação de parâmetros microclimáticos e conforto térmico urbano para estudo de espaços urbanos abertos

5.2.1 Calibração para o período quente-úmido – estudo piloto 1

Modelagem da área de estudo para calibração

A primeira área de estudo para calibração é a Praça Nelson Corso, situada na Vila Planalto (Figura 46). O local foi escolhido depois de uma análise de suas características principais, cobrindo diversos tipos de espaços abertos e materiais urbanos: praça com áreas vegetadas, calçadas de concreto, ruas estreitas asfaltadas, parque infantil, estacionamento aberto e edificações residenciais e comerciais com gabarito variando entre três metros a oito metros aproximadamente.

Figura 46 – Área selecionada para o estudo piloto 1.



Foi criado um modelo tridimensional correspondente ao local selecionado na área de edição *Spaces*. Para este estudo paramétrico, a proporção da grade para os três eixos (x, y e z) foi de 2 m x 2 m x 2 m, seguindo a proporção da largura das calçadas de aproximadamente 2m e das vias de 6m. O edifício mais alto do local é um galpão com altura aproximada de 8m. O tamanho do domínio do modelo é de 17.500,00 m² (125 m x 140 m). Para as áreas de borda foi reservado um espaço equivalente a 5 grades. As definições iniciais do modelo podem ser observadas na Figura 48.

Em seguida foram identificadas as áreas ocupadas por edificações, características dos materiais das superfícies e vegetação. A definição dos valores de albedo para as paredes e cobertura dos edifícios foi por aproximação das propriedades térmicas compatíveis com as observações no local. Para tanto os materiais de composição das paredes foram editados no banco de dados do programa (Figura 47 e Figura 49). Por uma limitação da versão gratuita do programa, adotou-se as mesmas propriedades térmicas das paredes e cobertura para todos os edifícios do modelo.

Figura 48 – Configuração do modelo para a Vila Planalto

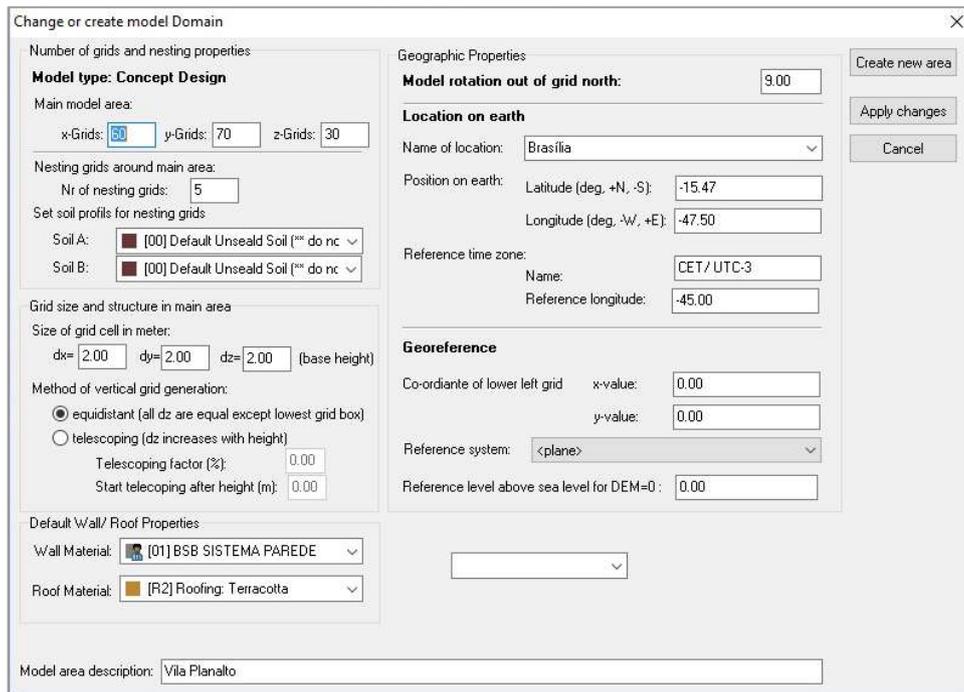


Figura 47 – Edição de sistema construtivo das paredes.

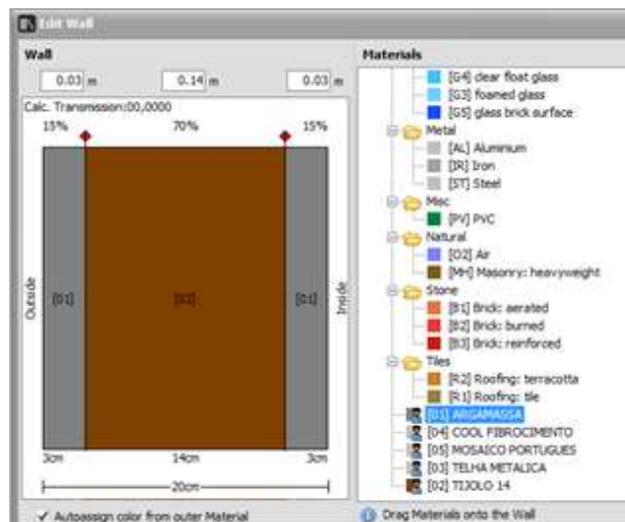
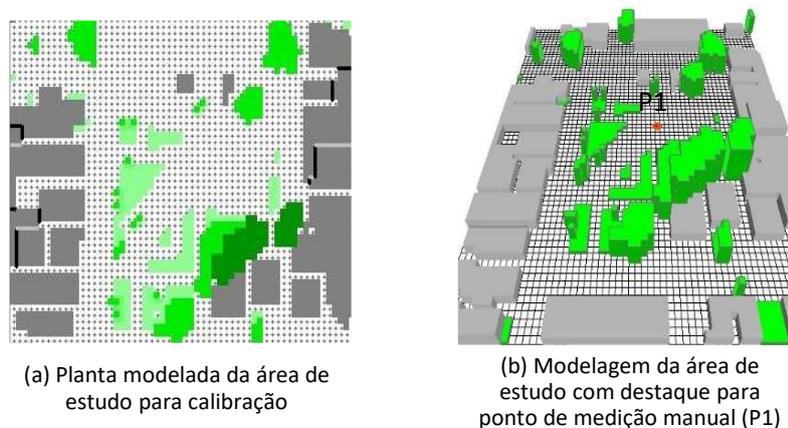


Figura 49 – Edição das propriedades térmicas dos materiais



Na mesma linha de decisão, foram selecionadas no banco de dados existente de vegetação as espécies com características mais próximas das encontradas em campo. Os modelos de vegetação utilizados foram grama (código do banco de dados = GG) e árvores de 10 e 15 metros de altura do tipo decíduas, que se caracterizam por perda de folhagem no outono e inverno (código do banco de dados = T1 e SK). A composição completa em 2D e 3D são visualizadas na Figura 50.

Figura 50 – Modelagem da área de estudo na Vila Planalto em planta (a) e 3 D (b).



Configuração dos dados climáticos de entrada do ENVI-met 4

A Tabela 3 contém a síntese dos dados de entrada utilizados para a simulação referentes ao período quente-úmido. Foi utilizada a opção *simple forcing* para temperatura do ar e humidade relativa, cujos dados são provenientes do INMET (Apêndice II). Essa opção faz uma interpolação dos dados permitindo simular a variação diária dessas variáveis a partir do fornecimento dos valores máximos e mínimos e seus respectivos horários de registro. O fator de ajuste da radiação solar foi calibrado pois, após inserção do dado médio de nebulosidade, o valor da radiação global às 12 h ficou inferior ao medido pelo INMET que foi de $1044\text{W}/\text{m}^2$. O ajuste de 1,4 foi suficiente para atingir esse valor. Para a velocidade do vento foi utilizado o valor médio para janeiro segundo a série 2001-2013 do INMET.

O dado de umidade específica no topo do modelo foi extraído do banco de dados da Universidade de Wyoming referente ao horário disponível de 12Z (equivalente às 9h para Brasília) cujos dados podem ser visualizados no Apêndice I. O programa ainda

permite a inserção de dados relativos à turbulência e LBC – *Lateral Boundary Conditions*. Na ausência desses registros optou-se por manter as condições padrões. A simulação teve uma duração de 46 horas sendo que as 20 primeiras horas são recomendadas para estabilização dos dados. O horário inicial da simulação foi 6:00h.

Tabela 3 – Principais dados de entrada para simulação (ref. dia 21/01/2017)

Dados meteorológicos	Valores
Velocidade do vento a 10m de altura (m/s)	2,42
Direção do vento (0: N/90: L/180: S/270: O)	114 (média do dia - INMET)
Rugosidade	0,01
Umidade específica no topo do modelo (2500 g/kg)	9,11
Umidade relativa (min./hora) e (máx./hora) – <i>simple forcing</i>	(16 h/44%) e (02 h/87%)
Temperatura do ar (min./hora) e (máx./hora) – <i>simple forcing</i>	(06 h/19 °C) e (15 h/27.2 °C)
Ajuste no valor da radiação solar	1,4
Nebulosidade (oitavas) baixas/médias/altas	4,00/0/0
Dados do solo (adotou-se o valor padrão do programa)	
Temperatura inicial para todas as camadas	293 K
Umidade relativa camada superficial (0-20 cm)	50 %
Umidade relativa camadas (20-50 cm)/(abaixo de 50 cm)	60 %

5.2.2 Calibração para o período quente-seco – estudo piloto 2

Modelagem da área de estudo para calibração

Um recorte da superquadra 402 Norte foi modelado cujas características principais cobrem diversos tipos de materiais urbanos: praça com áreas vegetadas, calçadas de concreto, ruas asfaltadas, estacionamento aberto e edificações residenciais com três pavimentos sobre o piloti e alguns com garagem subterrânea (Figura 51).

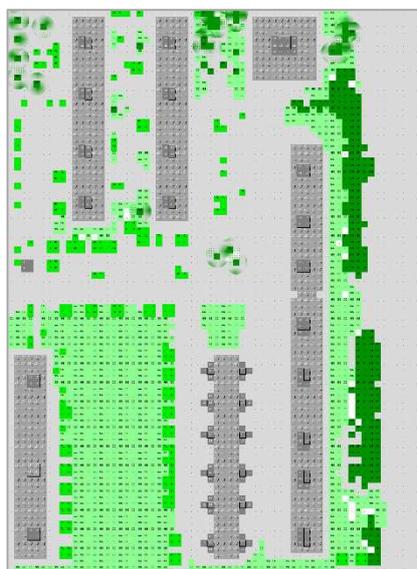
Figura 51 – Área selecionada para o estudo piloto 2



Criou-se um modelo tridimensional correspondente ao local selecionado com proporção da grade para os três eixos (x, y e z) de 2,5 m x 2,5 m x 3 m. O tamanho real da área é 35.200,00 m² (220 m x 160 m), equivalente ao modelo de 88x64x30 (X, Y, Z). Para as áreas de borda foi reservado um espaço equivalente a 5 grades.

Em seguida foram identificadas as áreas ocupadas por edificações, características dos materiais das superfícies e vegetação. A definição dos valores de albedo para as paredes e cobertura dos edifícios foi por aproximação das propriedades térmicas compatíveis com as observações no local. A composição completa em 2D e 3D são visualizadas na Figura 52.

Figura 52 – Modelagem da área de calibração SQN402.



5.2.2.1 Configuração dos dados climáticos de entrada do ENVI-met 4

A Tabela 4 contém a síntese dos dados de entrada utilizados para a simulação referentes ao período quente-seco. Os valores de temperatura do ar e umidade relativa a 2 metros de altura são provenientes do INMET (Apêndice II), assim como a direção do vento e a velocidade, para qual foi assumido o valor médio para Brasília de acordo com o mesmo instituto, pois a média diária estava elevada e poderia comprometer os resultados.

Os dados de temperatura e umidade do solo foram extraídos da pesquisa de Silva *et al* (2015) que realizaram experimentos de medições no Campus da UnB em Planaltina

em uma área com cobertura de grama. O dado de umidade específica no topo do modelo foi extraído do banco de dados da Universidade de Wyoming referente ao horário disponível de 12Z. Para os parâmetros de turbulência e LBC foram mantidas as condições padrões.

Tabela 4 - Principais dados de entrada para simulação (ref. dia 04/09/2017)

Dados meteorológicos	Valores
Velocidade do vento a 10m de altura (m/s)	2,56
Direção do vento (0: N/90: L/180: S/270: O)	90
Rugosidade	0,01
Umidade específica no topo do modelo (2500 g/kg)	5,59
Umidade relativa (min./hora) e (máx./hora) – <i>simple forcing</i>	Dados horários INMET
Temperatura do ar (min./hora) e (máx./hora) – <i>simple forcing</i>	Dados horários INMET
Ajuste no valor da radiação solar	0
Nebulosidade (oitavas) baixas/médias/altas	0/0/0
Temperatura inicial para todas as camadas	298 K
Umidade relativa camada superficial (0-20 cm) / (20-50 cm)	18 %
Umidade relativa das demais camadas abaixo de 50 cm	21 %

5.3 FASE DE SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO DE ICU

5.3.1 Construção dos cenários para simulação microclimática

Os cenários hipotéticos foram propostos com uso de materiais frios para cobertura e pavimentos, além de um cenário combinando pavimentos frios e arborização (Tabela 5). Dessa forma investigou-se as estratégias de mitigação de ICU tendo como base um cenário com as características originais das áreas (cenário 0). As modelagens no ambiente do ENVI-met 4 estão detalhadas na Figura 53 e Figura 54.

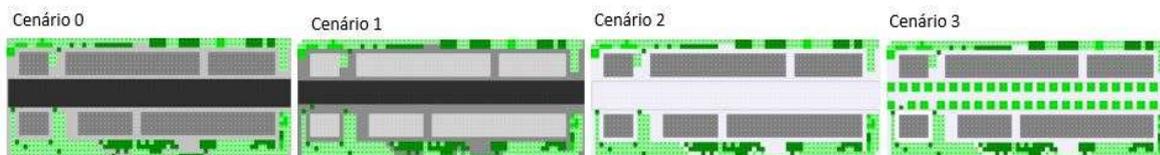
Tabela 5 – Cenários hipotéticos para simulação

Cenários	Técnicas para mitigação de ICU	Recursos	Mecanismo para resfriamento
C1	Modificação das propriedades térmicas dos materiais de cobertura: aumento da refletância e emitância térmica	Radiação solar	Aumento da reflexão da radiação solar
C2	Modificação das propriedades térmicas dos materiais de pavimentação: aumento da refletância térmica	Radiação solar	Aumento da reflexão da radiação solar
C3	Combinação de técnicas: C2 mais sombreamento dos pavimentos com arborização ao longo das vias	Radiação solar e vegetação	Redução da absorção da radiação solar Evapotranspiração

Figura 53 – Modelagens dos cenários de mitigação da área de estudo 1 (CLN201-201)



Figura 54 – Modelagens dos cenários de mitigação da área de estudo 2: CLS 113-114



5.3.1.1 Cenário 0: caso controle

O cenário 0 foi construído com as características originais observadas nas áreas de estudo. As vias são asfaltadas e as calçadas constituídas de concreto e variações de materiais como pedra portuguesa (branca e preta) e intertravados de concreto. Como o modelo é uma representação simplificada, os materiais de paredes e coberturas são iguais para todas as edificações, compreendendo valores médios. Na Tabela 6 estão sumarizados os dados de entrada no ENVI-met para configuração do cenário controle.

Tabela 6 – Configuração no ENVI-met dos dados correspondentes à caracterização original das áreas de estudo

Dados gerais do cenário 0	Valores
Edificações	
Albedo das paredes	0,40
Albedo das coberturas	0,30
Calçadas	
Albedo/Emissividade	0,30/0,90
Vias	
Albedo/Emissividade	0,20/0,90
Vegetação	LAD (perfil vertical)
Grama (GG) – altura = 50 cm	-
Árvore densa (T1) – altura = 10 m	0,0/ 0,0/2,18/2,18/2,18/2,18/2,18/2,18/2,18/1,72
Palmeira (PW) - altura = 15 m	0,0 (x13) ... 0,5/0,6

5.3.1.2 Cenário 1: coberturas frias

O cenário 1 foi elaborado um material frio nas coberturas das edificações. Como foi visto no Quadro 4, as áreas relativas às construções nos recortes estudados que

potencialmente podem empregar essa tecnologia de resfriamento equivalem a 25% no CLN e 26% no CLS. Dentro do ambiente de modelagem e edição de banco de dados do ENVI-met 4, as características da cobertura foram alteradas para refletância igual a 0,70 e emissividade (ondas longas) igual a 0,90. Segundo Gartland (2010, p.76) valores de refletância acima de 65% são adotados pelo programa *Energy Star* dos Estados Unidos como condição mínima para telhados frios de baixa inclinação. O valor de refletância de 0,70 adotado neste trabalho foi baseado em produtos encontrados no mercado brasileiro.

5.3.1.3 *Cenário 2: pavimentos frios*

O cenário 2 foi elaborado com implementação de materiais frios nos pavimentos. Como foi visto no Quadro 4, as áreas relativas às calçadas e vias nos recortes estudados equivalem a 46% no CLN e 32% no CLS. Os valores de refletância foram alterados no ENVI-met 4 mantendo valores mais altos nas vias para circulação e automóveis e estacionamentos para fins de implicações no conforto luminoso. Segundo Gartland (2010, p.113), pavimentos frios de concreto podem ter refletância variando entre 40 a 80%.

- calçadas de concreto: de 0,30 para 0,50
- vias asfaltadas: de 0,20 para 0,60

5.3.1.4 *Cenário 3: pavimentos frios e arborização*

O cenário 3 foi elaborado para estudar a combinação de técnicas do pavimento frio utilizado no cenário 2 com o sombreamento das superfícies por meio de vegetação. Foi acrescentado no banco de dados de plantas uma espécie utilizada para arborização urbana no Brasil, a espécie oiti (*Licania tomentosa*). Essa espécie também foi utilizada no estudo de Paula *et al.* (2016), no qual foi realizado um levantamento do LAD de espécies arbóreas da Universidade Federal do Mato Grosso para fins de simulação microclimática com ENVI-met 3 e o oiti foi selecionado pelo seu índice de área foliar (Tabela 7). Comparando com o banco de dados de vegetação do ENVI-met 4, essa densidade pode ser considerada média. Foi admitida uma distribuição uniforme do LAD, iniciando a distribuição da densidade a partir de 3 metros de altura, conforme

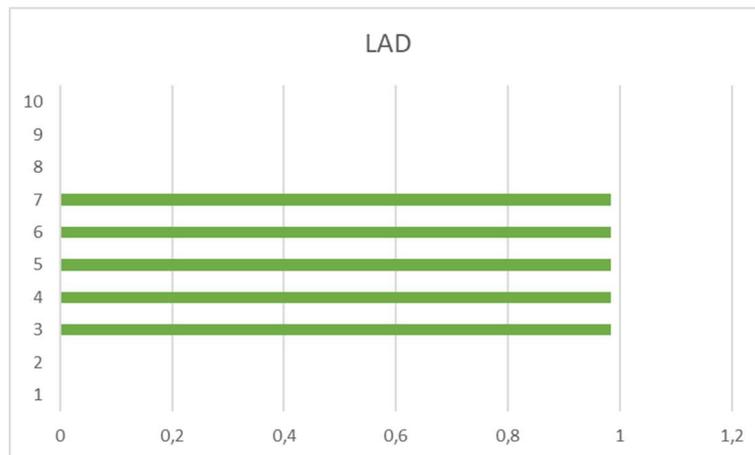
orientação de Shinzato (2010, p.140) para não obstruir o fluxo de vento para o pedestre, o que pode ser observado na Figura 55.

Tabela 7 – Características da espécie arbórea selecionada para o cenário 3.

Espécie	Nome científico	Altura (m)	IAF (m ² /m ²)	LAD (m ² /m ³)
Oiti	<i>Licania tomentosa</i>	7,5	4,734	0,984

Fonte: Adaptado de Paula *et al.* (2016, p.4)

Figura 55 – Perfil LAD proposto para a espécie arbórea *Licania tomentosa*.



6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados e discussões do trabalho de acordo com os métodos aplicados. Para melhor explanação, o capítulo foi dividido em duas partes. A primeira parte aborda a validação da calibração do programa onde os dados de temperatura do ar e umidade relativa medidos em campo foram comparados com os simulados. Uma vez ajustados os dados climáticos iniciais, partiu-se para as simulações dos casos base (controle) e dos cenários hipotéticos.

A segunda parte deste capítulo reúne os resultados das simulações e uma análise comparativa entre as estratégias de mitigação de ICU para os períodos quente-úmido e quente-seco discutindo os impactos de cada alteração dos cenários nos parâmetros de temperatura do ar, temperatura de superfície e temperatura média radiante.

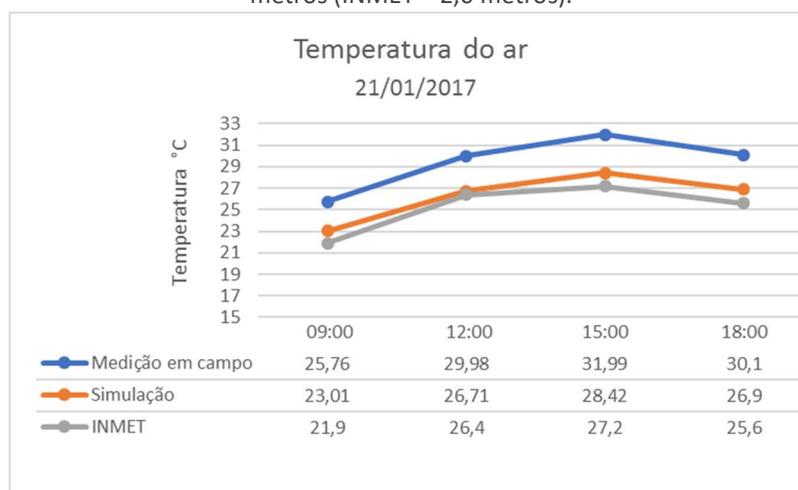
6.1 VALIDAÇÃO DA CALIBRAÇÃO ENTRE DADOS MEDIDOS E SIMULADOS

Nesta etapa são apresentados os resultados das calibrações realizadas para os dois períodos: quente-úmido, assumindo para este estudo o dia 21 de janeiro de 2017 e quente-seco, estudando-se o dia 04 de setembro de 2017.

6.1.1 Validação da calibração do ENVI-met 4.2: Período quente-úmido

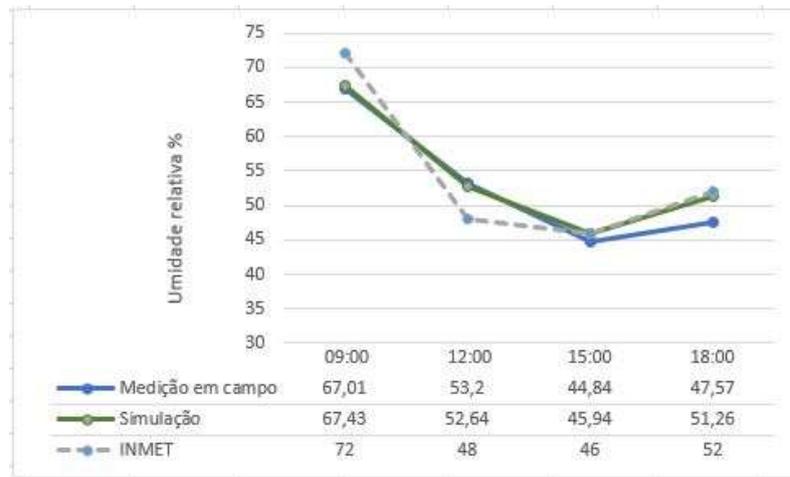
Dados de medições em campo e simulações foram extraídos para uma análise comparativa dos resultados, considerando que as medições das variáveis microclimáticas ocorreram nos horários: 9 h, 12 h, 15 h e 18 h. Na Figura 56 observou-se que a diferença de temperatura do ar entre a medição em campo e a simulação às 15 horas e 18 horas são maiores, chegando a um ΔT ($T_{\text{medição}} - T_{\text{simulação}}$) de 3,57 °C às 15 h e 3,20 °C às 18 h. O horário de maior aproximação foi o de 9 horas. A curva referente aos dados fornecido pela estação fixa do INMET também foi sobreposto no gráfico onde nota-se que o mesmo padrão para as três curvas de dados de temperatura do ar.

Figura 56 – Comparação entre valores medidos e simulados para temperatura do ar na altura de 1,50 metros (INMET = 2,0 metros).



Na Figura 57 observou-se que a diferença da umidade relativa do ar entre a medição em campo e a simulação foi maior às 18 horas, chegando a um ΔU ($U_{\text{medição}} - U_{\text{simulação}}$) de 3,69%. Nos demais horários nota-se que a curva referente aos dados medidos e simulados tem similaridades. Os dados fornecidos pela estação Sudoeste do INMET também foram sobrepostos no gráfico onde nota-se que o mesmo padrão para as três curvas de dados de umidade relativa do ar.

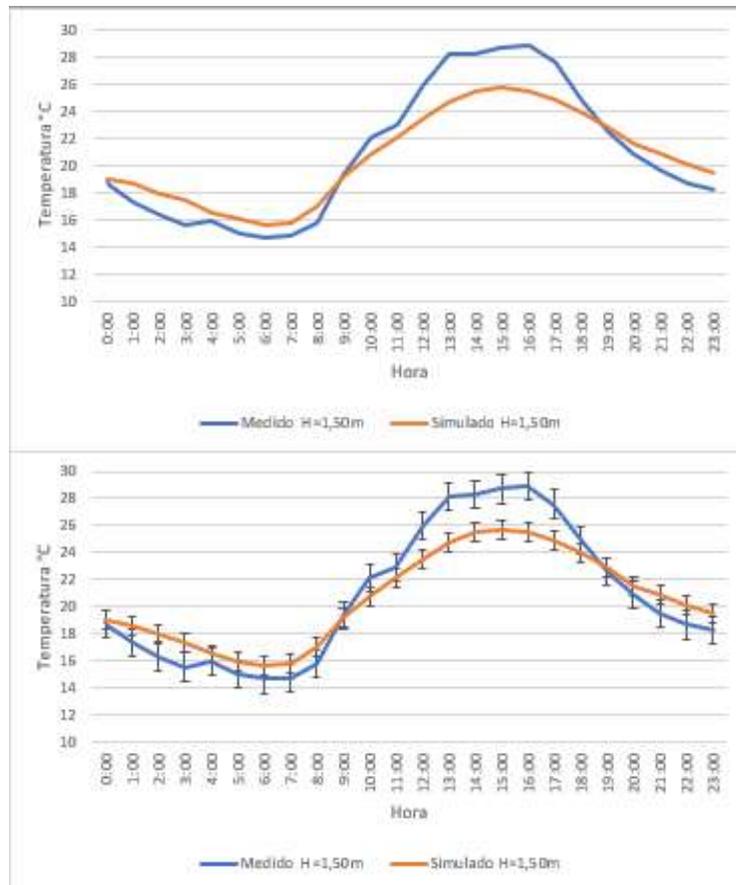
Figura 57 - Comparação entre valores medidos e simulados para umidade relativa do ar para o período quente-úmido



6.1.2 Validação da calibração do ENVI-met 4.2: Período quente-seco

Dados de medições em campo e simulações foram extraídos para uma análise comparativa. Os resultados para temperatura do ar e umidade relativa mostram que as simulações computacionais seguiram o padrão de curvas segundo os dados climáticos iniciais, se aproximando também do modelo de curva dos dados do INMET (Figura 58).

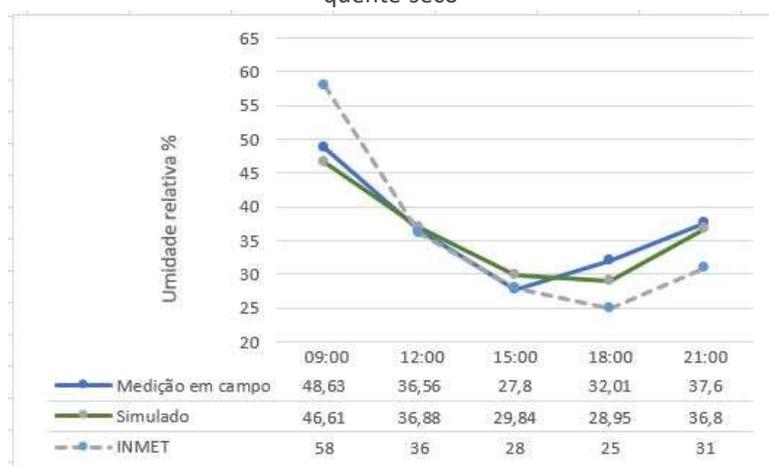
Figura 58 – Gráfico com resultados iniciais da calibração para o período quente-seco



É notório o gradiente de temperatura do ar entre a estação automática do Sudoeste e a área de medição no período da tarde quando há maior disponibilidade de radiação solar, contribuindo para ocorrência de temperaturas mais elevadas na superquadra em questão, onde registou-se 4,58 °C a mais que na estação automática às 13 h. A maior diferença entre a medição em campo e a simulação da temperatura do ar foi às 13 horas, registrando um ΔT ($T_{\text{medição}} - T_{\text{simulação}}$) de 3,44 °C. Diferenças entre os dados simulados e medidos foram encontradas em outros estudos com o ENVI-met 4 *Preview* como o de Gusson (2014, p.82), que encontrou em sua pesquisa para São Paulo a diferença máxima de 3,2 °C às 12 h. Quando comparado ao mês de janeiro, observa-se registros de temperatura do ar mais amenos, ressaltando que essas diferenças podem ocorrer de acordo com as condições meteorológicas do dia da medição. Não cabe assim uma comparação com dia típico de arquivos climáticos que reúnem dados meteorológicos de séries históricas.

Para a umidade relativa do ar nota-se que a curva referente entre as duas séries tem similaridades, apresentando o valor mais baixo de 27,8% às 15 h na medição em campo versus o valor mais baixo de 28,95% às 18 h da simulação. A maior diferença entre a medição em campo e a simulação foi às 18 horas, registrando um ΔU ($U_{\text{medição}} - U_{\text{simulação}}$) de 3,06%, como mostra a Figura 59.

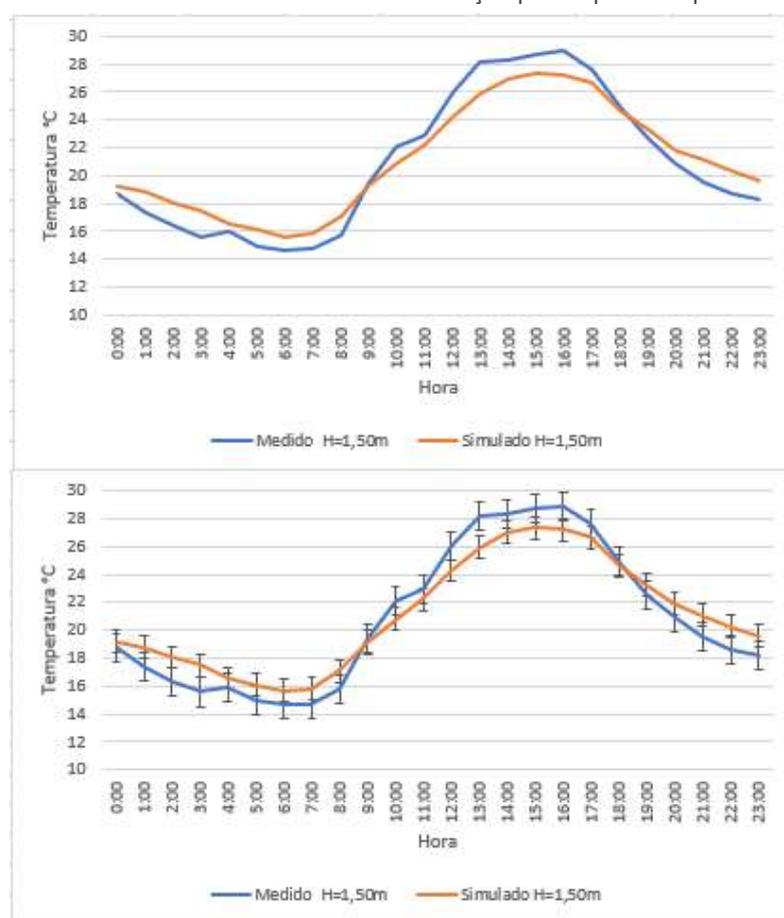
Figura 59 – Gráfico de umidade relativa do ar da calibração do período quente-seco



Ajustes da calibração

Foi determinada a variável temperatura do ar para o ajuste dos dados climáticos iniciais. No intuito de reduzir a diferença entre dados medidos e simulados ajustou-se o valor da temperatura do ar nos horários da tarde onde ocorreram as maiores amplitudes (11 h até 17 h), onde observou-se que o ENVI-met 4.2 subestimou os valores de temperatura do ar simulados. Foram simuladas três tentativas com acréscimo de 1 °C até 3 °C, sendo que a terceira gerou uma curva com melhor aproximação, conforme Figura 60. A maior diferença entre dados simulados e medidos foi de 2,27 °C a menos nos dados simulados às 13 h e de 1,89 °C a mais nos dados simulados às 03 h.

Figura 60 – Gráfico com resultados finais da calibração para o período quente-seco



Para validação com uma análise estatística foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson⁴ (ρ) que varia de -1 a 1 e reflete a intensidade de uma relação

⁴ Este coeficiente estatístico também mede a direção de uma correlação: $\rho = 1$ significa correlação positiva perfeita; $\rho = -1$ significa correlação negativa perfeita e $\rho = 0$ significa que as duas variáveis não dependem linearmente uma da outra (MARTINS, 2014, p. 374).

linear entre duas variáveis. Nessa análise o valor encontrado foi de 0,97, um resultado satisfatório entre as duas séries. No prosseguimento do trabalho, essa curva de dados foi utilizada para a configuração climática para as análises de melhoria do ambiente térmico dos cenários hipotéticos para esse período do ano pois apresentou melhor desempenho.

6.2 ANÁLISE DOS CENÁRIOS HIPOTÉTICOS

6.2.1 Área de estudo 1: CLN 202-203 – Asa Norte

Temperatura do ar

A Tabela 8 apresenta os resultados da diferença de temperatura do ar entre o cenário 0 (controle) e os cenários hipotéticos de mitigação de ICU, baseados nas médias dos domínios das simulações para os horários indicados. O cenário 1, que representa uma estratégia de mitigação implementada no nível das coberturas das áreas de estudo, gerou um impacto sem expressividade na redução da temperatura do ar no nível do pedestre nas condições de forma e estrutura urbana avaliadas.

Os resultados dos cenários 2 e 3 mostram uma redução na temperatura do ar mais expressiva que a do cenário 1, uma vez que as mudanças de albedo das superfícies horizontais e a arborização da via ocorreram nas superfícies mais próximas do nível dos pedestres. A maior redução da temperatura média do ar foi da ordem de 0,38 °C às 12 h referente à estratégia do cenário 2, o que não representa um valor significativo.

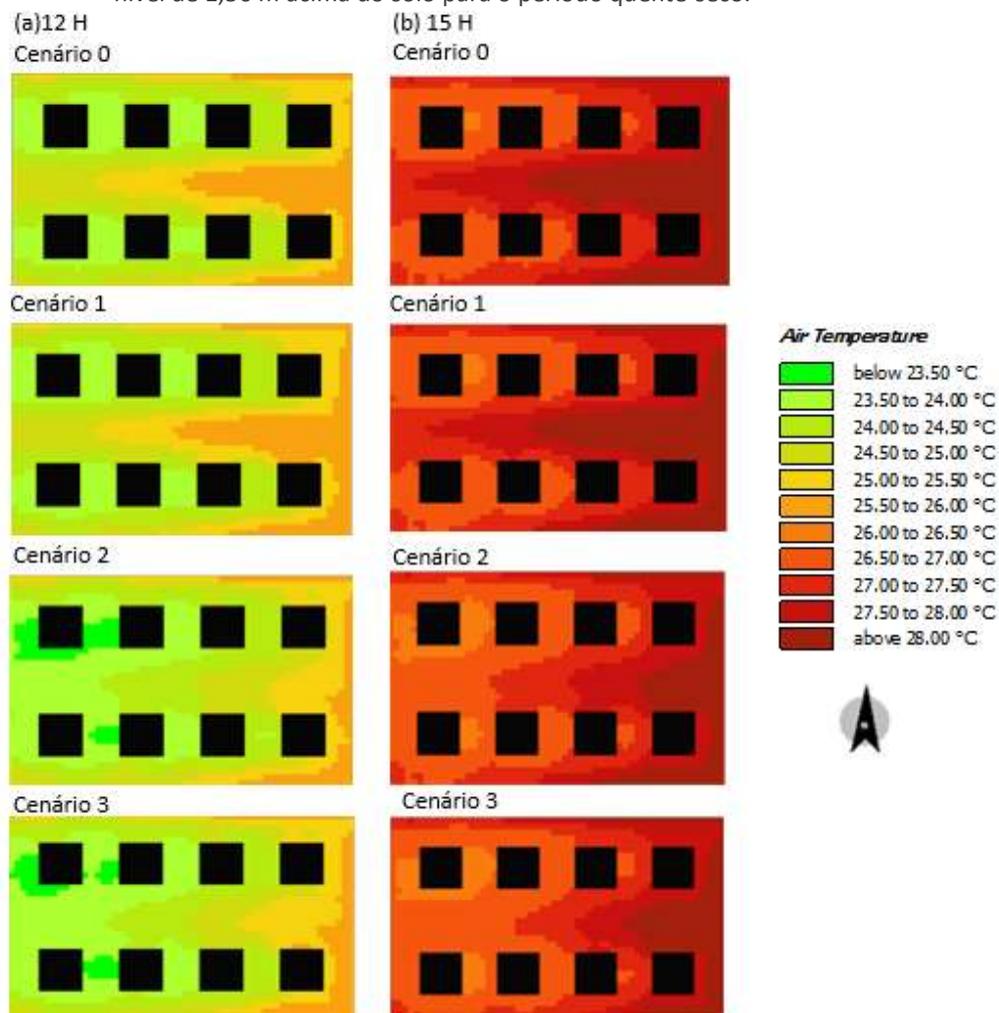
Tabela 8 – Área de estudo 1: resumo das diferenças das médias de temperatura do ar simuladas entre os cenários de mitigação e o cenário 0 (controle). Altura de referência = 1,5m.

Área de estudo 1: CLN 201-202				
W/H = 3,5				
		12h	15h	20h
Período quente-úmido	Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	- 0,03	- 0,03	- 0,08
	Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	- 0,35	- 0,26	- 0,08
	Cenário 3: ΔT_{ar} (°C)	- 0,28	- 0,18	- 0,06
Período quente-seco	Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	- 0,04	- 0,01	- 0,09
	Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	- 0,38	- 0,35	- 0,04
	Cenário 3: ΔT_{ar} (°C)	- 0,33	- 0,32	- 0,03

A Figura 61 destaca o período quente-seco por meio de mapas de distribuição da temperatura do ar simuladas em todos os cenários no nível de 1,50 metros acima do

solo. Pode-se observar no período diurno a baixa redução da temperatura do ar nos cenários 2 e 3 enquanto que no cenário 1 não houve alteração. De forma geral as zonas sombreadas apresentaram menores temperaturas e as áreas mais expostas à radiação solar apresentaram as maiores temperaturas como a via para veículos. Também as áreas orientadas para Leste em torno dos edifícios demonstram-se potencialmente mais quentes nos períodos analisados.

Figura 61 – Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o período quente-seco.



Em uma aproximação para o local de intervenção do cenário 2 (Figura 62), observa-se pelos mapas comparativos de subtração que o efeito local da redução da temperatura do ar foi maior, principalmente no período quente-seco, quando houve uma redução pontual de $-1.12\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12 h. No período noturno a redução pontual máxima foi de $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação seca e de $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação úmida. No cenário 3, observa-se

pela Figura 63 um arrefecimento maior também no período quente-seco. Houve uma redução pontual de $-1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12 h na temperatura do ar. No período noturno a redução pontual máxima foi de $0,13\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação seca e de $0,16\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação úmida.

Um leve aumento de temperatura pode ser observado ao redor dos edifícios em situações de baixo fator de visão do céu por obstrução de vegetação e pelo baixo albedo das superfícies que não foram alteradas. Martins *et al.* (2015) encontraram situação semelhante em um estudo utilizando materiais frios para criação de ilhas de frescor em Toulouse-França, atentando-se para a forma urbana que pode reter a radiação dificultando trocas térmicas com a atmosfera.

Figura 62 - Cenário 3 do CLN 201-202: mapa comparativo com distribuição horizontal em planta (altura = 1,5m) e vertical em corte dos valores das diferenças da temperatura do ar entre os cenários 3 e 0 para os períodos quente-seco e quente-úmido.

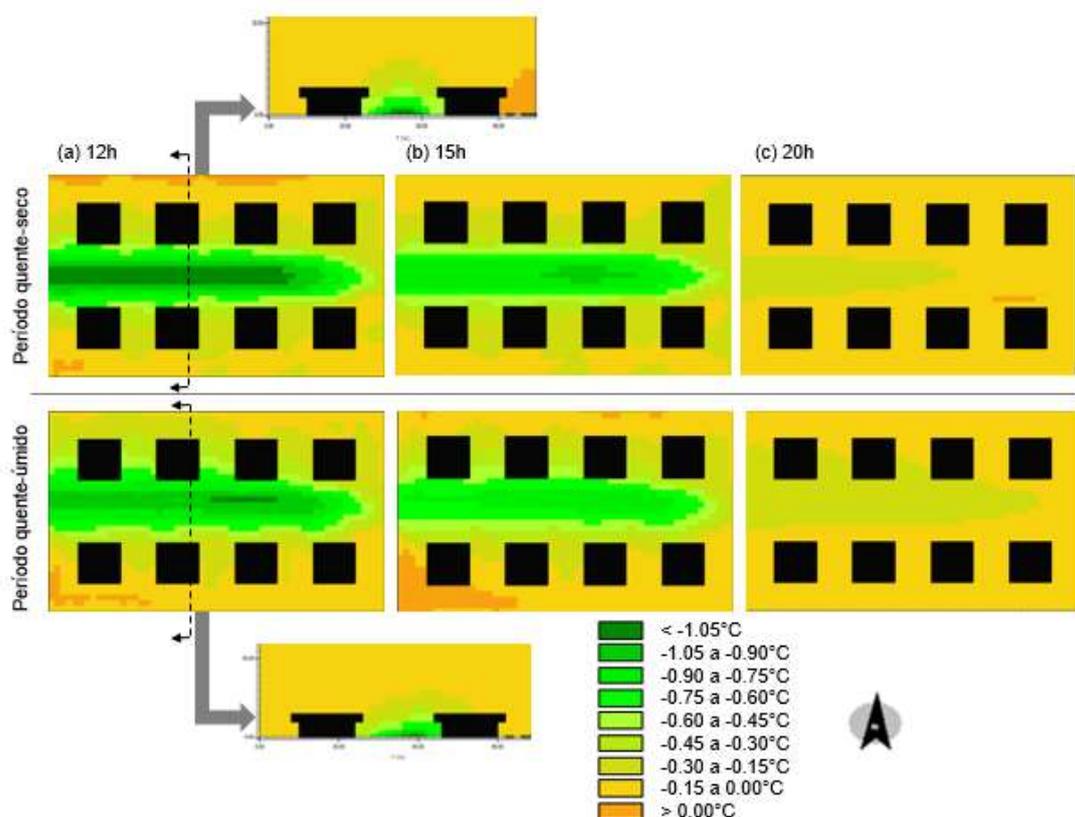
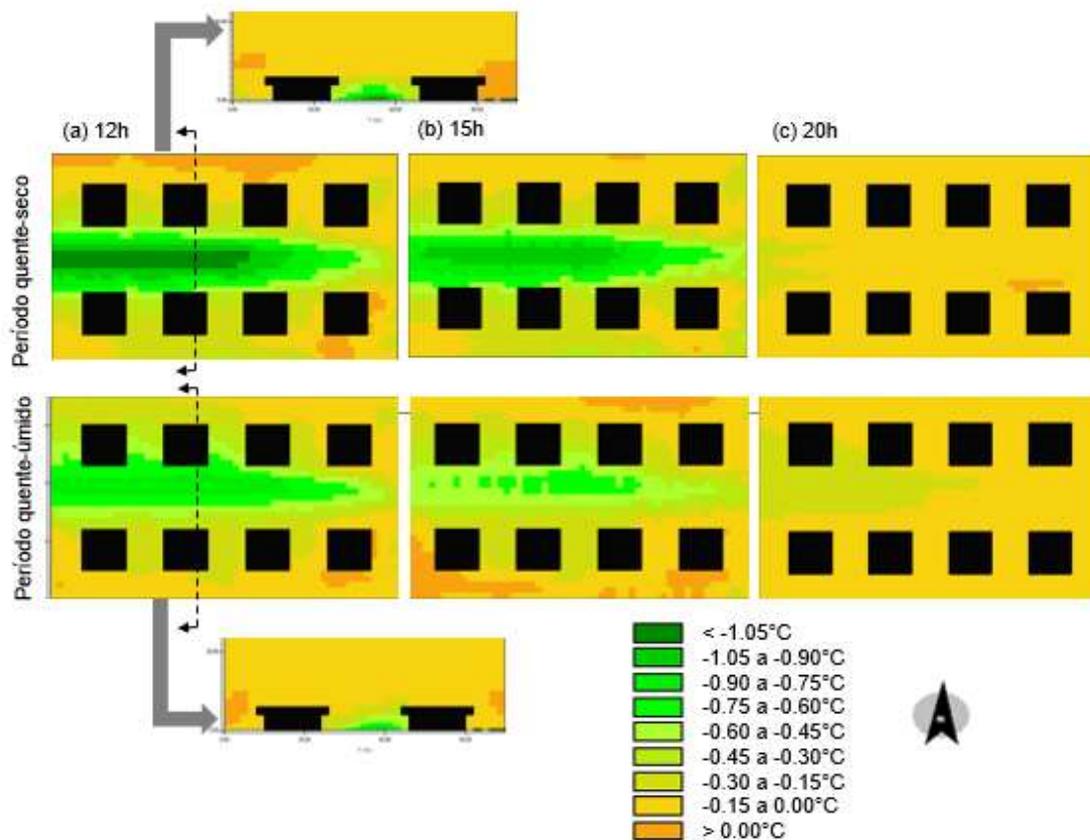


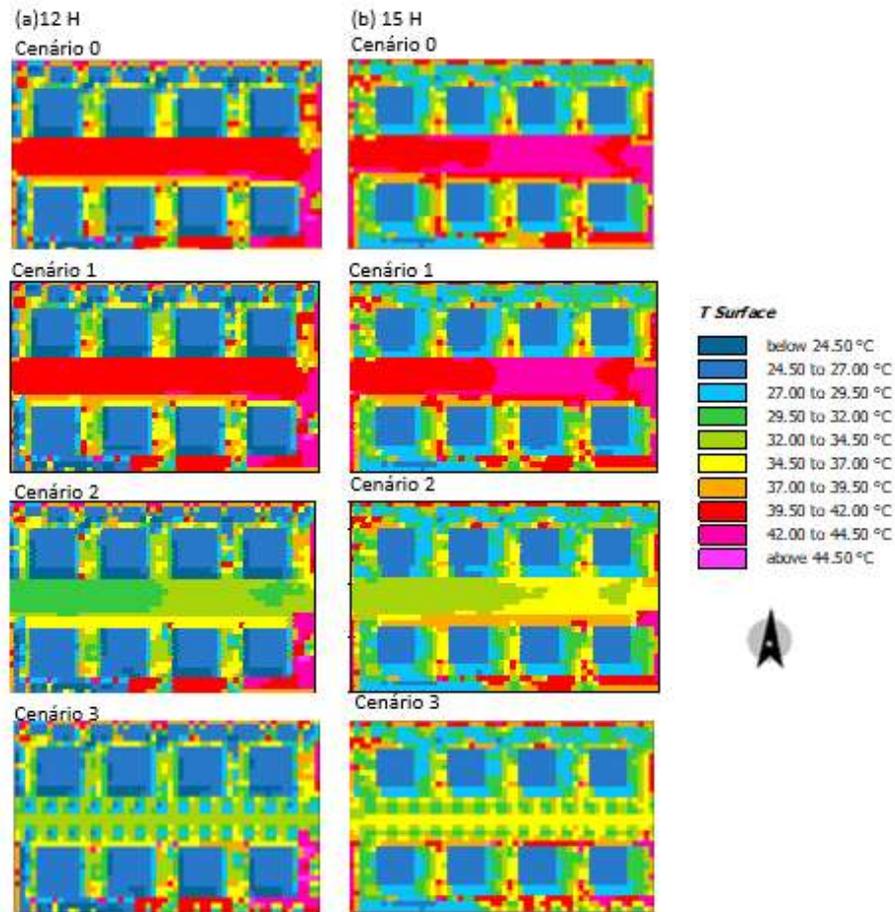
Figura 63 – Cenário 2 do CLN 201-202: mapa comparativo com distribuição horizontal em planta (altura = 1,5m) e vertical em corte dos valores das diferenças da temperatura do ar entre os cenários 2 e 0 para os períodos quente-seco e quente-úmido.



6.2.1.1 Temperatura de superfície

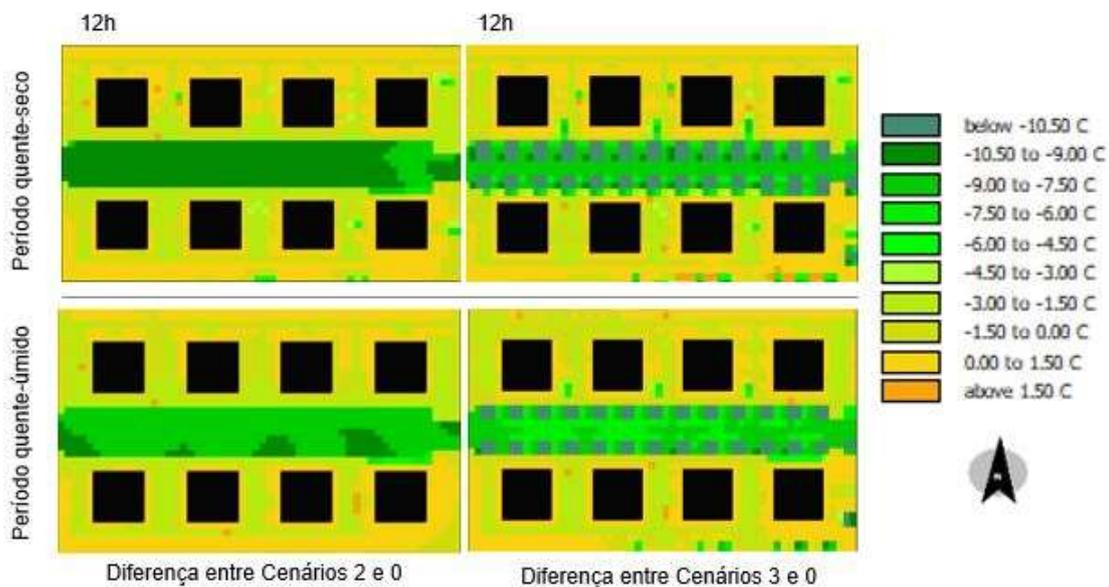
Os resultados de redução da temperatura de superfície foram superiores quando comparados à redução da temperatura do ar, demonstrando ser o parâmetro analisado de maior impacto. Essas reduções eram esperadas uma vez que se alterou as características térmicas dos pavimentos com a substituição dos materiais convencionais por materiais frios. Na CLN 201-202 essa alteração corresponde a 46% da superfície horizontal do domínio simulado conforme Quadro 4, somando-se concreto + asfalto + pedra portuguesa. Outro destaque é que a área possui relação $W/H = 3$ e se configura como um espaço de recolhimento onde, segundo Romero (2011, p.93), há interação do fluxo de ar entre os edifícios e a absorção do calor acontece próximo ao solo. As maiores temperaturas foram encontradas sobre ruas asfaltadas e as menores temperaturas foram encontradas em áreas sombreadas por edificações e por vegetação (Figura 64).

Figura 64 - Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados para o período quente-seco.



As amplitudes de temperatura de superfície dentro do domínio estudado referem-se à essas diferenças e apresentou redução de até $-14,69\text{ }^{\circ}\text{C}$ no cenário 3 no período da seca, destacando o efeito pontual do sombreamento das árvores. Essa proteção adicional para as superfícies também reduz a transferência de calor sensível para o ar. Observa-se no mapa comparativo do potencial de redução da temperatura de superfície que ambos períodos apresentaram reduções variando entre $10,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $7,50\text{ }^{\circ}\text{C}$ na área asfaltada exposta ao longo da orientação Leste-Oeste que recebe radiação solar durante todo o dia (Figura 65).

Figura 65 – Mapa comparativo com distribuição do potencial de redução da temperatura de superfície simulada na área de estudo 1 entre os cenários 0 – 2 e 0 – 3.



6.2.1.2 Temperatura média radiante

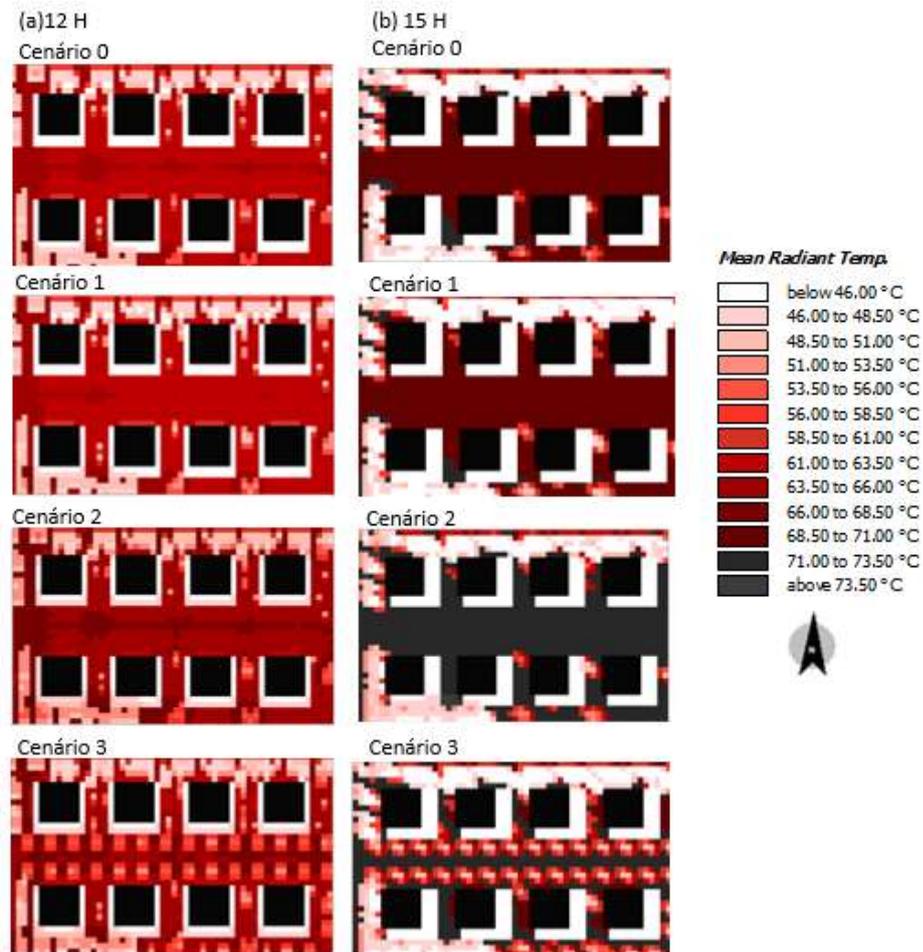
A temperatura média radiante, junto com a temperatura do ar, exerce forte influência nos mecanismos termorreguladores do corpo humano e conseqüentemente no conforto ambiental como já foi discutido no Capítulo 2. Pesquisadores relataram implicações acerca do aumento da Tmr devido ao aumento das reflexões da radiação solar (ERELL, 2017; TSOKA *et al.*, 2017). Na Figura 66 pode-se observar o aumento da Tmr nos cenários simulados devido ao uso dos pavimentos frios. Em contrapartida, reduções locais da Tmr estão presentes no cenário 3 com a presença da arborização. Esses impactos incidem nas áreas para os pedestres.

Foi encontrado no cenário 2 um aumento médio da temperatura média radiante da ordem de 2,51 °C na estação úmida e de 2,55 °C na seca. Em uma análise pontual, o aumento da Tmr foi de até 3,30 °C em áreas expostas com pavimento frio se estendendo ao redor nas edificações, cujo albedo das fachadas é menor.

No cenário 3, o aumento médio da Tmr às 12 h foi da ordem de 1,97 °C na estação úmida e de 0,65 °C na seca. Um grande contraste de Tmr foi observado no período da seca, o que gerou uma média mais baixa. Em uma análise pontual, o aumento da Tmr foi de até 3,81 °C em áreas com exposição solar e a redução da Tmr foi de até 10,73 °C em área sombreada na estação seca, proporcionada pela arborização adicionada nas

faixas de estacionamento em ambos os lados da via. A arborização atuou como um filtro para a radiação solar impedindo que a radiação solar atinja diretamente o pavimento e seja refletida.

Figura 66 – Mapas de distribuição da temperatura média radiante para o período quente-seco. Altura de referência = 1,5m.



6.2.2 Área de estudo 2: CLS 113-114 – Asa Sul

1.1.1.1 Temperatura do ar

A Tabela 9 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as diferenças de temperatura do ar encontradas na área de estudo 2 em comparação com o cenário controle. O cenário 1 novamente gerou um impacto sem expressividade na redução da temperatura do ar no nível do pedestre, mesmo a altura das edificações sendo menor no CLS (referência de 6 metros no CLS e 9 metros no CLN). Os resultados dos cenários 2 e 3 mostram uma redução na temperatura do ar mais expressiva. A maior redução da

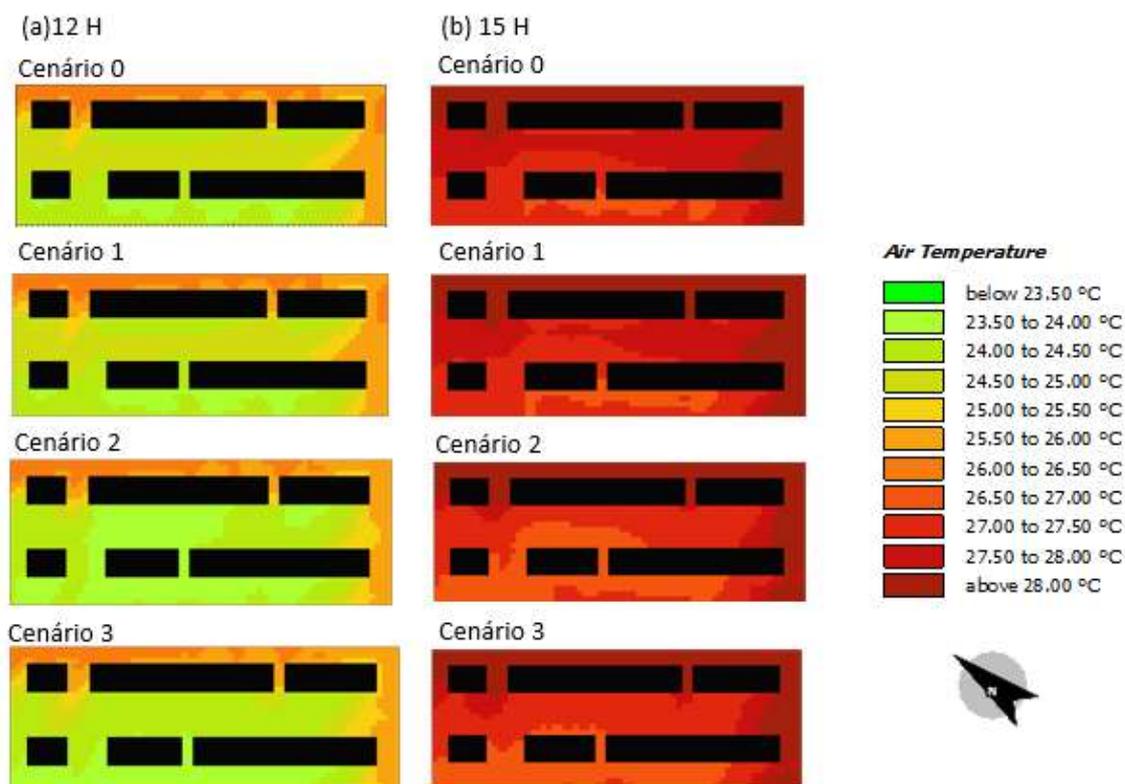
média da temperatura do ar foi da ordem de 0,30 °C às 12 h referente à estratégia do cenário 2, como ocorreu no CLN 201-202.

Tabela 9 – Área de estudo 2: resumo das diferenças das médias de temperatura do ar simuladas entre os cenários de mitigação e o cenário 0 (controle). Altura de referência = 1,5m.

Área de estudo 2: CLS 113-114				
W/H = 3				
		12h	15h	20h
Período quente-úmido	Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	- 0,03	- 0,01	- 0,05
	Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	- 0,30	- 0,26	- 0,16
	Cenário 3: ΔT_{ar} (°C)	- 0,14	- 0,20	- 0,17
Período quente-seco	Cenário 1: ΔT_{ar} (°C)	- 0,01	- 0,01	- 0,06
	Cenário 2: ΔT_{ar} (°C)	- 0,26	- 0,25	- 0,18
	Cenário 3: ΔT_{ar} (°C)	- 0,19	- 0,23	- 0,19

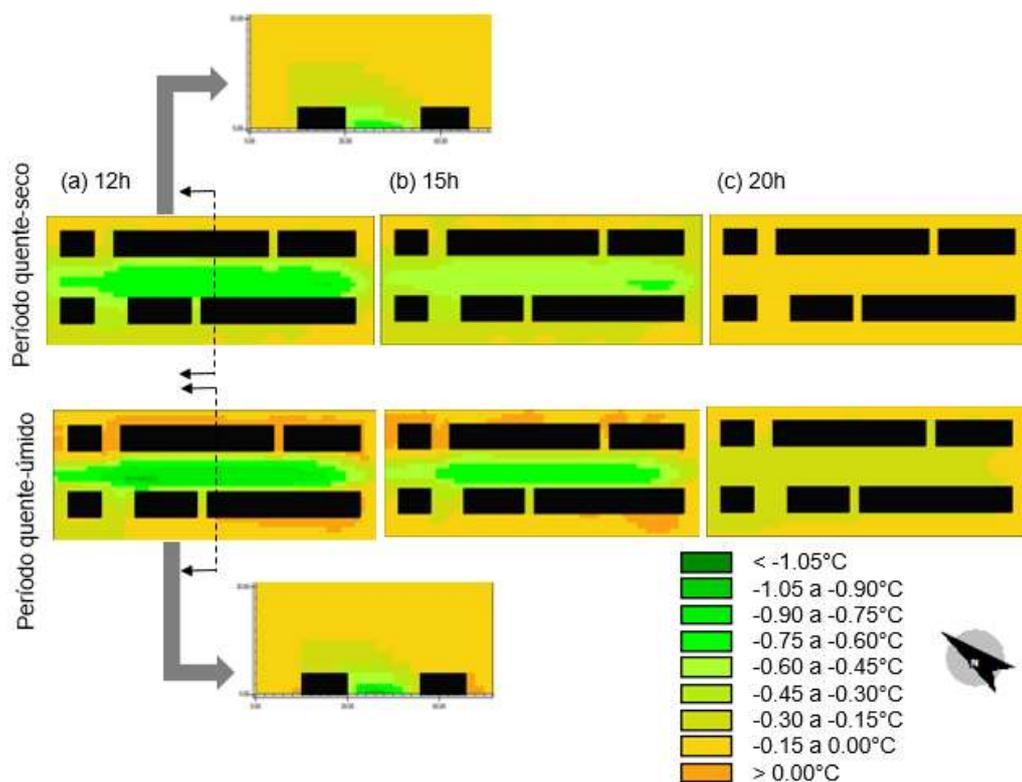
A Figura 67 destaca o período quente-seco por meio de mapas de distribuição da temperatura do ar simuladas em todos os cenários no nível de 1,50 metros acima do solo. Pode-se observar no período diurno a baixa redução da temperatura do ar nos cenários 2 e 3 enquanto que no cenário 1 não houve alteração.

Figura 67 - Mapas de distribuição da temperatura do ar referente aos cenários simulados no nível de 1,50 m acima do solo para o período quente-seco.



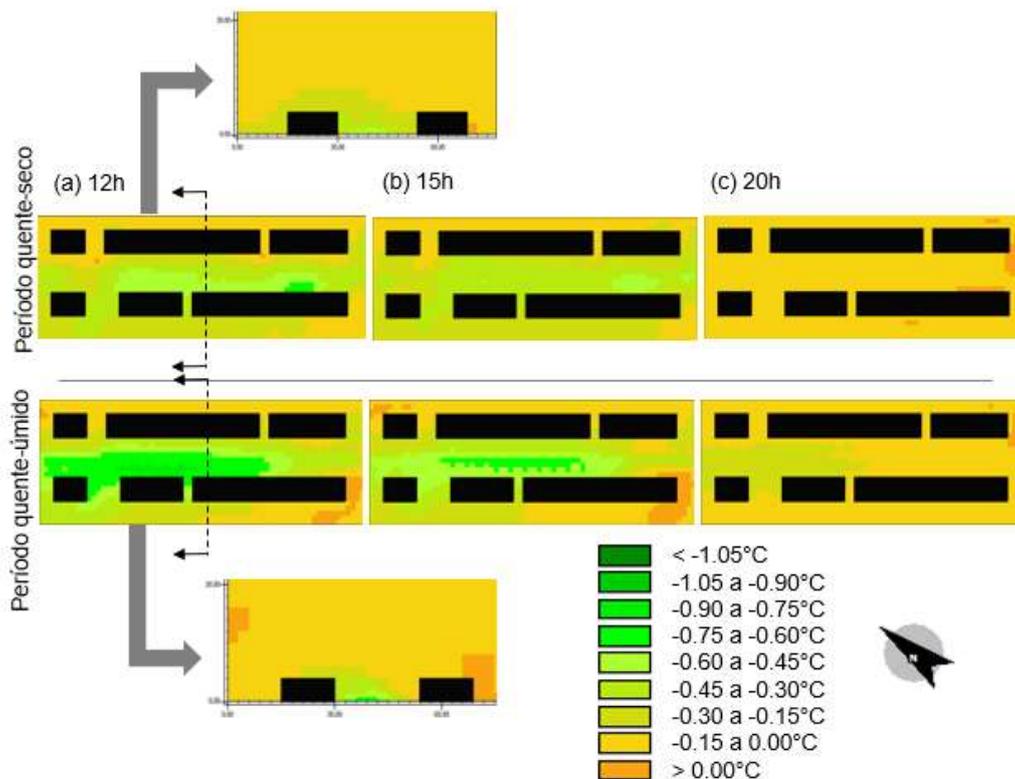
As distribuições das reduções de temperatura do ar podem ser observadas nos mapas comparativos da Figura 68 e Figura 69, evidenciando o efeito local das ações mitigadoras dos cenários 2 e 3. No cenário 2, destaca-se uma redução pontual de $-0,91\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12 h na estação chuvosa e de $-0,70\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12 h na estação seca. No período noturno o efeito das ações mitigadoras proporcionou uma leve redução da temperatura do ar que uma vez que sem radiação solar direta tem-se uma distribuição da temperatura mais homogênea.

Figura 68 - Cenário 2 do CLS 113-114: mapa comparativo com distribuição horizontal em planta (altura = 1,5m) e vertical em corte dos valores das diferenças da temperatura do ar entre os cenários 2 e 0 para os períodos quente-seco e quente-úmido.



Já no cenário 3 houve uma redução pontual máxima de $-0,80\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12h na estação chuvosa e de $-0,54\text{ }^{\circ}\text{C}$ às 12 h na estação seca. No período noturno a redução pontual máxima foi de $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação seca e de $0,17\text{ }^{\circ}\text{C}$ na estação úmida. As reduções foram menores quando comparadas às do cenário 2 sob o ponto de vista apenas da temperatura do ar.

Figura 69 - Cenário 3 do CLS 113-114: distribuição horizontal em planta (altura = 1,5m) e vertical em corte dos valores das diferenças da temperatura do ar entre os cenários 3 e 0 para os períodos quente-seco e quente-úmido.



1.1.1.2 Temperatura de superfície

O CLS 113-114, possui orientação SE-NO e relação W/H=3.5, caracterizando também como um espaço de recolhimento. Os resultados de redução da temperatura de superfície foram superiores quando comparados à redução da temperatura do ar, demonstrando ser novamente o parâmetro analisado de maior impacto, assim como na análise do CLN 201-202. No CLC 113-114 a alteração dos pavimentos corresponde a 32% da superfície horizontal do domínio simulado conforme Quadro 4, somando-se concreto + asfalto. A Figura 71 apresenta os resultados obtidos.

Observa-se em ambos períodos uma redução da temperatura de superfície variando entre 10,50 °C até 7,50 °C (Figura 70) nas áreas com pavimento frio expostas ao sol no cenário 2, sendo o efeito mais extenso no período seco. A amplitude mínima de temperatura de superfície dentro do domínio estudado chegou a -16,45 °C no cenário 3 no período da seca, em áreas cujo pavimento frio estava sob a copa de uma árvore.

Figura 71 - Mapas de distribuição da temperatura de superfície referente aos cenários simulados para o período quente-seco.

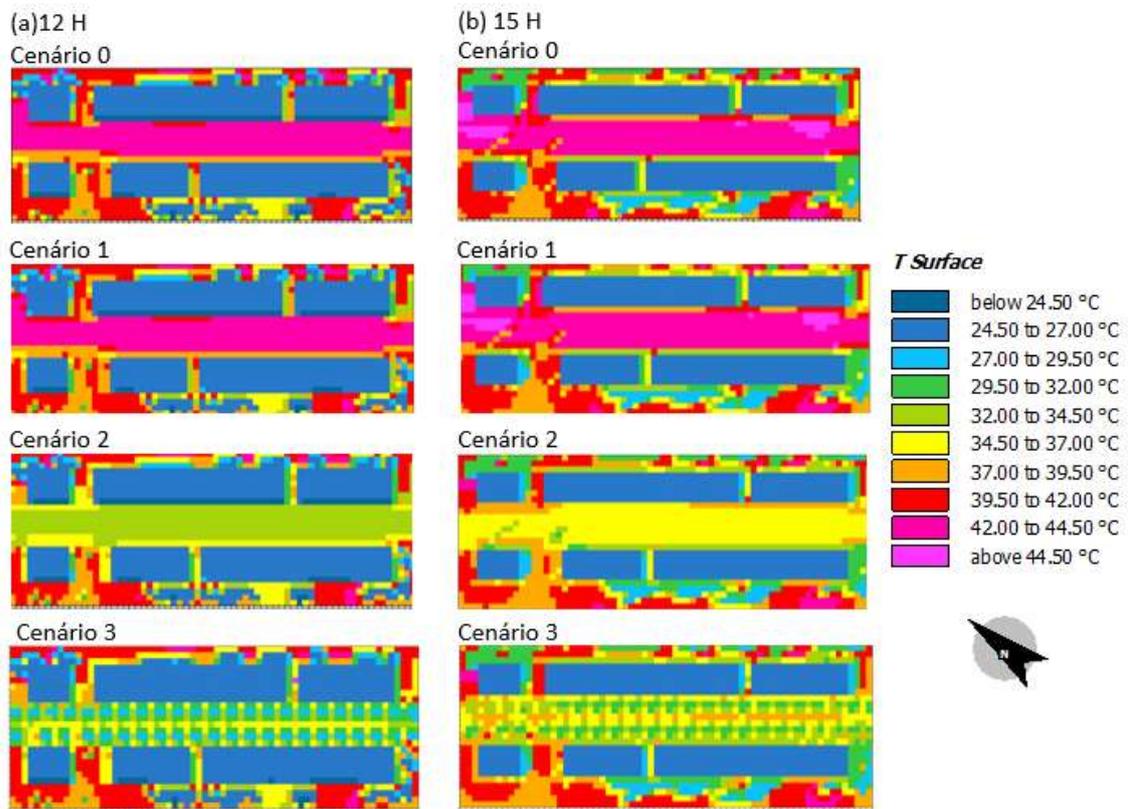
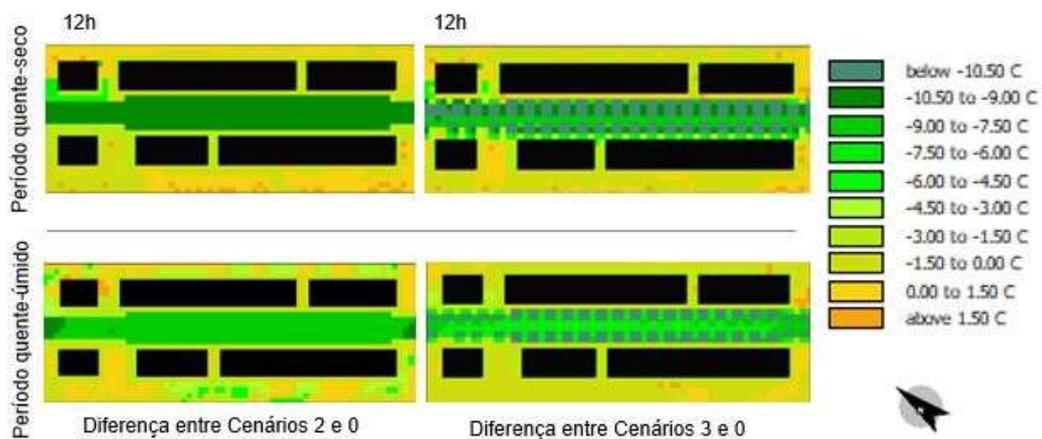


Figura 70 – Mapas comparativos com distribuição do potencial de redução da temperatura de superfície simulada na área de estudo 2.



1.1.1.3 Temperatura média radiante

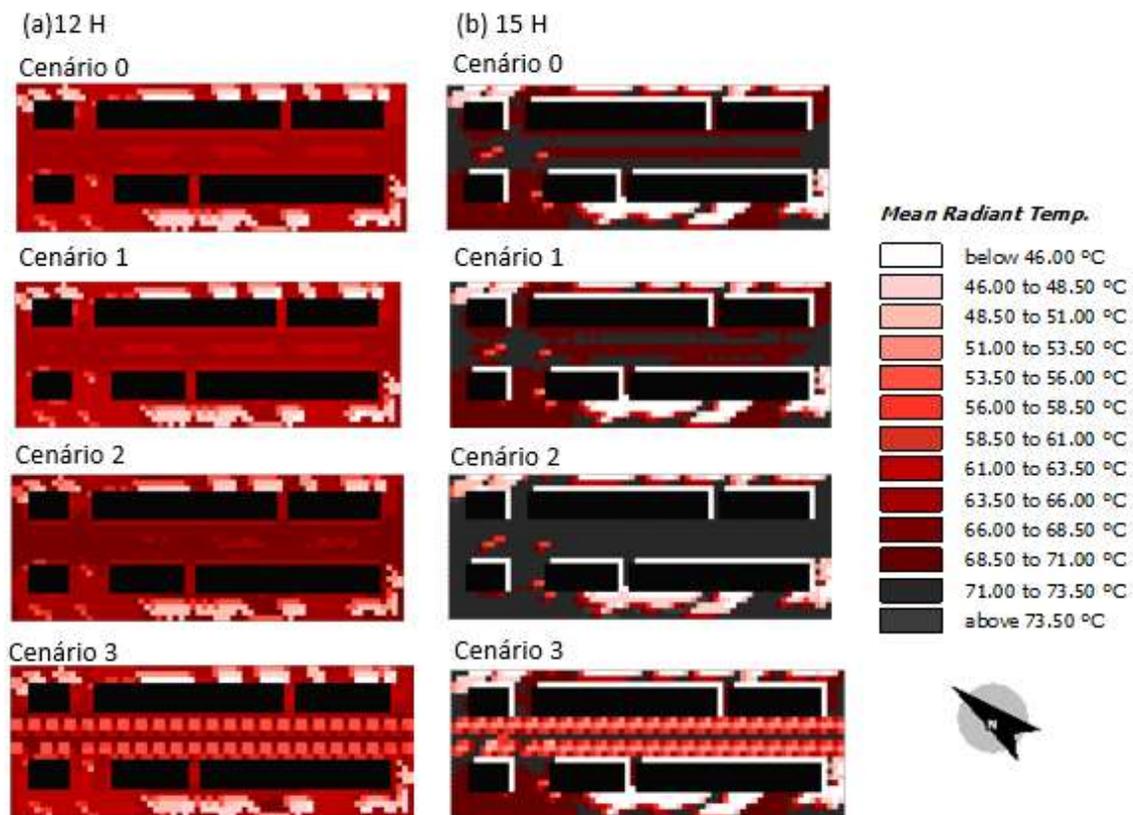
A análise anterior da temperatura média radiante se aplica também na área de estudo 2. Figura 72 apresenta os mapas de distribuição da Tmr simulada em todos os

cenários notando-se alterações insignificativas no cenário 1 e alterações importantes nos demais cenários levando a aumentos e reduções que atingem as áreas de circulação dos pedestres e não apenas as vias para veículos.

O cenário 2 teve um aumento médio da temperatura média radiante da ordem de 1,66 °C na estação úmida e de 2,55 °C na seca. Em uma análise pontual, o aumento da Tmr foi de até 3,10 °C em áreas expostas com pavimento frio.

No cenário 3, o aumento médio da Tmr às 12 h foi da ordem de 1,11 °C na estação úmida e de 0,24 °C na seca. Um grande contraste de Tmr foi observado no período da seca, o que gerou uma média mais baixa. Em uma análise pontual, o aumento da Tmr foi de até 3,20 °C em áreas de pavimento frio com exposição solar e a redução da Tmr foi de até 6,72 °C em área sombreada na estação seca, proporcionada pela arborização.

Figura 72 - Mapas de distribuição da temperatura média radiante para o período quente-seco. Altura de referência = 1.5m.



6.2.3 Discussões

Com a implementação de material frio nas coberturas, proposta do cenário 1, não foi observada alteração na temperatura de superfície perto do solo e na temperatura média radiante no nível do pedestre. Pesquisas apontam benefícios dessa estratégia na redução do ganho térmico das edificações e, por conseguinte, menor consumo de energia para condicionamento de ar ativo, o que reduz a geração de calor antropogênico contribuindo para a redução da temperatura do ar externo (EPA, 2008; Gartland, 2010). Taleghani *et al.* (2016), alerta que diversas pesquisas com coberturas frias abordaram seus efeitos na mitigação de ICU na mesoescala, porém poucos estudos trabalharam com foco na escala microclimática. Este estudo se limitou ao gabarito das edificações em condições originais, que variam de dois a três pavimentos e às análises do programa ENVI-met que não consideram o ganho térmico proveniente do tipo de ocupação das edificações e seus sistemas de iluminação, condicionamento ativo e demais equipamentos.

Nos cenários 2 e 3, os pavimentos frios apresentaram uma discreta redução da temperatura do ar enquanto estratégia de mitigação de ICU para o nível do pedestre. Reduções mais expressivas foram encontradas na análise da temperatura de superfície. Estudos tem indicado uma significativa redução da temperatura de superfície substituindo-se pavimentos convencionais por pavimentos frios, implicando na moderação de ICU uma vez que contribui para a redução da emissão de ondas longas e consequentemente a transferência de calor sensível (SYNNEFA e SANTAMOURIS, 2016). Em uma pesquisa com materiais frios em Thessaloniki, Grécia, Tsoka *et al* (2017) reportaram uma redução de até 10°C em áreas completamente expostas ao sol durante uma tarde de verão e em áreas sombreadas por edificações a variação da temperatura de superfície foi menor, atingindo até – 2 °C.

Como os materiais frios proporcionam maiores reflexões da radiação solar, observou-se um aumento da temperatura média radiante, contrabalanceando seus efeitos positivos pois afeta o nível de conforto térmico devido ao aumento da carga radiante (ERELL, 2017). Na mesma linha de pensamento, Tsoka *et al* (2017) discute ainda que esse efeito pode ser positivo sobre os índices de conforto térmico no inverno

quando as temperaturas são mais baixas, mas, no verão, o efeito é inverso. Essa preocupação é bastante relevante para o contexto de Brasília onde predomina a estação quente se diferenciando por períodos chuvosos ou secos. Outro efeito apontado na literatura é o ofuscamento durante o período diurno como consequência do aumento do albedo, embora possa contribuir para a iluminação natural no interior dos edifícios (LI, 2012). A estratégia combinada de pavimento frio e arborização do cenário 3 demonstrou um comportamento melhor em relação ao aumento da T_{mr} , ao ponto que as reduções da temperatura do ar foram um pouco menores que a do cenário 2.

A arborização atuou como um filtro para a radiação solar sombreando os pavimentos impedindo que a radiação solar atinja diretamente o pavimento e seja refletida. Essa proteção adicional para as superfícies também reduz a transferência de calor sensível para o ar. Outro mecanismo de resfriamento passivo associado à vegetação acontece pela evapotranspiração que pode ser estudado de forma ampliada variando aspectos da densidade de área foliar, fator de visão do céu e velocidade do ar. Outros benefícios advindos do acréscimo da vegetação podem ser relacionados com a sensação térmica, drenagem, identidade e o ganho estético.

7 CONCLUSÕES

Neste trabalho explorou-se as oportunidades para favorecer o ambiente térmico para o pedestre em áreas comerciais de Brasília. Foram objeto de estudo o entorno das áreas edificadas integradas ao espaço público incluindo ruas e calçadas, onde a vida social acontece, na cidade ao nível dos olhos, também chamado de *plinth*s.

Após uma análise baseada na identificação de áreas urbanizadas que apresentaram uma variação significativa da temperatura de superfície utilizando imagem de satélite do Landsat 8 (banda termal), escolheu-se duas áreas com presença de comércio com diferentes morfologias para estudos de microclimas: comércio local sul 113-114 e norte 201-202 no Plano Piloto. Esses locais representam tipos de comércio local planejados para as superquadras da Asa Sul inicialmente e posteriormente modificado na Asa Norte.

O método se apoiou em simulações microclimáticas para análise do cenário controle e dos hipotéticos. Em um primeiro momento foi necessário realizar medições em campo em uma das áreas selecionadas para calibração no programa ENVI-met 4, ferramenta de simulação microclimática adotada para os procedimentos metodológicos propostos para fins de simulação de cenários hipotéticos de mitigação de ICU.

A validação do programa para o período quente-úmido, tendo como referência o mês de janeiro, ocorreu tomando-se quatro registros manuais em campo para uma análise comparativa entre dados medidos e dados simulados. Observou-se que os resultados do programa seguiram o padrão de curvas do dado de entrada.

Para o período quente-seco, tendo como referência o mês de setembro, os registros de temperatura do ar foram automáticos por meio de um *data logger* e os registros de umidade relativa foram manuais. Observou-se que os resultados seguiram o padrão de curvas do dado de entrada e um ajuste de calibração para temperatura do ar foi conduzido com o intuito de reduzir as diferenças entre dados medidos e simulados no período da tarde. Após ajustes algumas análises estatísticas foram realizadas e constatou-se uma correlação positiva entre os resultados, prosseguindo com as simulações dos cenários hipotéticos de mitigação de ICU e análises no nível do pedestre.

Observou-se nas duas áreas que a intervenção proposta para aumento do albedo (de 0,35 para 0,7) no nível das coberturas (cenário 1) apresentou uma discreta redução da temperatura do ar com médias da ordem de 0,01 a 0,09 °C no nível do pedestre. Já no cenário 2, com aumento do albedo de 0,20 para 0,60 nas ruas e de 0,30 para 0,50 nas calçadas, observou-se maior impacto na temperatura do ar, chegando a uma redução média às 12 h de 0,38 °C na área de estudo 1 e 0,30 °C na área de estudo 2 que possuem configuração de um cânion urbano. No entanto, as reduções na temperatura do ar são maiores quando analisadas localmente onde os materiais foram aplicados, excluindo as áreas do entorno das edificações que compõem o domínio simulado. As reduções pontuais às 12h chegaram a 1,13 °C na área de estudo 1 e 0,91 °C na área de estudo 2.

Ao passo que os materiais frios responderam de forma discreta na redução da temperatura do ar, uma redução mais expressiva em todas as áreas de estudo foi notada na temperatura de superfície, chegando à uma redução máxima de 10°C às 12h nas áreas expostas ao sol. Esse foi o parâmetro analisado que apresentou maior impacto. Em contrapartida, o aumento da reflexão solar no nível do solo influenciou os valores da temperatura média radiante não só nas vias para veículos, mas também no entorno das edificações e locais destinados aos pedestres. Esse parâmetro é importante uma vez que aumenta as trocas radiantes entre o pedestre e o meio que são fundamentais nos estudos de conforto térmico, juntamente com a temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Os resultados sobre a utilização de pavimentos frios confirmam, no que diz respeito a redução da temperatura de superfície, o que já foi levantado por pesquisas sobre o assunto em outros contextos climáticos. O sombreamento com a arborização proposta proporcionou uma redução pontual ainda maior. Sua implementação, sob o ponto de vista da redução da temperatura do ar e da T_{mr} , deve ser adotada considerando o critério de densidade de área foliar.

A partir do que foi exposto, reforça-se que as características dos materiais de acabamento comumente empregados em superfícies no entorno das edificações devem ser pensadas de forma a beneficiar a ambiência térmica para o pedestre. Os parâmetros

temperatura de superfície e T_{mr} são indicados para esse tipo de análise, além dos índices de conforto térmico. Também as ações que promovem o uso de vegetação no contexto estudado são indicadas pois reduzem o ganho de calor e assim as trocas térmicas entre o corpo humano e o ambiente. Nesse sentido o cenário 3, que adota uma estratégia combinada de pavimento frio e arborização com média densidade de área foliar, entrega condições de T_{mr} melhores que o cenário 2, que possui apenas pavimento frio. Mesmo com reduções de temperatura do ar um pouco mais baixas que o cenário 2, o que pode ser otimizado com o aumento da densidade de área foliar da arborização adicional, o potencial de mitigação de ICU do cenário 3 no nível microclimático é mais promissor tendo em vista a ambiência térmica para o pedestre.

Finalmente volta-se ao ponto de estudos individualizados para as cidades sabendo-se da diversidade de microclimas urbanos que coexistem com a diversidade morfológica. Para fins de melhoria do ambiente térmico para o pedestre nos contextos estudados conclui-se que a obtenção da redução da temperatura do ar deve ser ponderada com a análise dos impactos negativos da radiação refletida na T_{mr} para atestar o potencial das ações de mitigação de ICU com pavimentos frios no nível microclimático. Dessa forma, o parâmetro temperatura do ar analisado isoladamente não reflete adequadamente a condição real que envolve o microclima, a morfologia e as pessoas.

7.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Os resultados apresentados neste trabalho foram encontrados sob as condições específicas das áreas de estudo referentes aos materiais de superfície e suas proporções de recobrimento dentro dos domínios, relação W/H , geometria e orientação. Os procedimentos metodológicos podem ser aplicados em outros recortes urbanos para avaliar a mitigação de ICU com as referidas estratégias entre outras.

Outro ponto se refere ao método de identificação e diagnóstico de ICU. Limitou-se aqui à identificação por meio de sensoriamento remoto analisando imagens de satélite para uma apreensão global da variação de temperatura de superfície da cidade e entorno.

Adicionalmente, outras limitações acerca do uso de simulações microclimáticas com o ENVI-met 4 podem ser destacadas. A primeira é sobre a construção do modelo que, na versão utilizada (*basic*), possibilitou a utilização de apenas um tipo de material para fachadas e outro para coberturas. Dessa forma as análises partiram de uma simplificação da situação original de cada área. Quanto à configuração dos dados climáticos, o ENVI-met permite entradas de dados horários de temperatura e umidade simulando as variações de um ciclo, porém os valores de velocidade e direção do vento e nebulosidade são constantes durante toda a simulação.

Apesar das limitações, diversas pesquisas concluem que os benefícios dos métodos computacionais são avanços, mas também é relevante a atenção para as diferenças entre modelo e realidade.

7.2 PERSPECTIVAS PARA ESTUDOS FUTUROS

A interação entre a cidade e seu conjunto de microclimas é bastante complexa, evidenciando as relações de causa-efeito das variáveis já mapeadas que impactam a formação ICU. Para tal, o aprofundamento na temática do clima urbano carece de detalhamento e definição para o conjunto da cidade onde se tem como objetivo implementar ações para mitigação de ICU.

Dessa forma, considera-se como estudo futuro o desenvolvimento de um mapeamento climático urbano para Brasília, como forma de transmitir sinteticamente as especificidades dos microclimas para avaliação do ambiente térmico da cidade. O emprego de técnicas de geoprocessamento, sensoriamento remoto e simulação computacional são fundamentais para integração das informações associadas à produção e mitigação de ICU. Acrescenta-se a necessidade de desenhar um método de trabalho no sentido de interagir com dados multiescalares.

Refletindo sobre o ambiente térmico para o pedestre, avaliações sobre o estresse térmico visando complementar a abordagem de mitigação de ICU no nível microclimático pode ser um potencial indicador uma vez que não apenas a temperatura do ar é importante na avaliação da ambiência térmica, mas também a temperatura média radiante, umidade relativa do ar e a ventilação devem ser incorporadas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, L.L.; SOUZA, L.H; SAKURAGI, J.; CASTRO, R.M. Estudo de ilhas de calor na cidade de São José dos Campos utilizando o canal de infravermelho termal do Landsat-5 e o aerotransportado HSS. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais ...** Florianópolis: 2007, p.473-480, 2007.

AZEVEDO, G. F.; SOUZA, N. M. DE. Uso de imagens Landsat TM 5 para análise da temperatura de superfície do Distrito Federal. **Anais XVI Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE, n. 2005, p. 6917–6922, 2013.

BAPTISTA, Gustavo Macedo. Ilhas de Calor. **Scientific American Brasil**. Revista Digital. Editora Moderna: São Paulo, ano 1, no. 2, pg. 24-31, 2010. Disponível em: https://issuu.com/ed_moderna/docs/aula2_final_bx?e=2064801/6634353. Acesso em 06 de junho de 2017.

BARATTO, R. Escala de Brasília pelas lentes de Joana França. 30 Mai 2017. **ArchDaily Brasil**. Disponível em: <http://www.archdaily.com.br/br/872391/escalas-de-brasilia-pelas-lentes-de-joana-franca>. Acesso em 31 de maio de 2017.

BARBIRATO, G.; SOUZA, L.; TORRES, S. **Clima e Cidade: a abordagem climática como subsídios para estudos urbanos**. 2ª edição, Maceió: EDUFAL, 2016. 201p.

BIAS, E. D. S.; BAPTISTA, G. M.; LOMBARDO, M. A. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. XI SBSR, Belo Horizonte, p. 1741–1748, 2003

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

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Disponível online em www.ibge.gov.br. Acessado em 26 de abril de 2016.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais climatológicas para Brasília – DF**. 2015. Disponível online em: www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos. Acesso em 01 de Junho de 2017.

BRUSE, M. **ENVI-met 4: A microscale urban climate model**. Disponível em: <http://www.envi-met.info>. Acesso em 10 March 2017.

CASTELO BRANCO, Lorena Burgos. **Microclimas Urbanos no Plano Piloto de Brasília: o caso da Superquadra 108 Sul**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CORBELLA, Oscar; YANNAS, Simos. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos - conforto ambiental**. Rio de Janeiro: Revan, 2003. 288p.

DOULOS, L.; SANTAMOURIS, M.; LIVADA, I. Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials. **Solar Energy**, v. 77, n. 2, p. 231–249, 2004.

DORNELLES, K.; CARAM, R.; SICHIERI, E. Absortância solar e desempenho térmico de tintas frias para uso no envelope construtivo. In: XII ENCAC E VIII ELACAC, 12., 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ANTAC, 2013.

DUARTE, Denise. O clima urbano e o ambiente construído. In: Gonçalves, J.; Bode, K. (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 6, p. 155-179.

ENVI-met 4. Disponível online em: <http://www.envi-met.com/>. Acesso em: 18 de junho de 2017.

EPA, U. S.; Environmental Protection Agency. **Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies - Urban Heat Island Basics**. 2008. Disponível online em: <http://www.epa.gov/heatisland>. Acesso em 18 de junho de 2016.

ESCH, Marjolein Pijpers-van. **Designing the urban microclimate**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Ambiente Construído) – Faculdade de Arquitetura e Ambiente Construído, Departamento de Urbanismo, Universidade Tecnológica de Delft, 2015.

GALBINSKI, J. Problemas de desenho urbano em Brasília: ruas ou vias e a luta contra a topografia. In: PEIXOTO, Elane Ribeiro; DERNTL, Maria Fernanda; PALAZZO, Pedro Paulo; TREVISAN, Ricardo (Orgs.) **Tempos e escalas da cidade e do urbanismo: Anais do XIII Seminário de História da Cidade e do Urbanismo**. Brasília, DF: Universidade Brasília- Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2014. Disponível em: <http://www.shcu2014.com.br/content/problemas-desenho-urbano-em-brasilia-ruas-ou-vias-e-luta-contr-topografia>. Acesso em 18 de junho de 2017.

GÄAL, L.P.M. **Impacto da geometria urbana e da legislação de uso e ocupação do solo no microclima de cânions urbanos**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2017.

GUSSON, C.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**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

HERNANDEZ, Alberto. Fundamentos da simulação energética de edificações. In: Gonçalves, J.; Bode, K. (org.). **Edifício Ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Cap. 10, p. 285-295.

HOLANDA, F. **Brasília – cidade moderna, cidade eterna**. Brasília: FAU UnB, 210. 152p.

KARSENBERG, H.[et al]. **A cidade ao nível dos olhos: lições para os plinths**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015. 340p.

KATZCHNER, L. Urban Climate Studies as Tools for Urban Planning and Architecture. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 4., 1997, Salvador. **Anais...** Salvador: FAUFBA/LACAM - ANTAC, 1997, p. 49-58.

LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. Heat Island Group. Disponível em: <https://heatisland.lbl.gov>. Acessado em: 18 de julho de 2017.

LI, H. **Evaluation of cool pavement strategies for heat island mitigation**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade da Califórnia, Davis, 2012.

LOMBARDO, Magda A. **Ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p.

MACIEL, C. R. **Condições microclimáticas de espaços abertos: simulação de estratégias por meio do software Envi-met**. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, 2014.

MARTINS, T. A. L. **De condicionantes solares à oportunidades de desenho urbano: otimização de tipo-morfologias urbanas em contexto de clima tropical**. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MASCARENHAS, Giselle M. **O Comércio Local de Brasília: projeto e configuração da rua da igreja**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

MASCARÓ, Lucia; MASCARÓ, Juan José. **Ambiência Urbana**. 3ª edição, Porto Alegre: Masquatro Editora, 2009. 200p.

MIRZAEI, P. A. Recent challenges in modeling of urban heat island. **Sustainable Cities and Society**, v. 19, p. 200–206, 2015.

MONTEIRO, Carlos A. F.; MENDONÇA, Francisco. (org.) **Clima urbano**. 2ª edição, São Paulo: Contexto, 2015. 191p.

OKE, T. R. **Boundary Layer climates**. 2 ed. London: Methuen, 1987.

OKE, T. R. Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observation at Urban Sites. **World Meteorological Organization**. Report n° 81. 2006.

OMM, 2014. Organização Meteorológica Mundial. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-Guide.html>. Acessado em: 18 de agosto de 2017.

PANERAI, P. **Análise Urbana**. Brasília: Editora Unb, 2014. 198p.

PAULA, C.C.M. de; CALLEJAS, I.; DURANTE, L.; ROSSETI, K.; SILVA, D. Pavimento poroso e vegetação: estratégias para melhoria microclimática em áreas urbanas. In: Congresso Luso-Brasileiro para o planejamento urbano, regional, integrado e sustentável, 7., 2016, Maceió. **Anais....** Maceió: UFAL - PLURIS, 2016.

ROMERO, Marta Adriana Bustos. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. Brasília: Editora Unb, 2013. 128p.

_____. Marta Adriana Bustos. **Arquitetura do lugar: uma visão bioclimática da sustentabilidade em Brasília**. São Paulo: Nova Técnica Editorial, 2011. 164p.

_____. Marta Adriana Bustos. **Arquitetura bioclimática do espaço público**. 4ª reimpressão. Brasília: Editora Unb, 2015. 226p.

SALATA, F.; GOLASI, I.; VOLLARO, R.; VOLLARO, A. Urban microclimate and outdoor thermal comfort. A proper procedure to fit ENVI-met simulation outputs to experimental data. **Sustainable cities and society**, v.26, p. 318–343, 2016.

SANTAMOURIS, M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 26, pp. 224-240, 2013.

_____. M. Appropriate materials for the urban environment. In: Santamouris, M. (Org.) **Energy and Climate in the Urban Built Environment**. London: James & James, 2001.

SILVA, C. F. **O conforto térmico de cavidades urbanas: contexto climático do Distrito Federal**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SILVA, H. C. A. **Diferenças térmicas e higrométricas do ano de 2016 em Brasília – DF: subsídios para definição do clima urbano**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Ciências Humanas, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SHIANO-PHAN, R., WEBER, F., SANTAMOURIS, M. The Mitigative Potential of Urban Environments and Their Microclimates. **Buildings**, 5, pp. 783-801, 2015.

SHINZATO, P. **O impacto da vegetação nos microclimas urbanos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SYNNEFA, A.; SANTAMOURIS, M. Mitigating the Urban Heat Island with Cool Materials for the Buildings' Fabric. In: Santamouris, M. e Kolokotsa, D. (Org.) **Urban Climate Mitigation Techniques**. New York: Routledge, 2016.

SOUZA, C. A., ASSIS, E. S., MOTTA, F. De S., ANDRADE, J. V. R. Análise da influência da vegetação na densidade urbana no centro de Belo Horizonte, Brasil, através de modelagem micrometeorológica. **Pluris**, 2016.

STEWART, I.; OKE, T. Local climate zones for urban temperature studies. **American Meteorological Society**, v.93, p. 1879-1900, 2012.

TARIFA, José Roberto; ARMANI, Gustavo. Unidades Climáticas Urbanas da Cidade de São Paulo (primeira aproximação). In: **Atlas Ambiental do Município de São Paulo – FASE I**. São Paulo: Secretaria do Verde e do Meio Ambiente e Secretaria de Planejamento, Prefeitura Municipal de São Paulo, 2000.

TENORIO, Gabriela; GONDIM, Monica. Cinquenta anos de automóvel nas superquadras de Brasília: do Plano Piloto ao Setor Noroeste. In: Saboia, L.; Derntl, F. (org.). **Brasília 50 + 50: cidade, história e projeto**. Brasília: Editora UnB, 2014, p. 84-91.

TSOKA, S.; TSICALOUDAKI, K.; THEODOSIOU, T. Urban space's morphology and microclimatic analysis: a study for a typical urban district in the Mediterranean city of Thessaloniki, Greece. **Energy and Buildings**, v.156, p. 96-108, 2017.

TUMINI, I. **El microclima urbano en los espacios abiertos. Estudio de casos en Madrid**. Madrid, 2012. Tese (Doutorado) - Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2012.

VIANNA, Elen; ROMERO, Marta. The process of formation of heat islands: a parallel between Brasilia and Singapore. **4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island**, 30-31 May and 1 June 2016, National University of Singapore, Singapore.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.

UN-Habitat. **Streets as Public Spaces and Drivers of Urban Prosperity**. Nairobi: Un-Habitat, 2013.

USGS. U.S. Geological Survey (USGS). **Landsat 8 (L8) data users handbook**. Vr. 2.0, 2016. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf>. Acesso em 18 de junho de 2016.

ZANONI, V. A. G. **Influência dos agentes climáticos de degradação no comportamento higrotérmico de fachadas em Brasília**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

APÊNDICE I

Dados de umidade específica do ar

Os dados de umidade específica do ar (g/kg) solicitado para composição do arquivo meteorológico de simulação do ENVI-met 4.2 foram extraídos do banco de dados de aeroportos disponibilizados pela Universidade de Wyoming. A altura de referência para o topo do modelo do ENVI-met é de 2500 metros. Nas imagens abaixo estão destacados os dados utilizados para as simulações referentes à janeiro e setembro, onde procurou-se uma altura de medição mais próxima de 2500 metros.

83378 SBBR Brasilia (Aeroporto) Observations at 12Z 21 Jan 2017

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	131									
925.0	821									
900.0	1061	22.6	16.6	69	13.38	90	6	304.8	345.0	307.2
857.0	1482	18.2	12.2	68	10.52	73	15	304.5	336.2	306.4
850.0	1552	18.4	11.4	64	10.05	70	16	305.4	335.9	307.2
839.0	1664	18.8	9.8	56	9.14	65	20	307.0	334.9	308.7
786.0	2220	14.6	10.0	74	9.88	95	13	308.2	338.5	310.1
774.0	2351	13.6	10.0	79	10.06	85	12	308.5	339.4	310.4
746.0	2660	11.6	8.0	79	9.11	60	11	309.6	337.8	311.3
700.0	3192	8.2	4.6	78	7.65	60	5	311.5	335.5	313.0
676.0	3480	6.4	2.5	76	6.83	354	4	312.6	334.2	313.9
640.0	3927	4.7	-4.7	50	4.23	250	2	315.6	329.4	316.4
630.0	4056	4.2	-6.8	45	3.66	259	3	316.5	328.6	317.2
583.0	4681	-0.7	-2.3	89	5.57	303	6	317.9	336.0	318.9
570.0	4862	-0.3	-3.9	77	5.06	316	6	320.4	337.1	321.4
505.0	5821	-5.3	-23.1	23	1.18	25	11	325.6	329.9	325.8
500.0	5900	-5.7	-24.7	21	1.04	25	11	326.0	329.8	326.2
492.0	6027	-6.1	-34.1	9	0.44	20	13	327.0	328.7	327.1
471.0	6368	-8.7	-26.6	22	0.93	5	19	327.9	331.4	328.1
463.0	6501	-9.7	-23.7	31	1.23	10	19	328.3	332.8	328.5
439.0	6912	-12.3	-44.3	5	0.17	25	19	330.0	330.7	330.1
431.0	7052	-13.3	-41.9	7	0.22	30	19	330.5	331.4	330.6
404.0	7544	-16.8	-33.6	22	0.56	5	15	332.2	334.3	332.3
400.0	7620	-17.3	-32.3	26	0.64	10	14	332.4	334.9	332.6
397.0	7676	-17.8	-30.9	31	0.74	15	12	332.5	335.3	332.6
389.0	7828	-19.1	-27.1	49	1.07	12	10	332.7	336.7	332.9
371.0	8179	-20.3	-25.2	65	1.34	6	5	335.7	340.7	335.9
355.0	8503	-23.3	-25.9	79	1.31	0	0	335.9	340.8	336.1
313.0	9410	-30.5	-31.3	93	0.90	262	10	338.1	341.6	338.3
310.0	9478	-30.9	-32.2	88	0.83	255	11	338.5	341.7	338.7
304.0	9616	-31.7	-34.1	79	0.70	235	12	339.2	342.0	339.4
300.0	9710	-32.3	-35.4	74	0.63	235	12	339.7	342.2	339.9
289.0	9973	-34.1	-39.1	60	0.45	242	13	340.8	342.6	340.9
284.0	10094	-35.1	-41.1	54	0.37	245	13	341.1	342.6	341.1
269.0	10471	-38.3	-47.3	38	0.20	220	15	341.8	342.6	341.8

Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Acesso em 15 de Junho de 2017

83378 SBBR Brasilia (Aeroporto) Observations at 00Z 06 Sep 2017

PRES	HGHT	TEMP	DWPT	RELH	MIXR	DRCT	SKNT	THTA	THTE	THTV
hPa	m	C	C	%	g/kg	deg	knot	K	K	K
1000.0	147									
925.0	837									
901.0	1061	20.8	3.8	33	5.61	60	4	302.8	320.0	303.9
888.0	1188	22.0	4.0	31	5.77	85	14	305.3	323.2	306.4
874.0	1327	21.1	3.8	32	5.77	90	18	305.8	323.6	306.8
850.0	1570	19.4	3.4	35	5.78	85	14	306.4	324.4	307.5
744.0	2684	8.7	1.1	59	5.59	65	10	306.7	324.1	307.7
700.0	3194	3.8	0.0	76	5.50	70	10	306.7	323.8	307.7
697.0	3229	3.4	0.1	79	5.56	72	9	306.6	323.9	307.6
684.0	3383	6.2	-26.8	7	0.63	80	6	311.4	313.6	311.5
660.0	3675	5.0	-42.0	2	0.15	85	10	313.2	313.8	313.2
643.0	3888	6.2	-42.8	1	0.14	66	14	316.9	317.5	316.9
638.0	3951	5.8	-43.2	1	0.13	60	15	317.1	317.7	317.2
612.0	4285	3.5	-45.5	1	0.11	60	15	318.4	318.8	318.4
542.0	5260	-3.0	-52.0	1	0.06	0	0	321.8	322.1	321.8
527.0	5486	-4.5	-53.5	1	0.05	35	5	322.6	322.8	322.6
518.0	5622	-4.1	-53.1	1	0.05	56	8	324.7	324.9	324.7
508.0	5775	-4.8	-53.8	1	0.05	80	11	325.7	325.9	325.7
500.0	5900	-5.3	-54.3	1	0.05	70	11	326.5	326.7	326.5
495.0	5978	-5.7	-54.5	1	0.05	70	12	327.0	327.2	327.0
464.0	6482	-7.9	-55.9	1	0.04	127	11	330.3	330.5	330.3
460.0	6548	-8.5	-55.1	1	0.05	135	11	330.4	330.6	330.4
423.0	7185	-14.1	-47.2	4	0.13	175	17	331.2	331.7	331.2
400.0	7610	-17.9	-41.9	10	0.24	180	21	331.6	332.6	331.7
375.0	8087	-22.3	-42.2	15	0.25	195	25	332.0	333.0	332.1
364.0	8307	-24.3	-42.3	17	0.25	199	22	332.1	333.2	332.2

Fonte: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Acesso em 20 de Setembro de 2017

APÊNDICE II

Dados horários de temperatura de ar e umidade relativa do ar - INMET

A seguir são apresentados os dados horários disponibilizados pelo INMET que foram utilizados para a configuração do arquivo climático de janeiro (21/01/2017) e setembro (04/09/2017). Foram utilizados os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, e radiação.

24/11/2017

INMET - Estações Automáticas

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)	Chuva (mm)
		UTC	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir. (°)		
20/01/2017	21	25.9	26.7	25.9	51	52	49	15.0	15.8	14.8	885.9	885.9	885.2	2.4	100	6.0	168.6	0.0
20/01/2017	22	22.9	25.9	22.8	72	73	51	17.7	17.8	14.7	886.6	886.6	885.9	1.3	200	4.4	38.52	0.0
20/01/2017	23	21.9	23.2	21.8	76	76	69	17.5	18.1	17.1	887.1	887.1	886.6	1.1	178	2.3	-3.53	0.0
21/01/2017	00	21.6	22.4	21.6	75	76	70	17.1	17.5	16.6	887.5	887.5	887.0	1.1	143	2.6	-3.54	0.0
21/01/2017	01	21.6	22.3	21.2	74	77	70	16.8	17.1	16.6	888.1	888.1	887.5	2.2	170	5.1	-3.54	0.0
21/01/2017	02	20.9	21.6	20.9	80	80	74	17.4	17.4	16.8	888.6	888.6	888.0	2.5	185	5.1	-3.54	0.0
21/01/2017	03	20.3	20.9	20.3	85	85	80	17.7	17.7	17.4	888.3	888.7	888.3	2.5	172	5.8	-3.54	0.0
21/01/2017	04	20.0	20.3	20.0	87	87	85	17.7	17.8	17.7	887.9	888.3	887.9	2.9	157	5.3	-3.49	0.0
21/01/2017	05	19.4	20.0	19.4	87	89	87	17.3	17.8	17.3	887.2	887.9	887.2	3.0	159	5.8	-3.53	0.0
21/01/2017	06	19.2	19.4	19.2	86	88	86	16.8	17.3	16.8	886.9	887.2	886.9	2.4	146	5.5	-3.53	0.0
21/01/2017	07	19.1	19.2	19.1	86	86	86	16.7	16.8	16.7	886.7	887.0	886.7	1.6	130	4.9	-3.49	0.0
21/01/2017	08	19.2	19.2	19.0	85	86	84	16.6	16.7	16.5	886.7	886.7	886.4	1.4	130	4.0	-3.54	0.0
21/01/2017	09	19.0	19.3	19.0	85	86	84	16.5	16.6	16.4	887.1	887.1	886.7	1.8	119	4.2	-2.72	0.0
21/01/2017	10	20.4	20.4	19.0	81	86	80	17.0	17.0	16.5	887.7	887.7	887.1	2.5	120	5.5	269.1	0.0
21/01/2017	11	21.7	21.8	20.4	74	81	73	16.8	17.2	16.2	888.5	888.5	887.7	3.4	119	5.7	1083.	0.0
21/01/2017	12	21.9	22.1	21.4	72	75	70	16.6	17.1	16.2	888.8	888.8	888.5	2.6	117	6.8	1743.	0.0
21/01/2017	13	23.9	24.3	21.9	62	72	61	16.2	17.0	15.6	888.9	889.0	888.8	3.2	81	6.0	1697.	0.0
21/01/2017	14	24.9	25.2	23.8	59	65	57	16.2	17.0	15.8	888.7	889.0	888.7	3.1	85	6.3	3388.	0.0
21/01/2017	15	26.4	26.8	24.9	48	62	48	14.7	17.3	14.6	888.4	888.8	888.3	3.4	75	7.4	3760.	0.0
21/01/2017	16	27.0	27.9	26.1	46	54	44	14.4	16.0	13.1	887.8	888.4	887.8	2.7	98	7.2	3567.	0.0
21/01/2017	17	26.6	27.8	26.4	47	52	45	14.2	16.1	13.9	886.9	887.8	886.9	2.7	108	6.9	3170.	0.0
21/01/2017	18	27.2	27.5	26.6	46	51	44	14.7	16.0	14.0	885.8	886.9	885.8	2.3	98	7.5	2025.	0.0
21/01/2017	19	26.8	27.4	26.8	44	48	42	13.5	15.3	13.0	885.0	885.9	885.0	2.4	137	5.9	1519.	0.0
21/01/2017	20	26.3	27.0	26.3	48	49	42	14.5	14.6	12.9	885.1	885.2	885.0	2.3	139	4.3	802.8	0.0
21/01/2017	21	25.6	26.3	25.6	52	52	46	14.9	14.9	13.8	885.5	885.5	885.1	2.4	129	5.5	392.5	0.0
21/01/2017	22	21.5	25.6	21.5	74	74	51	16.7	17.3	14.8	886.2	886.2	885.5	3.6	226	7.3	60.10	0.0
21/01/2017	23	20.6	21.5	20.5	80	80	74	17.0	17.0	16.4	886.9	886.9	886.2	3.5	204	7.2	-3.31	0.0
22/01/2017	00	19.9	20.6	19.9	84	84	80	17.1	17.1	16.9	887.1	887.2	886.9	2.7	191	6.5	-3.54	0.0
22/01/2017	01	19.6	19.9	19.5	85	85	84	16.9	17.2	16.9	887.6	887.6	887.1	2.5	171	5.8	-3.54	0.0
22/01/2017	02	18.8	19.6	18.7	88	88	85	16.8	17.0	16.6	887.5	887.7	887.5	1.0	168	4.5	-3.54	0.0

16/09/2017

INMET - Estações Automáticas

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m²)	Chuva (mm)
		Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Inst.	Máx.	Min.	Vel.	Dir. (°)	Raj.		
03/09/2017	09	15.4	15.9	15.4	70	70	69	10.0	10.2	10.0	892.3	892.3	891.8	4.6	91	7.4	-3.54	0.0
03/09/2017	10	15.3	15.4	14.9	71	72	70	10.1	10.1	10.0	892.9	892.9	892.3	4.5	90	7.9	97.21	0.0
03/09/2017	11	17.4	17.4	15.3	64	71	64	10.6	10.6	10.1	893.3	893.3	892.9	5.0	86	10.2	797.4	0.0
03/09/2017	12	18.9	19.0	17.0	58	65	58	10.4	10.8	10.3	893.8	893.8	893.3	5.3	88	11.4	1727.	0.0
03/09/2017	13	20.4	20.5	18.5	53	58	52	10.4	10.5	9.8	893.9	894.0	893.8	5.3	92	10.2	2512.	0.0
03/09/2017	14	21.4	22.5	19.8	46	53	45	9.4	10.6	9.4	893.4	893.9	893.4	5.1	101	9.7	3040.	0.0
03/09/2017	15	22.9	23.4	21.4	41	46	40	8.9	9.8	8.8	892.8	893.5	892.8	5.5	91	10.4	3263.	0.0
03/09/2017	16	23.9	25.2	22.9	36	41	33	7.8	9.2	7.6	892.0	892.8	892.0	5.0	98	9.8	3237.	0.0
03/09/2017	17	25.3	25.8	23.9	31	36	30	6.7	8.4	6.3	890.9	892.0	890.8	4.3	100	9.5	3045.	0.0
03/09/2017	18	25.6	26.4	24.7	30	32	28	6.9	7.1	6.0	890.1	890.9	890.0	4.6	95	8.9	2688.	0.0
03/09/2017	19	25.5	26.1	25.0	29	31	29	6.3	7.4	6.1	889.9	890.1	889.8	4.4	91	8.8	2095.	0.0
03/09/2017	20	24.9	25.9	24.7	27	30	26	4.4	6.5	4.1	890.0	890.0	889.8	4.7	108	9.5	1303.	0.0
03/09/2017	21	23.1	24.9	23.1	29	29	27	4.0	4.6	3.6	890.3	890.3	889.9	3.6	96	8.8	412.9	0.0
03/09/2017	22	22.1	23.2	22.1	33	33	29	4.9	4.9	4.0	890.7	890.8	890.3	3.6	98	7.3	0.202	0.0
03/09/2017	23	21.2	22.0	21.2	36	36	33	5.5	5.5	4.9	891.4	891.4	890.7	4.2	97	6.5	-3.54	0.0
04/09/2017	00	20.2	21.2	20.0	40	40	36	6.0	6.0	5.5	891.7	891.7	891.4	3.7	93	6.6	-3.54	0.0
04/09/2017	01	19.3	20.2	19.3	43	43	40	6.4	6.5	6.0	891.9	891.9	891.7	3.8	95	7.4	-3.54	0.0
04/09/2017	02	18.7	19.4	18.6	45	45	43	6.4	6.5	6.4	891.8	891.9	891.8	4.2	91	7.2	-3.54	0.0
04/09/2017	03	18.5	18.8	18.1	43	46	43	5.6	6.4	5.6	891.6	891.9	891.6	4.6	98	8.7	-3.54	0.0
04/09/2017	04	17.6	18.8	17.6	45	45	40	5.5	5.6	5.0	891.0	891.6	891.0	3.3	101	7.7	-3.54	0.0
04/09/2017	05	16.6	17.8	16.6	47	47	45	5.1	5.6	5.1	890.7	891.1	890.7	3.0	110	6.4	-3.54	0.0
04/09/2017	06	15.9	16.7	15.9	46	48	46	4.4	5.2	4.4	890.6	890.7	890.5	4.2	109	6.9	-3.54	0.0
04/09/2017	07	14.6	15.9	14.6	53	53	46	5.0	5.0	4.4	890.6	890.6	890.5	4.4	109	9.6	-3.54	0.0
04/09/2017	08	14.2	14.8	14.1	58	58	53	6.1	6.1	5.0	890.9	890.9	890.6	4.0	102	7.6	-3.54	0.0
04/09/2017	09	13.8	14.2	13.7	62	62	58	6.6	6.7	6.1	891.3	891.4	890.9	4.4	92	7.6	-3.54	0.0
04/09/2017	10	14.4	14.4	13.7	62	64	62	7.3	7.3	6.6	892.0	892.0	891.3	4.8	85	8.2	111.9	0.0
04/09/2017	11	15.4	15.7	14.4	60	62	58	7.5	7.6	7.3	892.8	892.8	892.0	5.9	85	10.0	842.8	0.0
04/09/2017	12	17.2	18.0	15.4	53	60	51	7.4	8.0	7.2	893.3	893.3	892.7	6.0	80	11.1	1783.	0.0
04/09/2017	13	19.1	19.3	17.1	47	53	47	7.4	7.9	7.2	893.8	893.8	893.2	4.5	62	11.1	2567.	0.0
04/09/2017	14	21.1	21.2	19.1	40	47	39	6.8	7.6	6.6	893.4	893.8	893.4	3.4	62	9.2	3077.	0.0
04/09/2017	15	21.6	22.4	20.7	36	40	35	5.9	6.8	5.6	892.8	893.4	892.7	3.6	65	8.7	3293.	0.0
04/09/2017	16	23.6	24.1	21.5	30	37	30	4.9	6.4	4.6	891.8	892.8	891.8	4.3	90	8.5	3255.	0.0
04/09/2017	17	24.4	25.0	23.3	28	30	26	4.4	5.3	3.5	890.6	891.8	890.6	3.7	74	10.2	3082.	0.0
04/09/2017	18	25.2	25.5	23.9	26	28	25	4.2	4.6	3.0	889.8	890.7	889.8	2.9	80	7.7	2710.	0.0
04/09/2017	19	25.2	25.7	24.5	24	27	24	3.3	4.2	2.9	889.4	889.9	889.4	2.6	60	9.0	2116.	0.0
04/09/2017	20	24.7	25.4	24.6	24	26	23	2.7	3.6	2.4	889.5	889.5	889.4	3.1	80	7.6	1327.	0.0
04/09/2017	21	22.9	24.7	22.9	25	25	24	2.1	2.8	1.8	889.7	889.7	889.5	2.9	104	7.0	417.2	0.0
04/09/2017	22	21.6	22.9	21.6	28	28	26	2.5	2.7	2.1	890.1	890.1	889.7	2.7	106	5.8	0.397	0.0
04/09/2017	23	20.9	21.8	20.9	30	30	28	2.7	2.8	2.4	890.7	890.7	890.1	3.5	96	6.8	-3.54	0.0
05/09/2017	00	20.3	21.0	20.2	31	31	30	2.6	2.7	2.5	891.1	891.1	890.7	3.3	95	6.1	-3.54	0.0
05/09/2017	01	19.1	20.4	19.1	33	33	31	2.4	2.6	2.4	891.6	891.6	891.1	2.7	98	7.5	-3.54	0.0
05/09/2017	02	18.4	19.4	18.4	35	35	32	2.6	2.6	2.3	891.7	891.8	891.6	3.2	104	6.4	-3.54	0.0