

Universidade de São Paulo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Daniel Felipe Ota Yoshida

Infraestrutura verde: efeitos microclimáticos para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano

São Paulo

2022

Universidade de São Paulo - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Daniel Felipe Ota Yoshida

Infraestrutura verde: efeitos microclimáticos para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano

Versão Corrigida

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, para obtenção do Título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura
Orientadora Prof. Dra. Denise H. S. Duarte

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM
RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB
RESPONSABILIDADE DO(A) AUTOR(A) E
ANUÊNCIA DO (A) ORIENTADOR(A).

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.
São Paulo, 03 de fevereiro de 2023

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço Técnico de Biblioteca
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo

Yoshida, Daniel Felipe Outa Infraestrutura verde: efeitos microclimáticos para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano / Daniel Felipe Outa Yoshida; orientadora Denise Helena Silva Duarte. - São Paulo, 2018.
185.

Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Infraestrutura Verde. 2. Conforto Térmico em Espaços Abertos. 3. Saúde das plantas. 4. ENVI-met. I. Duarte, Denise Helena Silva, orient. II. Título.

Nome: Daniel Felipe Ota Yoshida. Título: Infraestrutura verde: efeitos microclimáticos para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: ___/___/___

Banca Examinadora Orientador:

Prof(a). Dr(a). _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr(a). _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Agradecimentos

Processo: 2020/01610-0, À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP),

À minha orientadora, Prof. Dra. Denise Helena Silva Duarte, pelo apoio, paciência e dedicação em toda pesquisa;

À pesquisadora Dra. Paula Shinzato, pelo apoio e ensinamento durante a pesquisa;

Ao Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha pela paciência e ajuda na interpolação dos dados do Projeta Inpe;

Ao Prof. Dr Simon Helge pela ajuda com o ENVI-met, cessão da licença para esta pesquisa e pela disposição em ajudar as pesquisas do LABAUT;

A equipe do ENVI-met pela disponibilidade da licença *Science* para esta pesquisa e outras do LABAUT;

Aos meus amigos pesquisadores, Bruna Dallaverde de Sousa, Dra. Carolina Gusson, Rose Raad, Luiza Sobhie Muñoz, Julia Rodrigues Leite, Luísa Zucchi e Shaiane Viana;

À pesquisadora Fernanda Diniz, pela ajuda com a coleta de dados da plataforma Projeta Cptec/Inpe;

Ao meu pai, Pedro Yoshida, pelo apoio durante todo meu percurso acadêmico;

À minha mãe, Mônica Outa, que me apoia lá do céu;

À Alexandra Oga, pela parceria e incondicional apoio durante toda nossa história juntos;

Aos meus irmãos, Rafael Yoshida e Michel Yoshida, por toda ajuda fornecida;

Aos meus avós, Massakazu Outa, Setuko Yone Outa e falecidos Shigueru Yoshida e Kimiko Yoshida, pelo apoio e aprendizagem;

À minha família.

Sumário

Sumário	6
Índice de Tabelas	9
Índice de Figuras	10
Resumo	17
Abstract	18
1. Introdução e Justificativa da Pesquisa	19
1.1 Objeto	23
1.2 Objetivos	23
1.3 Descrição dos capítulos	23
2. Clima urbano, a influência da vegetação microclima urbano e sua saúde.	24
2.1 Interações entre o clima urbano e o ambiente construído	24
2.2 Balanço de energia no meio urbano	26
2.3 O clima urbano e a vegetação	28
2.4 Balanço de energia da vegetação	30
2.5 Balanço de Energia na Folha	31
2.6 A vitalidade da vegetação no ambiente urbano	35
2.7 Infraestrutura Verde, conceito e aplicações	38
3. Mudanças climáticas, projeções climáticas futuras e planos de adaptação urbana 44	
3.1 Mudanças Climáticas	44
3.2 O Impacto das Mudanças Climáticas	46
3.3 Projeções Climáticas Futuras	49
3.4 As Cidades e as Mudanças Climáticas	52
3.5 Impactos das Mudanças Climáticas nas Cidades	55
3.6 O estresse térmico no meio urbano e seus impactos na saúde humana	56
3.7 Conforto térmico em espaços abertos e índices de conforto térmico	57
3.7.1 TEP (Temperatura Equivalente Percebida)	58
3.7.2 PET - Physiological Equivalent Temperature (Temperatura Fisiológica Equivalente)	59
3.8 Planos de ação voltados ao risco das ondas de calor	61
4. Modelagem microclimática	66
4.1 O Modelo ENVI-met	66
4.2 O modelo Envi-met e a vegetação	68
5. Material e Método	72
5.1 Levantamento de dados da morfologia urbana	73

5.1.1 Local Climate Zone (LCZ)	73
5.1.2 Principais LCZs da RMSP	77
5.2 Levantamento de dados microclimáticos	81
5.3 Levantamento de dados de projeções climáticas futuras	84
5.4 Levantamento de dados dos materiais construtivos e de solo	89
5.5 Levantamento de dados de Vegetação	95
5.6 Modelagem, Parametrização e Simulação	105
5.7 Modelagem da vegetação no ENVI-met	108
5.8 Modelagem dos cenários sem vegetação no ENVI-met	110
5.9 Modelagem dos cenários com vegetação no ENVI-met	113
5.10 Simulações no ENVI-met	116
5.10 Cálculo de PET (Physiological Equivalent Temperature)	119
5.11 Cálculo de TEP nas simulações do ENVI-met	119
6. Resultados e Discussões	121
6.1 Cenário Climático Atual	121
6.2 Cenário Climático Atual	122
6.2.1 Temperatura do Ar	122
6.2.2 Temperatura Radiante Média	125
6.2.3 Temperatura de Superfície	127
6.2.4 PET e TEP	130
6.2.5 Saúde das plantas: Temperatura de Folha	133
6.3 Projeção de clima futuro RCP 8.5 - dezembro (2079-2099)	136
6.3.1 Temperatura do Ar	136
6.3.2 Temperatura Radiante Média	139
6.3.3 Temperatura de Superfície	141
6.3.4 PET e TEP	144
6.3.5 Saúde das plantas: Temperatura de Folha	147
6.4 Cenário Climático: (3) 23.11.2099 (RCP 8.5) - Dia mais quente	150
6.4.1 Temperatura do Ar	150
6.4.2 Temperatura Radiante Média	152
6.4.3 Temperatura de Superfície	155
6.4.4 PET e TEP	158
6.4.5 Saúde das Plantas: Temperatura da Folha	161
6.5 Comparações entre simulações com diferentes valores de LAD	164
6.5.1 Temperatura do Ar	165
6.5.2 Temperatura Radiante Média	166

6.5.3 Temperatura de Superfície	168
6.5.4 PET e TEP	169
7. Considerações finais e conclusões	171
Referências bibliográficas	174

Índice de Tabelas

Tabela 1: Faixas interpretativas de TEP. Fonte: Monteiro (2018)	60
Tabela 2: Dados microclimáticos medidos no Parque Trianon em 2016. Fonte: Dados fornecidos pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato.	84
Tabela 3: Dados extraídos da plataforma Projeta Inpe.	86
Tabela 4: Propriedades dos materiais referentes a cobertura dos edifícios no ENVI-met Fonte: Gusson (2020)	91
Tabela 5: Propriedades do bloco de concreto para as paredes. Fonte: Gusson (2020).	91
Tabela 6: Propriedades do pavimento de concreto. Fonte: Gusson (2020).	92
Tabela 7: Propriedades do pavimento. Fonte: Gusson (2020).	93
Tabela 8: Propriedades materiais do asfalto no ENVI-met. Fonte: Gusson (2020).	94
Tabela 9: Propriedades do asfalto gnaisse. Fonte: Gusson (2020).	94
Tabela 10: Propriedades do solo Sandy Clay Loam. Fonte: Gusson (2020).	95
Tabela 11: Resultados gerados pelo CAN-EYE. Fonte: Autor.	104
Tabela 12: Dados de entrada para o cenário climático atual 03.04.2016. Fonte: Autor.	119
Tabela 13: Dados de entrada para o cenário de projeções climáticas futuras.	119

Índice de Figuras

Figura 1: Simplificação ilustrada do impacto da geometria do canyon urbano nas trocas de radiação: (a) A recepção de irradiação direta através do topo do canyon, (b) primeira reflexão das facetas do canyon, (c) segunda reflexão. Obs: a entrada e a reflexão da radiação difusa do céu não são retratadas. Fonte: OKE et al (2017).	25
Figura 2: esquema dos fluxos de Balanço Energético da Superfície no ambiente rural (a) e no ambiente urbano (b). O volume que se estende do topo da RSL (roughness sublayer) para baixo, onde não há fluxo de condução dentro do período de interesse. As flechas estão desenhadas na direção correspondente ao fluxo é considerado positivo. Fonte: Oke et al (2017)	28
Figura 3: Esquema das trocas de energia entre uma árvore isolada e o canyon urbano. Fonte: OKE (1983).....	29
Figura 4: Representação esquemática dos fluxos envolvidos em (a) energia e (b) balanços hídricos de um volume solo-planta-ar. Fonte: OKE (1987).	31
Figura 5: Esquema da camada limite da folha. Fonte: OKE (1978).	32
Figura 6: Esquema da abertura e trocas gasosas realizadas no estômato. Fonte: OKE (1973).....	34
Figura 7: Estômatos em uma folha no microscópio. Fonte: Shinzato (2014).	34
Figura 8: Representação das condições ambientais enfrentadas pelas árvores no ambiente natural e áreas urbanas. FONTE: (BRUNE, 2016).....	36
Figura 9: O solo urbano compacto e com pouco espaço para o desenvolvimento das árvores em Hong Kong. Fonte: CHI YUNG (2019).	36
Figura 10: Resumo dos serviços prestados pela infraestrutura verde e suas escalas de efeito segundo o levantamento de DEMUZERE et al (2014). Fonte: DEMUZERE (2014). ...	39
Figura 11: Exemplo de jardim de chuva. Fonte: Cormier; Pellegrino (2008).	41
Figura 12: Exemplo de biovaleta. Fonte: Cormier; Pellegrino (2008).....	42
Figura 13: Média da temperatura da superfície do planeta Terra ao longo dos anos de 1850 a 2025 de acordo com dados meteorológicos de diferentes modelos. Os dados após 2019 demonstram a projeção do crescimento da temperatura para os anos futuros. Fonte: WMO (2020).	45
Figura 14: Diferença de temperatura da superfície terrestre ao longo do período de 1981 e 2010. Fonte: WMO, 2020	46
Figura 15: Riscos, intensidade e impactos atrelados ao aumento de temperatura da superfície terrestre. Fonte: IPCC (2018).	49
Figura 16: Aumento de temperatura da superfície terrestre ao se comparar o período de 2081-2100 com o período de 1850-1900 para cada cenário futuro de emissão de CO ² . Fonte: IPCC (2021).....	50
Figura 17: Taxas de emissão de CO ² e outros gases de efeito estufa ao longo de 2015-2100 de acordo com cada SSP. Fonte: IPCC (2021).	51
Figura 18: Emissão de CO ² e outros gases de efeito estufa de acordo com cada situação de cenário futuro. Fonte: IPCC (2021).	51
Figura 19: Acima: cidades pelo Mundo com mais de 100.000 habitantes dentro do período do ano de 2000; abaixo: população urbana estimada para o período da década de 2050. Imagem gerada por meio de dados da International Earth Science Information Network (CIESIN), Universidade de Columbia. Fonte: C40 (2018).	53
Figura 20: Faixas interpretativas PET. Fonte: Matzarakis ; Mayer H (1996)	61

Figura 21: Inclusão do uso de água em espaços públicos de Paris. Fonte: MAIRIE DE PARIS (2018).....	62
Figura 22: Plano com o objetivo de ampliar a arborização e tornar a proporção de árvores igual à de habitantes no plano de arborização da cidade de Barcelona e isométrica de exemplo de arborização em quadra na cidade. Fonte: CIUDAD BARCELONA (2018).	63
Figura 23: Campanha em Ahmedabad exemplificando o efeito de coberturas de cor mais clara na temperatura interna das casas. Fonte Ahmedabad (2016).	64
Figura 24: Infográfico com as principais diretrizes do plano de adaptação de Buenos Aires. Fonte: Buenos Aires (2021).	65
Figura 25: Ilustração esquemática de funcionamento do ENVI-met e seus modelos. Fonte: Kropp (2016).	67
Figura 26: Comparações realizadas por SIMON (2016) de valores coletados de campo e valores simulados de fluxo de seiva e temperatura da folha no ENVI-met. Fonte: Simon (2016).	70
Figura 27 :Área de estudo e seu modelo tridimensional com vegetação no ENVI-met. Fonte: Simon (2016).....	70
Figura 28: Fluxograma metodológico da pesquisa: Etapa de levantamentos. Fonte: Autor .	72
Figura 29: Fluxograma metodológico da etapa de modelagem. Fonte: Autor	73
Figura 30: Fluxograma metodológico da etapa de análise. Fonte: Autor.	73
Figura 31: Propriedades típicas encontradas dentro da série das LCZs construídas. Uma tabulação completa de todas as classes LCZ incluindo propriedades encontradas por Stewart e Oke (2012). Fonte: Oke et al (2017).	75
Figura 32: Classes de LCZ. Fonte: Stewart e Oke (2012).	76
Figura 33: Porcentagens das LCZ construídas na cidade de São Paulo	78
Figura 34: Distribuição das LCZs dentro do município de São Paulo. Fonte: editado pelo autor a partir de Ferreira (2019).	78
Figura 35: LCZ 3 – baixo-compacto - Pinheiros. Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.	79
Figura 36: Jardim Europa - LCZ 6 – baixo-aberto. Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.	80
Figura 37: LCZ 8 - CEAGESP – baixo-grande . Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.	81
Figura 38: Localização das estações meteorológicas no Parque Trianon Fonte: Shinzato et al (2019).	82
Figura 39: Temperatura média horária em 2008 a) Janeiro-Fevereiro-Março b) Abril-Maio-Junho c) Julho-Agosto-Setembro d) Outubro Novembro-Dezembro. Fonte: IAG (2008).	86
Figura 40: Umidade relativa média horária em 2008 a) Janeiro-Fevereiro-Março b) Abril-Maio-Junho c) Julho-Agosto-Setembro d) Outubro Novembro-Dezembro. Fonte: IAG (2008).	87
Figura 41: Valores de temperatura do ar interpolados e umidade relativa do ar estimados para dezembro (2079-2099), baseados na média horária de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o mês de novembro, conforme o Boletim Meteorológico do IAG (2008). Fonte: Autor.	88
Figura 42: Valores de temperatura do ar interpolados e umidade relativa do ar estimados para o dia 23.11.2099, baseados na média horária de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o mês de novembro, conforme o Boletim Meteorológico do IAG (2008). Fonte: Autor.....	89
Figura 43: Perfil de cobertura na base de dados do ENVI-met. Fonte: Gusson 2020.....	90

Figura 44: Perfil de parede modelada por GUSSON (2020) dentro da base de dados do ENVI-met. Fonte: Gusson 2020.	91
Figura 45: Perfil de solo com asfalto. Fonte: Gusson (2020).	92
Figura 46: Perfil do solo Sandy Clay Loam (franco-arenoso-argiloso) Shinzato et al (2019). Fonte: Autor	94
Figura 47: Catálogo de espécies de árvores e seus tamanhos de acordo com o Manual Técnico de Arborização Urbana. Fonte: SVMA (2015).....	95
Figura 48: Tampa modelada na impressora 3D com furos e coordenadas x,y dos 3 pontos de cada foto registrada. Fonte: Autor.	98
Figura 49 :Pontos em diferentes posições para calibração do centro óptico no CAN-EYE. Fonte: Autor	98
Figura 50: Esquema representativo de calibração da câmera e lente hemisférica no CAN-EYE. Fonte: Weiss (2017).	98
Figura 51: Resultado do centro óptico de acordo com as calibrações realizadas nessa pesquisa. Fonte: Autor.....	99
Figura 52: Centro óptico de acordo com as calibrações realizadas nessa pesquisa. Fonte: Autor.....	100
Figura 53:	100
Figura 54: Resultado do mascaramento de imagens hemisféricas no CAN-EYE. Fonte: Autor.....	100
Figura 55: Fotos hemisféricas nos pontos 1, 2 e 3 no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - USP. Fonte: Autor.....	101
Figura 56: Vista aérea dos pontos 1, 2 e 3. Fonte: Autor.	101
Figura 57: Sibipiruna próxima à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - USP. Fonte: Autor	102
Figura 58:: Levantamento em campo no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Fonte: Autor.	102
Figura 59: Imagem do modelo de cálculo LAD a partir de LAI desenvolvido por Zucchi (2018). Fonte: Autor.	104
Figura 60: Quadras LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8, modeladas de acordo com Kropp (2018) e Kropp et al (2018).	105
Figura 61: Modelo isométrico e planta da quadra LCZ 3. Fonte: Autor.	106
Figura 62: Modelo Isométrico e planta da quadra LCZ 8. Fonte Autor.	107
Figura 63: LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 em formato 3x3 quadras, com a quadra central em destaque. Fonte: Autor.	107
Figura 64: Sibipiruna (<i>Caesalpinia pluviosa</i> var. <i>peltophoroides</i> (esquerda) e modelo de árvore no Alberto (direita). Fonte: Editado de Ramalho (2003).....	109
Figura 65: Vistas dos planos YZ e XZ da Sibipiruna modelada no Albero. Fonte: Autor. ...	109
Figura 66: Copas Sibipirunas modeladas com diferentes valores de LAD. Fonte: Autor. ...	110
Figura 67: Vista da LCZ 3 (esquerda) e seu perfil do solo (direita) para o conjunto de quadras LCZ 3 no Spaces. Fonte: Autor.	111
Figura 68: 9 quadras LCZ 3 no formato 3x3 modelada no Sketchup. Fonte: Autor.....	111
Figura 69: Vista dos edifícios LCZ 6 (esquerda) e seu perfil do solo (direita) no Spaces. Fonte: Autor.	111
Figura 70: 9 quadras LCZ 6 no formato 3x3 sem vegetação modelada no Sketchup. Fonte: Autor.....	112
Figura 71: Vista de dos edifícios LCZ 8 (esquerda) e seu perfil de solo (direita) no Spaces. Fonte: Autor.	112

Figura 72: 9 quadras LCZ 6 no formato 3x3 modelada no Sketchup. Fonte: Autor.....	112
Figura 73: Modelo de quadras 3x3 LCZ 3 vista: vista dos edifícios e vegetação (esquerda); perfil do solo (meio); perfil de vegetação (direita)	113
Figura 74: Isométrica 3x3 LCZ 3: Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.....	113
Figura 75: Modelo de quadras 3x3 LCZ 6 (primeiro cenário): vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.	114
Figura 76: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 com vegetação. Fonte: Autor.....	114
Figura 77: Modelo de quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário): Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.	114
Figura 78: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário) com vegetação. Fonte: Autor.....	115
Figura 79: Modelo de quadras 3x3 LCZ 8: Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.....	115
Figura 80: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 8 com vegetação. Fonte: Autor.....	115
Figura 81: Configuração de cálculo de PET no Bio-met. Fonte: Autor.	119
Figura 82: Temperatura do ar para cada LCZ, com e sem vegetação, no cenário climático atual.....	122
Figura 83: Diferença de temperatura do ar a 1,5m de altura entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação, no cenário climático atual. Fonte: Autor.	123
Figura 84: Diferença de temperatura do ar a 1,5m de altura entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação cenário no cenário climático atual. Fonte: Autor.	124
Figura 85: Diferença de temperatura do ar dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	124
Figura 86: TRM para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).....	125
Figura 87: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	126
Figura 88: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	126
Figura 89: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 6 com vegetação e o cenário LCZ 3 sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.	127
Figura 90: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).	128
Figura 91: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	128
Figura 92: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	129
Figura 93: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.	129
Figura 94: PET para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).	130
Figura 95: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).	131
Figura 96: Diferença de PET entre o cenário LCZ 3 com vegetação e o cenário LCZ 3 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.	131

Figura 97: Diferença de PET entre o cenário LCZ 6 com vegetação e o cenário LCZ 6 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.	132
Figura 98: Diferença de PET entre o cenário LCZ 6 com vegetação e o cenário LCZ 6 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.	132
Figura 99: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).	134
Figura 100: Modelos 3D da temperatura das folhas nos cenários LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 ..	134
Figura 101: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.	135
Figura 102: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).	135
Figura 103: Temperatura do ar para cada LCZ com e sem vegetação na projeção de clima futuro, RCP 8.5 ,dezembro (2079-2099). Fonte Autor.	137
Figura 104: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	137
Figura 105: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	138
Figura 106: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	138
Figura 107: TRM para cada LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.	139
Figura 108: Diferença de TRM entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	140
Figura 109: Diferença de TRM entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	140
Figura 110: Diferença de TRM entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	141
Figura 111: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.	142
Figura 112: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	143
Figura 113: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 6 com vegetação e o cenário sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	143
Figura 114: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 8 (com vegetação) e o cenário LCZ 8 (sem vegetação) -Projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	144
Figura 115: PET para as tipologias LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099). Fonte: Autor.	144
Figura 116: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.	145
Figura 117: Diferença de PET entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	146
Figura 118: Diferença de PET entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	146
Figura 119: Diferença de PET entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.	147

Figura 120: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.....	148
Figura 121: Temperatura das folhas dentro das LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 às 17 horas dentro do cenário climático de dezembro (2079-2099).....	148
Figura 122: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.....	149
Figura 123: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.	149
Figura 124: Temperatura do ar para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.	150
Figura 125: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	151
Figura 126: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	151
Figura 127: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	152
Figura 128: TRM para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.	153
Figura 129: Diferença de TRM entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	154
Figura 130: Diferença de TRM entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	154
Figura 131: Diferença de TRM entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	155
Figura 132: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.	156
Figura 133: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 3 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	156
Figura 134: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 6 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	157
Figura 135: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 8 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.	157
Figura 136: PET para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.....	158
Figura 137: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.....	159
Figura 138: Diferença de PET entre LCZ 3 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.....	159
Figura 139: Diferença de PET entre LCZ 6 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.....	160
Figura 140: Diferença de PET entre LCZ 8 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.....	160
Figura 141: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.	162
Figura 142: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.....	163

Figura 143: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.	163
Figura 144: Temperatura da folha dentro das tipologias LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 dentro do período das 17 horas dentro do cenário climático de 23.11.2099.	164
Figura 145: Situações de copa e isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário). Fonte: Autor.	165
Figura 146: Temperatura do ar para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	165
Figura 147: Diferença de temperatura do ar para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	166
Figura 148: Diferença de TRM para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	167
Figura 149: Diferença de TRM para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	167
Figura 150: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	168
Figura 151: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	168
Figura 152: PET para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	169
Figura 153: TEP para LCZ 6 com LAD 1 e LAD 0,3.	169
Figura 154: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.	170

Resumo

YOSHIDA, D. F. O. **Infraestrutura verde: efeitos microclimáticos para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano**. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022).

As mudanças climáticas são acompanhadas pelo aumento das temperaturas e pelo aumento da frequência e da intensidade das ondas de calor, fenômenos estes que são amplificados nas áreas urbanas. Devido ao potencial microclimático da infraestrutura verde, ela se torna uma importante estratégia para adaptação à mudança do clima nas cidades. Sendo assim, esta pesquisa quantifica os efeitos da infraestrutura verde no microclima urbano nas condições climáticas atuais e nas projeções climáticas futuras na cidade de São Paulo, respondendo às seguintes perguntas: 1) Tomando como base o contexto urbano e climático da cidade de São Paulo, quais são os efeitos microclimáticos e de conforto térmico da infraestrutura verde na cidade, no clima atual e futuro? 2) Como a infraestrutura verde reagirá frente ao aumento das temperaturas, do ponto de vista da saúde das plantas, e quais os impactos nos efeitos microclimáticos das mesmas? Para tanto, este trabalho utiliza a classificação Local Climate Zones - LCZ para a morfologia urbana, alguns parâmetros microclimáticos e de vegetação coletados em campo, as projeções climáticas futuras do IPCC AR5 / RCP 8.5 da plataforma PROJETA/INPE e o modelo microclimático de alta resolução ENVI-met V5, para simular os efeitos microclimáticos da vegetação em diferentes cenários e, também, a vitalidade das plantas. O tipo de infraestrutura verde utilizada nas simulações é arborização viária. De maneira geral, para as LCZ 3, 6 e 8, as mais comumente encontradas em São Paulo, nos horários mais quentes do dia a vegetação reduziu a temperatura do ar em até 0,72°C no clima atual, até 0,5°C no clima futuro 2079-2099, com praticamente nenhuma redução no dia de calor mais extremo, em novembro de 2099. Ao mesmo tempo, a vegetação reduziu a temperatura radiante média em até 14°C no clima atual e até 8°C nas projeções climáticas futuras; a temperatura de superfície também foi reduzida em até 14°C no clima atual e até 13°C nas projeções futuras. Em todas as simulações os índices de conforto PET e TEP atingem níveis de desconforto térmico de calor e muito calor, podendo atingir sensações térmicas muito altas, 60°C para PET e próximo disso em TEP, no pior cenário climático. No entanto, a presença da vegetação nas simulações reduziu os valores PET e TEP, em média, em 5 °C no clima atual, em 4,5°C no clima futuro 2079-2099 e em 2,5°C no dia de calor mais extremo, em novembro de 2099. Houve mudança de sensação térmica de muito calor para calor dentro de TEP com a presença da vegetação no cenário atual. Como um indicador da saúde das plantas frente ao aquecimento urbano, a temperatura da folha, em média, atingiu 28°C no clima atual, 31°C no clima futuro 2079-2099 e até 48°C no dia de calor mais extremo, sugerindo, neste último caso, a cessação da evapotranspiração e o risco de danos irreversíveis à vegetação. Frente aos resultados, fica evidente que a vegetação reduz o aquecimento e melhora a sensação de conforto térmico urbano, principalmente diurno; no entanto, há limitações nos efeitos microclimáticos da vegetação, principalmente quando esta é submetida a altas temperaturas.

Palavras-chave: Infraestrutura verde. Conforto térmico em espaços abertos, Saúde da vegetação. ENVI-met.

Abstract

YOSHIDA, D. F. O. **Green infrastructure: microclimatic effects for climate change adaptation and plant health in an urban warming scenario**. 2022. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022).

Climate change is accompanied by rising temperatures and increasing frequency and intensity of heat waves, phenomena that are amplified in urban areas. Due to the microclimatic potential of green infrastructure, it becomes an important strategy for climate change adaptation in cities. Therefore, this research quantifies the effects of green infrastructure on urban microclimate under current climate conditions and future climate projections in the city of São Paulo, answering the following questions: 1) Based on the urban and climate context of the city of São Paulo, what are the microclimatic effects of green infrastructure in the city, under current and future climate? 2) How will green infrastructure react to increasing temperatures, from the point of view of plant health, and what are the impacts on their microclimatic effects? To this end, this work uses the Local Climate Zones - LCZ classification for urban morphology, some microclimatic and vegetation parameters collected in the field, the future climate projections of IPCC AR5 / RCP 8.5 of the PROJETA/INPE platform and the high-resolution microclimate model ENVI-met V5, to simulate the microclimatic effects of vegetation in different scenarios and also the vitality of plants. The green infrastructure utilized in the simulations are street trees. Overall, for LCZ 3, 6 and 8, the most commonly found in São Paulo, at the hottest times of the day vegetation reduced air temperature by up to 0.72°C in the current climate, up to 0.5°C in the future climate 2079-2099, with virtually no reduction on the most extreme heat day in November 2099. At the same time, vegetation reduced the mean radiant temperature by up to 14°C in the current climate and up to 8°C in future climate projections; surface temperature was also reduced by up to 14°C in the current climate and up to 13°C in future projections. In all simulations the comfort indices PET and TEP reach thermal discomfort levels of warm and very warm, and can reach very high thermal sensations, 60°C for PET and close to that in TEP, within the worst-case climate scenario. However, the presence of vegetation in the simulations reduced the PET and TEP values, on average, by 5°C in the current climate, by 4.5°C in the future climate 2079-2099, and by 2.5°C on the most extreme heat day in November 2099. There was a change in thermal sensation from very hot to hot within TEP with the presence of vegetation in the current scenario. As an indicator of plant health in the face of urban warming, leaf temperature averaged 28°C in the current climate, 31°C in the future climate 2079-2099, and up to 48°C on the most extreme heat day, suggesting, in the latter case, cessation of evapotranspiration and the risk of irreversible damage to vegetation. In view of the results, it is evident that vegetation reduces heating and improves the feeling of urban thermal comfort, especially diurnal; however, there are limitations on the microclimatic effects of vegetation, especially when it is subjected to high temperatures.

Keywords: Green infrastructure. Thermal comfort in open spaces. Vegetation health. ENVI-met.

1. Introdução e Justificativa da Pesquisa

Globalmente, as manchas urbanas consomem cerca de $\frac{2}{3}$ da energia total produzida; somadas, elas ocupam uma pequena parcela da superfície total terrestre e são os territórios responsáveis por cerca de 70% da emissão antrópica dos gases de efeito estufa. Essa emissão de gases se dá pelo consumo energético dos edifícios, transporte motorizado e indústrias, os quais são normalmente abastecidos por fontes energéticas não renováveis (C40, 2018; UN-HABITAT, 2020).

As cidades desempenham um importante papel tanto na mitigação quanto na adaptação às mudanças climáticas. Além de serem grandes emissoras de gases de efeito estufa, durante mais de um século, têm continuamente expandido seus limites e sua população. Em 2007, pela primeira vez, a população mundial urbana superou em números a população rural. Assim, espera-se que em 2050 cerca de 68% da população mundial irá residir em áreas urbanas (UN, 2018). De acordo com o C40 Cities (2018) e a UCCRN (2018), a cada ano, cerca de 67 milhões de pessoas passam a residir em áreas urbanas. Nesse contexto de rápida urbanização mundial, a Ásia e África atualmente apresentam altas taxas de urbanização; nesse ritmo, espera-se que nas próximas décadas os maiores centros urbanos do planeta estejam situados nesses continentes. A respeito da América Latina e do Caribe, juntas vão ser a segunda região mais urbanizada com cerca de 81% das pessoas vivendo em cidades. Dentro do contexto brasileiro, atualmente cerca de 84,4% da população brasileira vive em cidades e se prevê-se para o período de 2050, cerca de 90% da população irá residir em cidades (IBGE, 2010).

As cidades têm se expandido rapidamente de maneira horizontal e dispersa. Segundo a WMO (2019), a extensão física das áreas urbanas está se expandindo de maneira mais acelerada que o próprio crescimento populacional, tendo implicações no consumo de energia e emissão de gases de efeito estufa, nas mudanças climáticas e nos sistemas naturais. Entre 1990 a 2015, uma série de cidades de países desenvolvidos aumentaram sua área urbana em 1,8%, enquanto sua população cresceu cerca de 1,2%. A razão da expansão de área urbana em relação ao crescimento populacional cresceu para 1,5%.

Nesse sentido, os efeitos das mudanças climáticas sobre as cidades geram grande preocupação, pois as alterações no ambiente causadas pela expansão urbana agravam uma série de riscos tais como o estresse térmico por calor, seca, tempestades, precipitação extrema, inundações, deslizamentos de terra, escassez de água, poluição do ar e aumento do nível do mar (IPCC, 2021). Dentro desse quadro de aumento de eventos extremos e

desastres, as populações mais pobres serão os grupos mais vulneráveis a esses impactos gerados pelas mudanças climáticas (IPCC, 2018; PBMC, 2016).

O fato é que as cidades são particularmente ameaçadas pelas mudanças climáticas devido a fatores que incluem a grande dependência da interconexão de sua infraestrutura em rede, alta densidade populacional, pobreza, concentração de idosos, concentração de culturas e concentração de materiais de construção urbanos. Além disso, os processos sociais, econômicos e políticos como estruturas deficientes de governança ou desenho urbano socialmente desigual, são aspectos que amplificam os riscos trazidos pelas mudanças climáticas nas áreas urbanas (CARTER et al., 2015).

Os eventos extremos de temperatura sobrecarregam o corpo humano prejudicando principalmente o sistema cardiovascular e respiratório, especialmente para as pessoas mais fragilizadas como idosos, gestantes, crianças até 4 anos e obesos. As altas temperaturas, além dos efeitos na termorregulação, podem aumentar a concentração de ozônio e outros poluentes que exacerbam as doenças cardiovasculares e respiratórias, as quais, às vezes, podem resultar em morte, conforme a *World Health Organization* - WHO (2018).

As mortes e hospitalizações causadas pelo calor podem ocorrer de forma extremamente rápida, no mesmo dia, ou ter um efeito retardado, de vários dias, e resultar em morte ou morte acelerada nos mais fragilizados. Isso é particularmente observado nos primeiros dias de ondas de calor. Mesmo pequenas diferenças em relação às temperaturas médias sazonais estão associadas ao aumento da doença e da morte. Os extremos de temperatura também podem agravar as condições crônicas, incluindo doenças cardiovasculares, respiratórias e cerebrovasculares, além de doenças relacionadas com o diabetes (WHO, 2018).

De acordo com Kovats e Hajat (2008), altas temperaturas provocam síndromes clínicas de insolação, exaustão pelo calor, câibras causadas pelo calor e desmaios. A insolação severa ocorre quando o centro do corpo excede os 103 F (39°C) e traz múltiplas disfunções de órgãos. A insolação possui taxa de mortalidade substancial e a progressão para a morte pode ser bastante rápida. Sobreviventes do sobreaquecimento podem sofrer danos permanentes ao seu sistema de órgãos, podendo ter comprometimento funcional e falecimento precoce.

Como uma das principais estratégias de adaptação aos diferentes fenômenos de aquecimento urbano, a inclusão da vegetação desempenha um importante papel no microclima devido às suas propriedades no balanço de energia; dependendo do processo de evapotranspiração e das condições climáticas locais, a cobertura vegetal e as superfícies com água reduzem os picos de temperatura durante o dia. Dessa maneira, o processo de

evapotranspiração está relacionado à perda associada de água, que ocorre tanto na evaporação a partir da superfície do solo, como também pelo metabolismo das plantas por meio da transpiração estomática e cuticular da planta.

A evapotranspiração “rouba” o calor do ambiente e depende das condições de umidade do solo como também da luz solar, pois o processo está ligado à abertura dos estômatos nas folhas (OKE, 1978). A vegetação ameniza o aquecimento urbano não por resfriar o ar, mas por se aquecer menos do que as superfícies inertes. As árvores podem provocar uma diminuição da temperatura do ar, devido ao efeito combinado de sombreamento e evapotranspiração. Normalmente, as reduções da temperatura do ar variam de 1°C a 3°C e podem ser alcançadas abaixo do dossel das áreas verdes, dependendo das condições climáticas e do solo (DUARTE, 2015).

A maior diminuição da temperatura do ar pode ser explicada quando ocorre um maior resfriamento pela evapotranspiração, devido às condições climáticas mais secas do entorno (DUARTE, 2015). Alguns dos efeitos gerados pela vegetação são: (1) a redução das trocas de ondas longas dos edifícios; (2) redução da temperatura de bulbo seco por meio dos processos de evapotranspiração; (3) o resfriamento latente é aumentado devido à adição de umidade no ar por meio da transpiração (NG, 2012).

Os espaços urbanos verdes, portanto, são considerados uma maneira apropriada para reduzir o aquecimento urbano e promover melhores condições de conforto para seus habitantes. Além de resfriar o espaço ocupado, os espaços verdes têm a capacidade de influenciar as áreas de seu entorno (ARAM et al., 2019).

Além dos inúmeros estudos, em diferentes climas, descrevendo e quantificando os efeitos microclimáticos da vegetação, mais recentemente foram realizados estudos de avaliação da saúde das árvores urbanas sob condições de calor extremo (EPPEL et al., 2012; GILLNER et al., 2013, 2016; MOORE, 2013; SAVI et al., 2015). Estes estudos concluem que as espécies arbóreas urbanas comuns nas zonas temperadas (tais como carvalhos, tília, áceres e plátanos) já se encontram sob estresse hídrico e térmico e os efeitos das mudanças climáticas podem trazer situações ainda mais alarmantes para espécies arbóreas urbanas comuns e que, futuramente, poderão não ser capazes de tolerar condições climáticas mais extremas (EPPEL et al., 2012; SAVI et al., 2015). As árvores urbanas têm que lidar com uma série de estresses adicionais que não existem nas florestas. As condições ambientais na cidade são, de maneira geral, mais extremas, mais perigosas e podem causar perda de vitalidade e aumento da mortalidade dos indivíduos arbóreos (GILLNER et al, 2014).

Além do ambiente construído ser hostil ao desenvolvimento vegetal, segundo ROLOFF et al. (2019), as árvores das cidades sofrem estresse térmico e o regime de umidade urbana frequentemente se aproxima das condições de secas. O oposto também ocorre com as enchentes urbanas e as chuvas urbanas induzidas pelas próprias cidades¹ (SHEPHERD, 2006). Esses são dois fatores importantes e necessários para entender os efeitos microclimáticos das árvores urbanas dentro de um período de tempo de longo termo (ORDONEZ, 2015).

O avanço significativo dos recursos computacionais nas últimas décadas tem dado condições para a aplicação de simulações numéricas envolvendo modelos baseados na mecânica de fluidos e modelos térmicos de balanço de energia (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010). A demanda por esses modelos se deve às complexas interações entre o tecido urbano e parâmetros climáticos locais, em princípio, a radiação solar (direta e difusa), o fluxo de ar e a transferência de calor entre as superfícies urbanas e o ar (TSOKA et al., 2018).

Dentre os mais utilizados, o ENVI-met é um modelo holístico tridimensional capaz de simular o microclima em alta resolução, sendo uma ferramenta de pesquisa para analisar infraestruturas verdes e azuis, como os corpos d'água (LIU et al, 2021). O ponto chave para o uso do ENVI-met na análise do efeito da vegetação é o fato dele utilizar um sofisticado modelo de cálculo para simular o comportamento dos estômatos na superfície da folha como resposta ao microclima, a partir da quantidade de CO₂ e nível de estresse hídrico (ENVI-MET, 2019). A condutância estomática é utilizada para estimar o comportamento de folhas individuais, levando em consideração as condições microclimáticas da planta como um todo. A principal base do modelo é que as plantas operam sua condutância estomatal de forma a maximizar os ganhos de CO₂ associados à mínima perda de água (JACOBS, 1994). De maneira empírica, a condutância estomática, relacionada à perda de água, está relacionada com o processo de fotossíntese, ou seja, a absorção de CO₂ (SIMON, 2018).

Recentemente, foi implementado no ENVI-met o módulo *3D vegetation*, dando ao modelo a capacidade de digitalizar uma árvore por inteiro (copa e raízes) por meio do LAD (Leaf Area Density) e RAD (Root Area Density). Esse recurso aprimorou o detalhamento para o processo de cálculo do efeito microclimático das árvores como um todo, tornando a *3D vegetation*, um organismo completo (LIU et al., 2021). Por esse motivo, o ENVI-met é capaz de analisar não só o efeito da vegetação no ambiente, mas também, no sentido inverso, o impacto do ambiente na vegetação (SIMON, 2016). Assim, por meio das simulações é possível levantar

¹ Chuvas que ocorrem pois são induzidas artificialmente, no caso, segundo Shephard (2006), as cidades podem influenciar as chuvas.

dados referentes à saúde da planta com dados de temperatura das folhas (SIMON et al., 2018).

1.1 Objeto

O objeto deste trabalho é o efeito microclimático da infraestrutura verde para adaptação à mudança do clima e a saúde das plantas em um cenário de aquecimento urbano.

1.2 Objetivos

Com base na literatura e partindo-se da premissa que a vegetação é uma estratégia importante para a adaptação à mudança do clima, esta pesquisa tem por objetivo quantificar os efeitos da infraestrutura verde no microclima urbano, nas condições climáticas atuais e nas projeções climáticas futuras na cidade de São Paulo, respondendo às seguintes perguntas: 1) Tomando como base o contexto urbano e climático da cidade de São Paulo, quais são os efeitos microclimáticos e de conforto térmico da infraestrutura verde na cidade, no clima atual e futuro? 2) Como a infraestrutura verde irá reagir frente ao aumento das temperaturas, do ponto de vista da saúde das plantas, e quais os impactos nos efeitos microclimáticos das mesmas?

1.3 Descrição dos capítulos

- Capítulo 1: Introduzir o tema da pesquisa, apresentar o objeto e objetivos de pesquisa
- Capítulo 2: Levantar as principais questões da literatura a respeito do clima urbano, modelos matemáticos relacionados ao tema, conforto térmico em espaços abertos, o papel da vegetação no microclima urbano e a saúde das plantas.
- Capítulo 3: Levantar as principais questões a respeito das mudanças climáticas, projeções climáticas, o papel das cidades e seus efeitos na saúde das pessoas.
- Capítulo 4: Apresentar o modelo computacional utilizado nesta pesquisa, o ENVI-met e descrever seus principais recursos e funcionalidade.
- Capítulo 5: Descrever toda metodologia utilizada nesta pesquisa.
- Capítulo 6: Apresentar e analisar os resultados gerados pelas simulações do ENVI-met.
- Capítulo 7: Etapa final de considerações finais e conclusões.

2. Clima urbano, a influência da vegetação microclima urbano e sua saúde.

2.1 Interações entre o clima urbano e o ambiente construído

O ambiente urbano é composto por um amálgama de infraestruturas cinzas (áreas residenciais, edifícios industriais, ruas, utilidades e estacionamentos), azuis (corpos de água, lagos, rios, reservatórios e canais) e verdes (árvores, arbustos, grama e espaços verdes em ruas), onde todos interagem com as condições climáticas para determinar o microclima local e as condições de conforto térmico humano. A maior parte das cidades adensadas se tornaram uma selva de concreto deficiente de recursos ecossistêmicos devido ao rápido crescimento populacional que resulta em crescimento da infraestrutura cinza sem precedentes em detrimento das infraestruturas azuis e verdes, especialmente as árvores (MORAKINYO et al., 2020).

O clima urbano é caracterizado por múltiplas interações entre a morfologia urbana (dimensões dos edifícios, espaços entre eles, largura das ruas e o espaçamento desses elementos), a cobertura do solo urbano (construído, pavimentado, vegetação, solo exposto e água), o tecido urbano propriamente dito (construções e elementos naturais) e, por fim, o metabolismo urbano (calor, água, poluentes advindos das diferentes atividades humanas) (OKE et al, 2017).

O termo canyon urbano é largamente utilizado dentro dos modelos microclimáticos como uma estrutura que se repete na Urban Canopy Layer - UCL e é afetado diretamente pelo balanço de radiação. O canyon é o espaço tridimensional conformado pela rua e pelos edifícios lindeiros à via. Os canyons urbanos restringem a visão da abóbada celeste, caracterizada pelo fator de visão de céu, causam múltiplas reflexões da radiação solar e geralmente restringem o movimento do ar. Nesse sentido, diversos estudos têm mostrado uma relação linear entre a morfologia urbana (SVF) e o microclima urbano, ilha de calor urbana noturna e os efeitos no conforto térmico (OKE et al, 2017).

Na estrutura do canyon, a radiação solar é absorvida e transformada em calor sensível, atingindo principalmente as coberturas e as superfícies verticais dos edifícios. Paredes, coberturas e solo emitem radiação de onda longa para o fundo do céu, e a intensidade depende do fator de visão do céu (OKE et al, 2017).

As temperaturas superficiais no canyon são determinadas pelo balanço térmico; as superfícies absorvem radiação de onda curta em função do albedo e de sua exposição à radiação solar; as mesmas superfícies absorvem e emitem radiação de onda longa em função da temperatura, da emissividade e do fator de visão de céu. Ao final, a temperatura do ar no canyon é influenciada pela temperatura das superfícies do canyon, porque a energia também é transferida por processos convectivos (OKE et al, 2017).

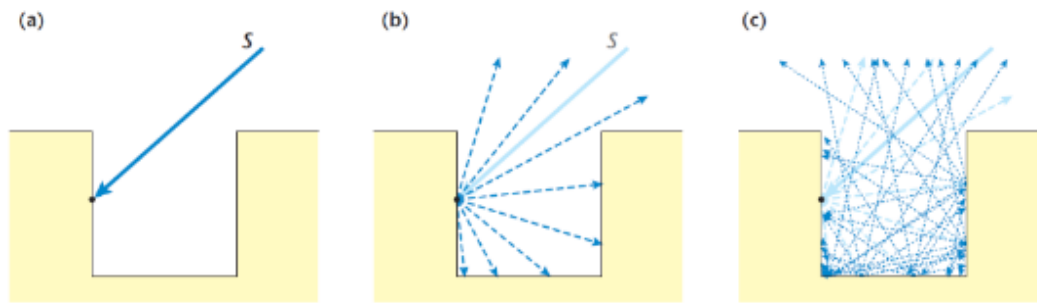


Figura 1: Simplificação ilustrada do impacto da geometria do canyon urbano nas trocas de radiação: (a) A recepção de irradiação direta através do topo do canyon, (b) primeira reflexão das facetas do canyon, (c) segunda reflexão. Obs: a entrada e a reflexão da radiação difusa do céu não são retratadas. Fonte: OKE et al (2017).

De acordo com OKE et al (2017), o saldo líquido entre ganhos solares e perda de calor devido à emissão de radiação de ondas longas determinam o balanço térmico de áreas urbanas. Como a perda de calor radiante é mais lenta em áreas urbanizadas, o balanço líquido é maior do que nos arredores e, portanto, as temperaturas são mais altas; diversos trabalhos estabeleceram correlação entre temperaturas do ar e fator de visão de céu sob condições atmosféricas estáveis, com baixa velocidade do vento.

Os materiais usados nas superfícies das edificações e nas estruturas urbanas têm um papel importante no balanço térmico urbano. Eles absorvem radiação de onda curta e radiação infravermelha e dissipam parte do calor acumulado por meio de processos convectivos e radiativos para a atmosfera, aumentando a temperatura do ar. Além do mais, as características físicas dos materiais construtivos influenciam o grau de consumo energético e condições de conforto de cada edifício como também dos espaços abertos (SANTAMOURIS et al, 2011).

O desenho urbano também influencia a ventilação de áreas adensadas, bloqueando ou canalizando a passagem de ventos e também aumentando ou diminuindo a velocidade destes. Portanto, edificações com diferentes alturas, aberturas ao longo da altura, espaços entre os embasamentos dos edifícios e nos embasamentos propriamente ditos, além de implantações

não alinhadas contribuem para a ventilação urbana e melhoria da sensação térmica em climas tropicais (NG, 2016).

Uma variável importante para o microclima exterior (mas que afeta e muito as condições internas dos edifícios também) é a temperatura das superfícies (fachadas, coberturas, pisos e demais superfícies urbanas). Ela é resultado de uma série de processos tais como trocas radiativas, armazenamento de calor nos materiais e componentes construtivos, evaporação (se houver) e fluxos de calor turbulentos. Observações da temperatura de superfície podem revelar uma série de informações úteis para os estudos de clima urbano. No entanto, a complexidade das superfícies urbanas leva a uma dificuldade de obtenção de medidas representativas por causa do grande número de superfícies a serem levantadas. Esse levantamento passa a ser viável com o uso de sensoriamento remoto, em instrumentos portáteis a partir do nível do solo ou do topo de edifícios altos, acoplados a aviões ou satélites, com as correções necessárias em função de efeitos atmosféricos na transmissão de radiação para o instrumento e na refletividade da superfície à radiação (VOOGT, OKE, 2003),

2.2 Balanço de energia no meio urbano

Pela equação do balanço energético de uma superfície terrestre e não urbana a radiação líquida (Q^*) é definida, pela densidade do fluxo térmico terrestre, que transfere calor sensível por condução para o substrato (Q_G) e pelas duas densidades turbulentas de fluxo térmico que trocam energia entre a superfície e a atmosfera - a densidade sensível do fluxo térmico (Q_H) e a densidade do fluxo térmico latente (Q_E). Pela conservação de energia, esses fluxos devem equilibrar-se em uma superfície:

$$Q^* = Q_H + Q_E + Q_G \quad (1)$$

- Q^* : Radiação líquida.
- Q_G : Calor sensível na condução para o solo.
- Q_H : Fluxo de calor sensível.
- Q_E : Fluxo de calor latente.

Segundo OKE et al (2017), o balanço energético de um volume urbano não é simplesmente a soma dos balanços energéticos das facetas constituintes, cada uma das quais ligada separadamente à atmosfera. As facetas são também acopladas por meio de radiação, vento e turbulência umas às outras, o que cria *feedback*, altera o seu equilíbrio energético e pode levar a alterações internas no conteúdo energético de todo o volume, por exemplo, devido ao aquecimento ou arrefecimento de materiais, ar, etc.

Para OKE et al, (2017), esse entendimento é crucial para o desenvolvimento de modelos numéricos do balanço energético da superfície urbana. A formulação para um tal balanço energético de volume, que representa a resposta de todo o ecossistema urbano, tem de prever três novas realidades: primeiro, é necessário acrescentar novas fontes e sumidouros dentro do volume; segundo, a troca de energia pode ocorrer em qualquer ou todos os lados do volume, e não apenas no topo; e, terceiro, diferentes facetas precisam interagir. Ao considerar um estudo em 3D, há a complicação gradual a fórmula de conservação de energia, mas, na prática, pode ser tornar mais adequado através da definição de um volume conceitual, que integra todo o ecossistema urbano. É preciso atribuir valores de volume às fontes de calor dentro do volume, incluindo a sua variação temporal, se conhecida, e dar ao volume profundidade suficiente no solo para que a densidade do fluxo de calor vertical por condução através do fundo seja negligenciável durante o período de interesse (este será mais profundo durante períodos mais longos) (OKE et al, 2017). O equilíbrio para um tal volume pode ser escrito:

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \text{ (W m}^{-2}\text{)} \quad (2)$$

Equação do balanço energético superficial no meio urbano. Fonte: OKE et al (2017).

- Q^* : Fluxo de toda radiação terrestre.
- QF : Fluxo de calor antropogênico
- QG : Calor sensível na condução para o solo.
- QH : Fluxo de calor sensível.
- QE : Fluxo de calor latente.
- ΔQS : Fluxo de calor acumulado por todo tecido urbano (ambiente construído, árvores e ar contido no local).
- ΔQA : Fluxo de energia adicionado ou subtraído no volume levado pelo vento.

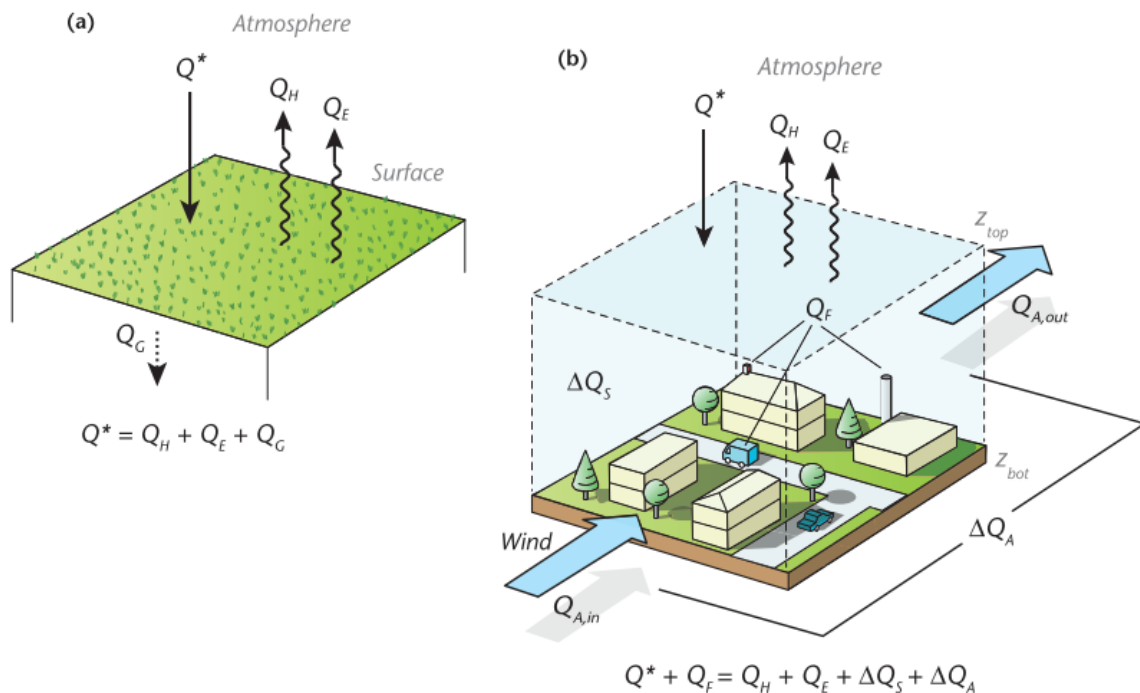


Figura 2: esquema dos fluxos de Balanço Energético da Superfície no ambiente rural (a) e no ambiente urbano (b). O volume que se estende do topo da RSL (roughness sublayer) para baixo, onde não há fluxo de condução dentro do período de interesse. As flechas estão desenhadas na direção correspondente ao fluxo é considerado positivo. Fonte: Oke et al (2017)

2.3 O clima urbano e a vegetação

Como consequência da urbanização, um dos principais efeitos microclimáticos é a alteração nas temperaturas do ar e das superfícies que afetam significativamente o microclima urbano, com maior armazenamento de calor nas superfícies inertes (coberturas, fachadas, pavimentos), maior liberação de calor antropogênico, com consequente aumento no consumo de energia nos edifícios, na poluição atmosférica e no desconforto térmico humano (VOOGT; OKE, 2017).

Em um solo sem vegetação, o tempo de residência de uma molécula de água na superfície pode ser da ordem de minutos ou dias. Ainda que a água não entre diretamente na árvore, ao penetrar o solo em seu entorno, a temperatura menor na superfície fará com que o tempo de residência da água aumente significativamente. A molécula de água, quando é absorvida pela raiz da árvore, seguirá um caminho mais longo por entre as células e tecidos da planta até voltar à atmosfera por meio de um estômato aberto. Portanto, até que tudo isso aconteça, a molécula de água poderá ficar dias ou até semanas dentro da planta antes de sair para a atmosfera. Diversas moléculas de água ficarão presas no corpo da planta ao longo de sua

vida, caso sejam utilizadas para formar as ligações entre açúcares, como a celulose. Esse fenômeno ilustra a importância da água como meio fundamental para o sequestro de carbono pelas plantas. Pode-se dizer ainda que há também um "sequestro de água", pois se considerarmos que o teor de água nas plantas corresponde a mais de 90% de sua massa, há um enorme e constante estoque de água nos corpos das árvores (BUCKERIDGE, 2015).

Segundo SANTAMOURIS et al (2017), o potencial em reduzir a temperatura do ar causada pela adição de árvores ou outros tipos de infraestruturas verdes depende altamente da densidade e das propriedades da vegetação, das características térmicas da área urbanizada e das condições climáticas locais.

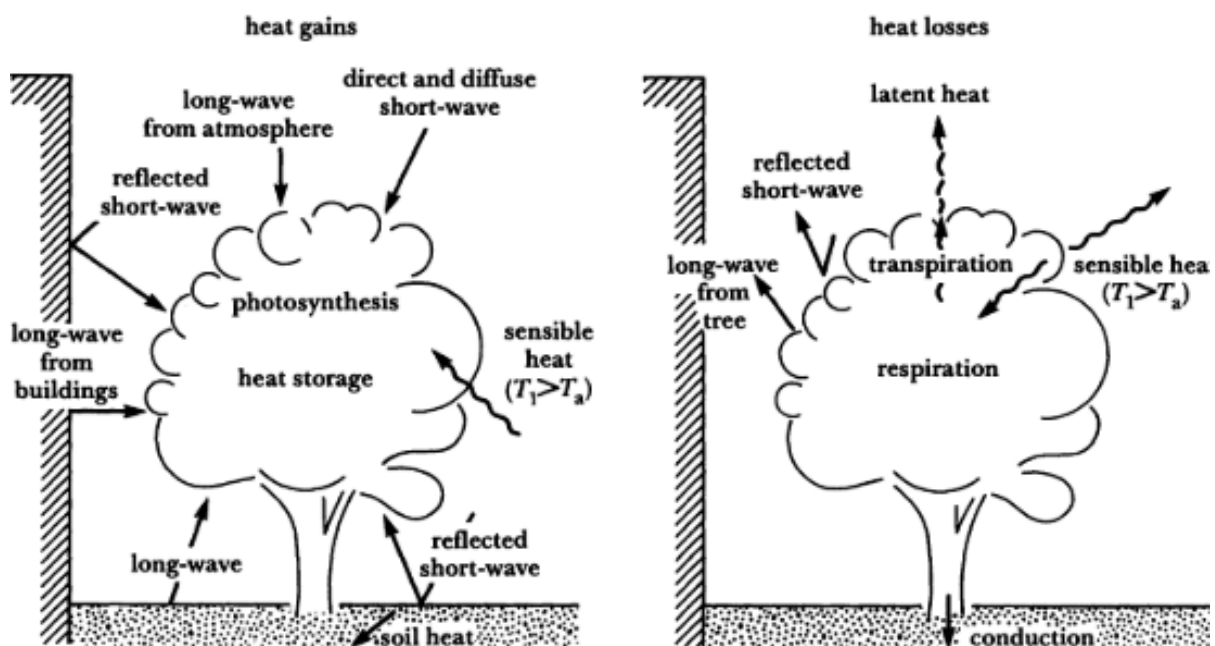


Figura 3: Esquema das trocas de energia entre uma árvore isolada e o canyon urbano. Fonte: OKE (1983).

2.4 Balanço de energia da vegetação

Segundo Oke (1978) a equação que define o balanço de energia da vegetação é:

$$Q^* + QH + QE + \Delta QS + \Delta QP \quad (3)$$

Q^* = Fluxo de calor sensível

QE = Fluxo de calor latente

ΔQS = Taxa líquida do calor físico armazenado pelas substâncias do sistema

ΔQP = Taxa líquida de calor bioquímico armazenado

A taxa de calor físico armazenado (ΔQS) altera os valores de absorção e emissão de calor pelo ar, solo e planta (folhas, galhos, tronco). A taxa de calor bioquímico armazenado (ΔQP) ocorre através do processo de fotossíntese, alterando os valores de acordo com a taxa de CO_2 assimilado pela vegetação.

Dependendo da natureza do ambiente de entorno pode-se adicionar o termo de advecção ΔQA^2 sobre a ação dos ventos, que considera a energia de ganhos e perdas pelo transporte horizontal do calor sensível e latente. Além do balanço de energia é importante considerar o balanço hídrico.

Uma vez que o armazenamento de água ocorre, em 80% dos casos, na camada onde se situa o sistema radicular da planta, a drenagem profunda é contabilizada como excesso e não precisa ser considerada. Oke (1978) descreve de forma mais simplificada o balanço hídrico a partir da equação do balanço de energia para a vegetação:

$$p = E + \Delta r + \Delta s \quad (4)$$

p = Balanço hídrico

E = Evapotranspiração

Δr = Deflúvio superficial

Δs = Água total armazenada no ar (umidade), planta (interceptação das chuvas pela vegetação) e solo.

² Termo de advecção é o transporte de uma substância ou de calor através de um fluxo. Nesse caso, o vento.

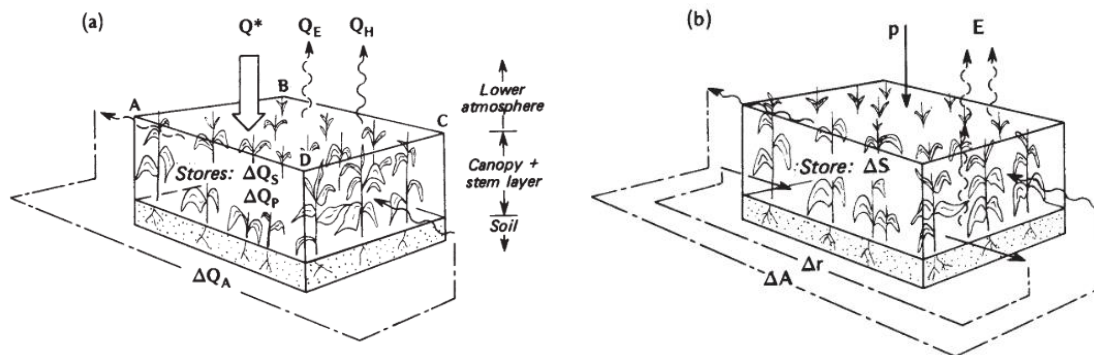


Figura 4: Representação esquemática dos fluxos envolvidos em (a) energia e (b) balanços hídricos de um volume solo-planta-ar. Fonte: OKE (1987).

2.5 Balanço de Energia na Folha

A equação que define o balanço de energia da folha está descrita abaixo:

$$Q * leaf = \quad (5)$$

$$Q * leaf = QH(leaf) + QE(leaf) \quad (6)$$

QH(f) = Fluxo de Calor Sensível (parte superior da folha)

QH(b) = Fluxo de Calor Sensível (parte inferior da folha)

QE(f) = Fluxo de Calor Latente (parte superior da folha)

QE(b) - Fluxo de Calor Latente (parte inferior da folha)

A taxa líquida de calor armazenado (ΔQS) e a taxa líquida de calor bioquímico armazenado (ΔQP) não são consideradas nessa equação, pois apresentam valores pequenos³ em relação ao total da radiação.

A transferência de calor sensível tem a seguinte equação:

$$QH = Ca(-Ta)/Tb \quad (7)$$

QH = Fluxo de Calor Sensível (parte superior da folha)

Ca= Capacidade térmica do ar

³ 6W/m² (Monteith, 1973), 16W/m² (Oke, 1987).

To = Temperatura da superfície da folha

Ta = Temperatura do ar

rb = resistência do Laminar Boundary Layer (Camada Limite Laminar)

O Camada Limite Laminar é uma camada logo acima da folha que exerce resistência para a ação do vento. O rb (resistência do Laminar Boundary Layer) pode aumentar de acordo com o tamanho da folha já que a Camada Limite Laminar aumenta de acordo com a distância, vento e a redução da diferença entre a temperatura do ar e a temperatura de superfície da folha.

A evaporação também colabora na redução das cargas de calor, sendo um fenômeno físico de mudança da fase líquida para o vapor de água presente nas condições naturais, necessitando de uma energia equivalente a 590 calorias para cada grama de água pura, quando está se encontra na condição de zero graus centígrados e uma atmosfera de pressão. A fonte quase exclusiva da energia consumida na evaporação natural da água é a radiação solar (OMETO, 1981).

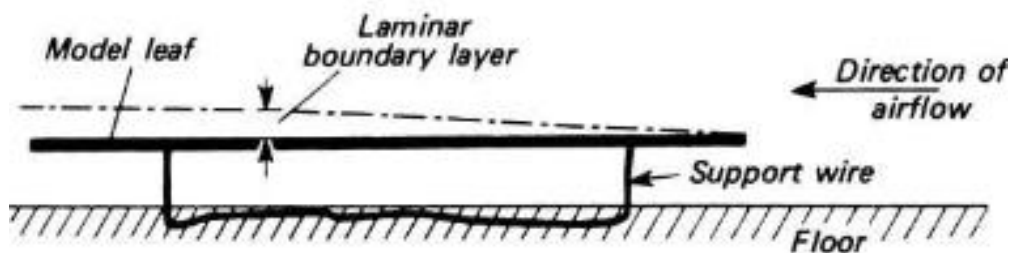


Figura 5: Esquema da camada limite da folha. Fonte: OKE (1978).

O processo de evapotranspiração compreende a perda associada de água, que ocorre pela evaporação da superfície do solo e pela transpiração estomática e cuticular da planta. A equação de Penman-Monteith para o cálculo da evapotranspiração da planta é (MONTEITH, 1965):

$$E = \frac{\Delta(R_n - G) - \rho_a C_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \quad (8)$$

Equação 6: Equação de Penman-Monteith. Fonte: Bonan (2016).

E = Taxa de evapotranspiração [$\text{gs}^{-1}\text{m}^{-2}$]

Δ = Declividade da curva de pressão de saturação de vapor [PaK^{-1}]

R_n = Saldo de radiação [W m^{-2}]

G = Fluxo de calor no solo [W m^{-2}]

ρ_a = Densidade do ar seco [kgm^{-3}]

C_p = Calor específico do ar seco [$\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$]

γ = Constante psicrométrica [$\gamma \approx 66 \text{ PaK}^{-1}$]

$(e_s - e_a)$ = umidade especificado ar [KPa]

r_a = resistência aerodinâmica [ms^{-1}]

r_s = resistência estomática [ms^{-1}]

Oke (1987) considerou a evaporação como uma relação da densidade de vapor saturado com a resistência estomática existente entre o ar e cavidade interna dos estômatos. A equação que define esta relação tem a seguinte representação:

$$E = (9)$$

$p_{v(s)}$ = Densidade de vapor saturado na superfície da folha

p_{va} = Densidade do ar

r_b = Resistência do Laminar Boundary Layer

r_{st} = Resistência dos estômatos

Percebe-se que a taxa de evaporação é proporcional à densidade de vapor saturado na superfície da folha, ou seja, quanto mais saturado estiver o ar, menor a perda de água pela superfície da folha. A resistência dos estômatos é fundamental dentro do processo de evapotranspiração, sendo representada pela equação de Jacobs (1994).

$$r_{st} = 1/g_s * 1000 \quad (10)$$

g_s é descrita da seguinte maneira:

$$g_s = 1.6 * A_a / C_s * C_i \quad (11)$$

A_a = taxa de fotossíntese

C_a = concentração de CO_2 na superfície da folha

C_i = concentração de CO_2 dentro da folha

Fatores externos que afetam a abertura dos estômatos são: concentração de CO_2 , temperatura do ar e solo, umidade de saturação do ar, umidade do solo, concentração de ar no solo e poluição (ar e solo). Os fatores externos do vegetal são: temperatura da folha, quantidade de água, tipos de hormônios, idade da folha, estágio de desenvolvimento e condições de crescimento.

A abertura dos estômatos estimula as trocas gasosas entre ar e folha, podendo estes se fechar parcialmente ou totalmente para impedir a perda de água da planta por déficit de água no solo. A resistência dos estômatos cresce quando a temperatura da folha aumenta ou diminui em relação ao ar.

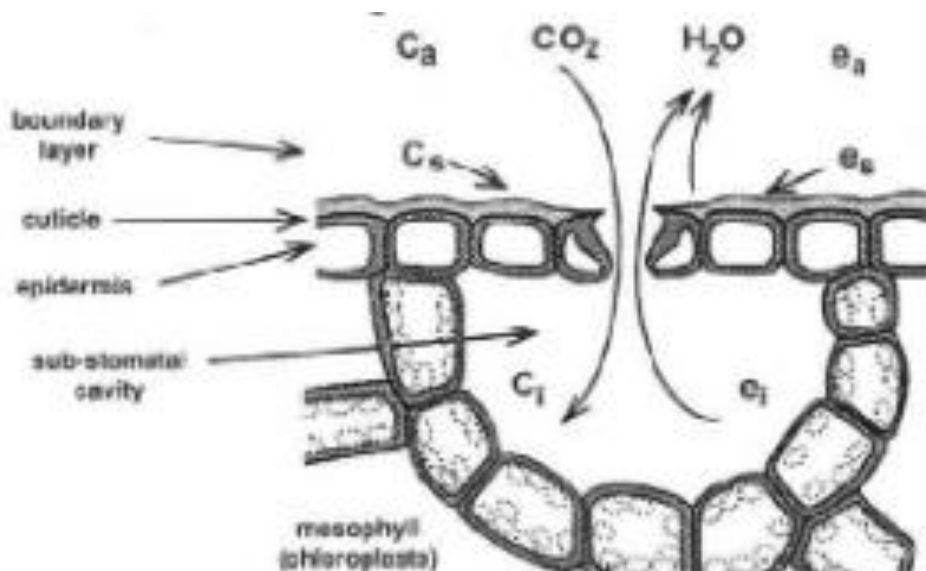


Figura 6: Esquema da abertura e trocas gasosas realizadas no estômato. Fonte: OKE (1973).

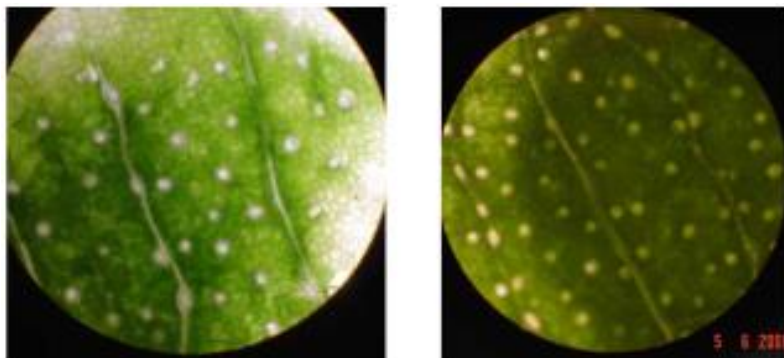


Figura 7: Estômatos em uma folha no microscópio. Fonte: Shinzato (2014).

2.6 A vitalidade da vegetação no ambiente urbano

Construções, trânsito pesado, trabalho civil de escavação profunda e o uso de materiais inertes como concreto e vidro contribuem para a degradação do ambiente em relação ao desenvolvimento vegetal. Em função do ambiente construído e do espaço limitado para o crescimento das raízes e galhos, com fatores desfavoráveis que acontecem ao mesmo tempo, o estresse nas plantas é acentuado. Os requerimentos básicos vegetais como solo, suprimento de água e luz solar são altamente modificados dentro das áreas urbanas em comparação com as condições rurais (CZAJA et al, 2020).

A Figura 8 de BRUNE (2016) traz um resumo a respeito das alterações no ambiente causadas pela urbanização em comparação com ambientes naturais.

As árvores têm que lidar com a compactação do solo, má qualidade e pouco volume do solo; poluição do ar e do solo, contaminação de sais, o calor excessivo, danos mecânicos, vandalismo, rajadas de ventos, alterações na água do solo, poucos nutrientes, pouca disponibilidade de água e o estresse de seca (BRUNE, 2016). Em muitos casos, as raízes das árvores estão presas em pequenos espaços ou em faixas estreitas de árvores cercadas por um solo compacto e selado por um pavimento impermeável. Há também a mistura da terra com entulho de construção que, somado com areia e pedras, tornam esse solo pobre em matéria orgânica. CHI YUNG (2019), ao estudar as condições de solo de Hong Kong, retrata como a pobre condição do solo urbano, compacto, com entulho e pouco volume de terra acabam causando impactos na longevidade da vegetação.

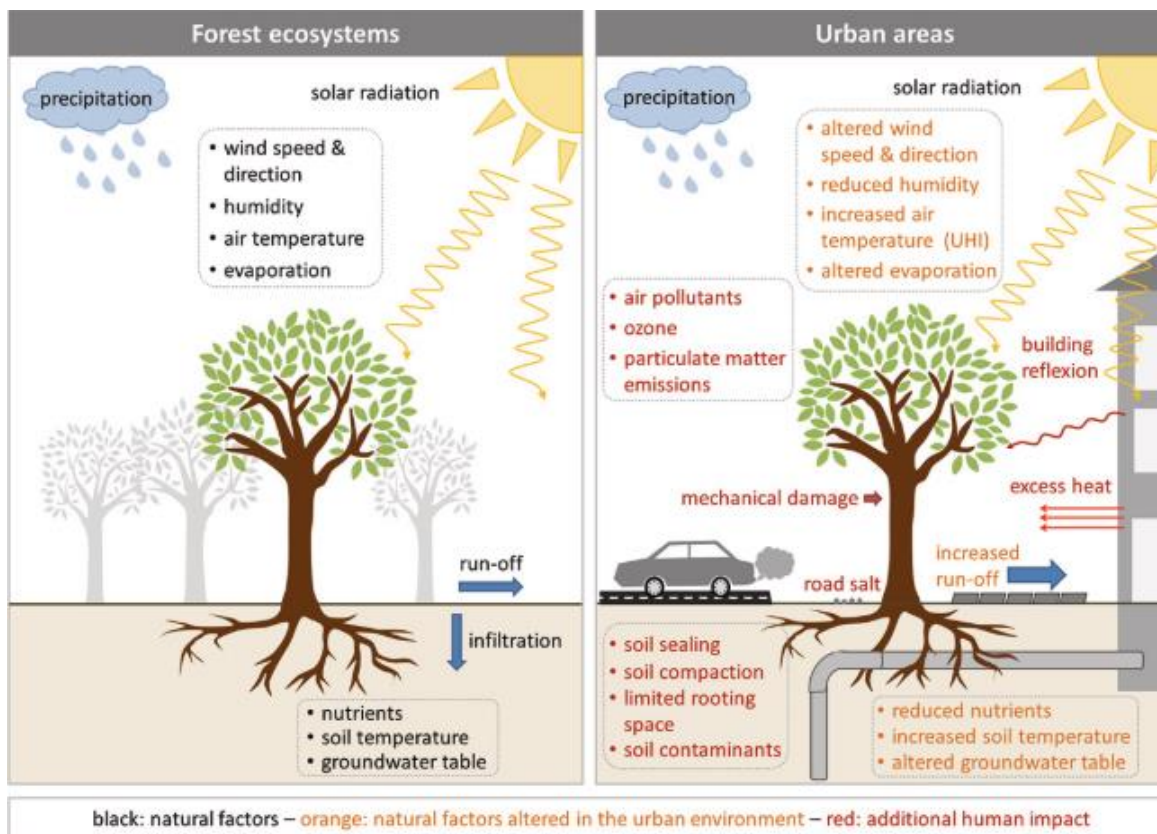


Figura 8: Representação das condições ambientais enfrentadas pelas árvores no ambiente natural e áreas urbanas. FONTE: (BRUNE, 2016)



Figura 9: O solo urbano compacto e com pouco espaço para o desenvolvimento das árvores em Hong Kong. Fonte: CHI YUNG (2019).

As árvores dentro das cidades enfrentam o estresse hídrico e o estresse térmico. De maneira geral, o estresse hídrico é causado devido ao acesso limitado à água devido ao aumento do escoamento e o lençol freático estar mais abaixo. O estresse térmico é intensificado pelo efeito de ilha de calor urbana e o excesso de radiação irradiada de volta pelas construções do entorno. Adicionalmente, altas temperaturas intensificam as condições de seca por meio do aumento da evapotranspiração. Ambos esses dois estresses podem ser intensificados com os efeitos das mudanças climáticas (BRUNE et al, 2016).

A transpiração, a temperatura de folha e a vitalidade da vegetação são cruciais para determinar o comportamento microclimático da vegetação no meio urbano já que apenas plantas saudáveis são capazes de prover efeitos benéficos ao ambiente. Dentro de condições com pouca oferta de água e temperaturas elevadas, as plantas tendem a reduzir suas taxas de transpiração para evitar a perda excessiva de água; no entanto, esse efeito leva ao aumento da temperatura foliar e reduz os efeitos microclimáticos da vegetação (MAY et al, 2013). O aumento excessivo da temperatura de folha pode trazer danos irreversíveis e afetar o desenvolvimento e crescimento da planta (BRUNE, 2016).

Dentro do nível da folha, eventos de extremo calor podem impactar os mecanismos das plantas. Em temperaturas altas, a fotossíntese é reduzida, ocorre o aumento do estresse foto-oxidativo, redução das taxas de crescimento. Em algumas espécies vegetais, ocorre o aumento da resistência estomática por meio do fechamento dos estômatos que serve como um mecanismo de resfriamento da folha. (TESKEY et al, 2015).

A vegetação só será capaz de promover seus benefícios se seus requisitos estiverem cumpridos. Esses requisitos são: quantidade de sol e sombreamento adequados; ventilação e umidade adequadas; temperatura do ar e suprimento de água no solo adequados (EPPEL et al, 2012; SAVI et al, 2015).

Os eventos de calor extremo podem ter impacto numa grande variedade de funções de árvore. Dentro da escala das folhas, a fotossíntese é reduzida, o estresse foto-oxidativo aumenta, as folhas amarelam e a taxa de crescimento das folhas restantes diminui. Em algumas espécies, a condutância estomática aumenta a altas temperaturas, o que pode ser um mecanismo para o arrefecimento das folhas (TESKEY et al, 2015).

O fluxo de calor sensível e calor latente na folha são processos biofísicos importantes que comandam a temperatura da folha. A convecção e a umidade durante a transpiração resfriam a folha e a condutância da camada limite da folha regulam esses fluxos. (BONAN, 2016). O tamanho e formato das folhas tem impacto no tamanho da camada limite da folha. Folhas pequenas possuem uma camada limite pequena e assim torna o acoplamento entre folha-ar bastante fortes (maior condutância). Folhas mais largas possuem uma camada limite maior tornando o acoplamento entre folha e ar menores (menor condutância). Por esse motivo, a morfologia das folhas tende a seguir de acordo com o ambiente que está situado (BONAN; 2018; CAMPBELL 1998).

A termorregulação das folhas e a consequente diferença de temperatura folha e temperatura do ar (ΔT) estão estreitamente ligadas às taxas metabólicas e à saúde das plantas (GUO et

al, 2022). As plantas dependem da transpiração e evaporação para prevenir danos relacionados ao calor, mas ainda pouco se sabe sobre o efeito da temperatura sobre os estômatos e a condutância estomática já que estudos anteriores aponta tanto a abertura quanto o fechamento e até mesmo a falta de significância da temperatura nesse quesito (MARCHIN, 2022).

Slot et al (2020) estudou do efeito da tolerância ao calor em espécies de plantas tropicais. Ainda que fora do ambiente urbano, sua pesquisa levantou valores de temperaturas suportadas pelas folhas das plantas. A temperatura crítica e temperatura de tolerância ao calor são de em torno de 46.7°C e 49.9°C. Exceder os limites de temperatura de tolerância ao calor trazem danos irreversíveis à folha e consequências ao balanço de carbono nas árvores (SLOT et al, 2018).

2.7 Infraestrutura Verde, conceito e aplicações

Não existe uma única definição para Infraestrutura Verde, seu significado pode variar e atingir diferentes escalas de tamanho e complexidade de acordo com diferentes autores e instituições. No entanto, nas diferentes definições, a presença dos serviços ecológicos que a Infraestrutura Verde é dotada assim como seus benefícios naturais gerados (serviços ecossistêmicos) à vida dos seres humanos, especialmente dentro dos espaços urbanos.

Segundo BORELLI et al (2015), às primeiras definições de infraestrutura verde eram mais restritivas e focadas na abordagem limitada à mecanicidade do papel da vegetação, solo e processos de manejo da água e criar ambientes urbanos mais saudáveis, com o passar do tempo, essa definição se expandiu sua amplitude e passou a englobar mais benefícios e serviços ecossistêmicos.

Para EPA - *Environmental Protection Agency* (2014), a infraestrutura verde é uma abordagem econômica e de resiliência para gerenciar os impactos do clima úmido e que proporciona muitos benefícios para a comunidade. Enquanto a infraestrutura de águas pluviais, cinza, de uso único tais como sistemas convencionais de drenagem canalizada e tratamento de água é projetada para afastar as águas pluviais urbanas do ambiente construído, a infraestrutura verde por sua vez, reduz e trata as águas pluviais em sua fonte enquanto proporciona benefícios ambientais, sociais e econômicos.

Já para AHERN et al (2014), a Infraestrutura Verde é definida como uma rede espacial e funcional integrada de áreas verdes apoiada por infraestruturas construídas as quais promovem funções ecossistêmicas e de paisagem para o público. Segundo DEMUZERE et

al (2014), a infraestrutura verde tem sido indicada como promissora para reduzir os efeitos adversos das mudanças climáticas nas áreas urbanas já que, por exemplo, traz melhor balanço hídrico, aliviando enchentes, promove conforto térmico pelo sombreamento gerado pela vegetação e traz suporte para pessoas terem oportunidade em produzir o próprio alimento. A infraestrutura verde também ganhou atenção já que também é um recurso para mitigar as mudanças climáticas já que sua biomassa pode armazenar carbono.

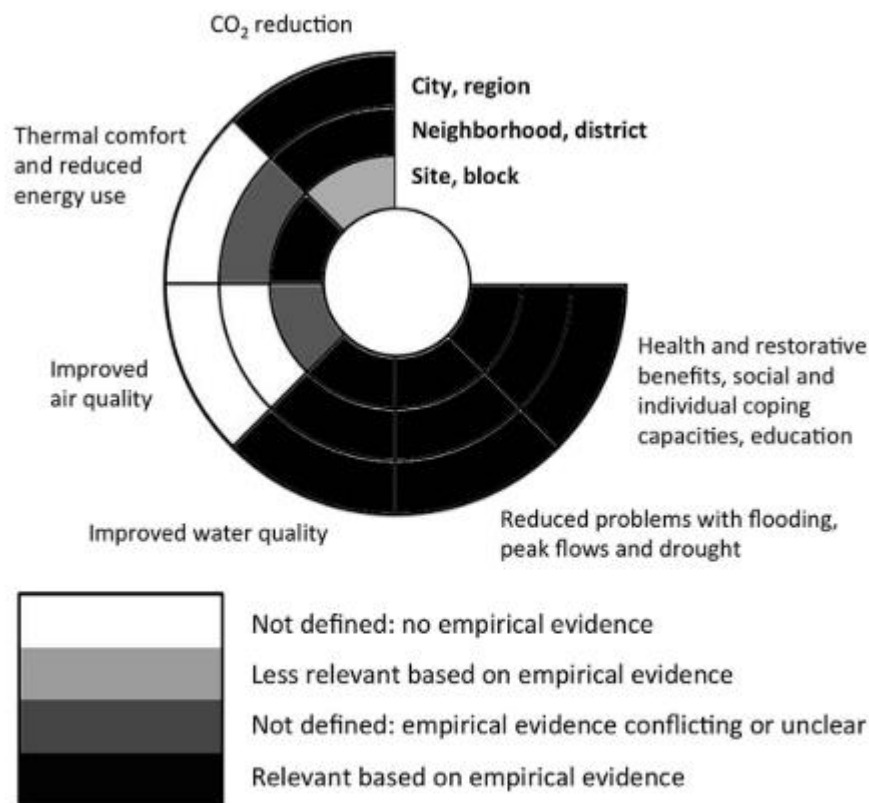


Fig. 2. Relevance of the benefits from green urban infrastructure for climate change adaptation and mitigation on three spatial scales, based on the evidence discussed above.

Figura 10: Resumo dos serviços prestados pela infraestrutura verde e suas escalas de efeito segundo o levantamento de DEMUZERE et al (2014). Fonte: DEMUZERE (2014).

Conforme dito anteriormente, a infraestrutura verde urbana reduz os efeitos adversos da mudança climática em áreas urbanas, por exemplo, equilibrando o fluxo de água para aliviar alagamentos, promovendo conforto térmico por meio do sombreamento da vegetação e pode até mesmo dar base para pessoas produzirem seus próprios de alimentos (KRASNY; TIDBALL, 2009; CAMERON, 2012; FARRUGIA et al, 2013).

A infraestrutura verde também ajuda a diminuir a temperatura ambiente nas cidades. Durante o processo de evapotranspiração, as plantas absorvem o calor sensível e liberam calor latente,

quando o estado da água converge do líquido para o gasoso, traz a diminuição da temperatura para as áreas de seu entorno. Esse efeito é aumentado pelo tamanho de área das folhas, densidade foliar já que mais água é transpirada de áreas maiores de superfície (HARDIN; JENSEN, 2007). O sombreamento é outro fator importante, a interceptação da radiação solar pela vegetação, especialmente pela vegetação arbórea, pode ser considerada o principal papel da vegetação na atenuação das temperaturas das superfícies e do ar (ERELL et al., 2011; SHASHUA-BAR e HOFFMAN, 2000). A interceptação da radiação solar evita que esta incida e aqueça as superfícies urbanas. Menos aquecidas, as superfícies liberam menor quantidade de radiação de onda longa, diminuindo o aquecimento do ar (QIU et al., 2013).

O nível do sombreamento pode ser determinado de acordo com estrutura do dossel vegetal, seu índice de área foliar (IAF) e a forma como estão distribuídas as aberturas geométricas das copas, ou gap fraction (SHINZATO, 2014).

O processo de fotossíntese nas plantas requer a absorção de energia do calor da radiação solar para sintetizar glicose e que também traz o resfriamento do ambiente. As árvores promovem o sombreamento por meio da sua copa, reduzindo a insolação e o aquecimento da superfície. Por fim, a vegetação também reduz a transmissão de calor para a superfície subjacente, absorvendo a insolação devido ao baixo albedo, enquanto reduz a quantidade de calor irradiado do solo (ROSENZWEIG et al, 2006).

O potencial de resfriamento gerado pela vegetação pode ser, portanto, um benefício para o conforto térmico e a redução do consumo energético, especialmente dentro da escala local. Diversos estudos que levam em conta simulações, demonstram que as características de vegetação e de superfícies vegetadas (exemplo: parques) dentro de *canyons* urbanos tem efeito no conforto térmico e na eficiência energética.

É conhecido que a vegetação reduz o escoamento superficial de eventos de precipitação por meio da interceptação da água por meio das folhas e dos caules. Além disso, o solo subjacente também ajuda na redução das taxas de infiltração, já que age como uma esponja acumulando água nos espaços dos poros até percolar por meio do fluxo e fluxo de base. Hábitats que possuem solo espesso e coberto por vegetação densa devem ter alto grau de capacidade de infiltração, portanto a água irá demorar mais para atravessar, prevenindo o acontecimento de eventos como alagamentos em áreas mais baixas. Além da absorção do solo, a vegetação também absorve a água, servindo de reservatório natural após os eventos de precipitação. Parte dessa umidade pode ser dispersa depois na forma de transpiração (FARRUGIA et al, 2013).

Em escala mais local, CORMIER et al (2008) levantam a variedade de sistemas que mimetizam as funções ecológicas, hidrológicas dos ambientes naturais e que são exemplos a serem implantados como ferramenta de adequar melhores condições de conforto térmico, gestão de águas urbanas, biodiversidade, caminhos, acessibilidade e imagem local dentro do ambiente urbano. Dentre esses sistemas, algumas tipologias são:

- Jardim de Chuva: São depressões topográficas que recebem o escoamento pluvial proveniente de áreas impermeabilizadas limítrofes. O solo desse local é geralmente tratado com insumos que aumentam sua porosidade e se comporta como uma esponja ao absorver água enquanto microorganismos como bactérias no solo removem os poluentes difusos trazidos pelo escoamento superficial. Normalmente se adicionam nesses espaços, plantas para aumentar o processo de evapotranspiração e remoção de poluentes.



Figura 11: Exemplo de jardim de chuva. Fonte: Cormier; Pellegrino (2008).

- Canteiro Pluvial: São basicamente jardins de chuva compactados em pequenos espaços urbanos. Os canteiros podem contar com, além da capacidade de infiltração, com um mecanismo extravasor, ou, sem infiltração, contando apenas com a evaporação, evapotranspiração e transbordamento.
- Biovaleta: Biovaletas ou valetas de biorretenção vegetadas são semelhantes aos jardins de chuva, mas geralmente são depressões lineares preenchidas com vegetação, solo e elementos filtrantes que processam a limpeza da água da chuva e aumentam o tempo de escoamento. Ou seja, são células ligadas em série que seguem a declividade do terreno e que contribuem para a sedimentação dos poluentes onde cada trecho é iniciado por uma bacia de sedimentação. A água escoada pode ser dirigida para jardins de chuva ou sistemas convencionais de retenção ou detenção de água.

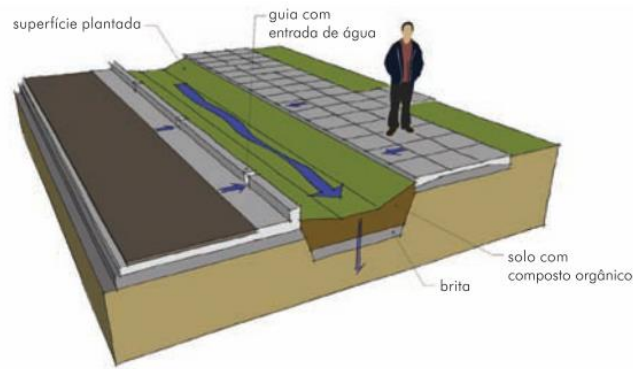


Figura 12: Exemplo de biovaleta. Fonte: Cormier; Pellegrino (2008)

- Lagoa Pluvial: Exigem maiores espaços e funcionam como bacias de retenção e recebem o escoamento superficial por drenagens naturais ou tradicionais. Uma característica dessa estrutura é que parte da água pluvial captada permanece retida entre os eventos de chuva. Dessa maneira, essa tipologia acaba se caracterizando como um alagado construído. Segundo CORMIER et al (2008), essa tipologia não está apta a receber efluentes de esgoto doméstico e industrial.
- Teto Verde: trata-se de uma cobertura de vegetação plantada em um solo tratado com compostos orgânicos e areia espalhados sobre uma base composta por uma barreira contra raízes, um reservatório de drenagem e uma membrana à prova de água. Trata-se de uma ferramenta que retém águas pluviais, auxiliam na redução do efeito da ilha de calor urbana e podem trazer benefícios a respeito da eficiência energética das edificações e podem criar habitats para a vida silvestre.
- Cisterna: Essa tipologia tem como função, coletar e armazenar a água pluvial e atualmente é interpretada como meio de armazenar água vinda de outras tipologias de infraestrutura verde como os telhados verdes. Essa água então pode ser utilizada para posterior reuso.
- Grande Verde: Trata-se da combinação das diversas tipologias anteriores, formando uma rede para setores urbanos inteiros.

Por fim, segundo DEMUZERE et al (2014), resumidamente, os benefícios gerados pelas infraestruturas verdes são:

- O papel das infraestruturas verdes urbanas na contribuição para a mitigação das alterações climáticas e na compensação das emissões urbanas de carbono. Especificamente, potencial armazenamento e sequestro de CO₂ de

espaços verdes não convencionais, tais como telhados verdes e fachadas verdes, para os quais ainda faltam dados sólidos;

- O impacto das intervenções ecológicas no conforto térmico numa área urbana mais vasta;
- O efeito de arrefecimento dos telhados verdes em diferentes tipos de edifícios e em diferentes estações do ano;
- A absorção de poluentes atmosféricos por diferentes tipos e composição de infraestruturas urbanas verdes;
- O efeito cumulativo da infraestrutura urbana verde no escoamento superficial, recarga de águas subterrâneas e evapotranspiração, considerando aspectos fisiográficos, climáticos e bióticos locais;
- Os grupos sociais vulneráveis que mais poderiam beneficiar dos benefícios para a saúde e restauração oferecidos pelas infraestruturas urbanas verdes;
- As características das zonas verdes que trazem mais benefícios sociais e psicológicos em alturas de extremos ambientais e mentais relacionados com o clima;
- Co benefícios e compensações entre a oferta de benefícios físicos e sociais das infraestruturas urbanas verdes em resposta aos efeitos das alterações climáticas;
- Relações complexas entre as partes interessadas por detrás da prestação de serviços e benefícios de infraestruturas urbanas verdes em diferentes contextos sociais e climáticos.

3. Mudanças climáticas, projeções climáticas futuras e planos de adaptação urbana

3.1 Mudanças Climáticas

Sempre houve alterações climáticas naturais no planeta Terra, entretanto, esse fenômeno vem acontecendo de modo acelerado há pelo menos um século, atrelado ao aumento da intensidade da atividade humana que se iniciou no fim do século XIX; com a industrialização, esse processo foi se intensificando gradativamente ao longo dos anos, especialmente a partir da década de 1970. O fenômeno da mudança climática se deve, além de fatores naturais, à grande concentração de gases de efeito estufa na atmosfera pela industrialização, transporte, geração de energia, desmatamento, etc. (IPCC, 2014).

É inequívoco que as atividades do ser humano aqueceram a atmosfera, os oceanos e a superfície terrestre e mudanças rápidas e disseminadas ocorreram em decorrência disso. De acordo com o IPCC (2021), foi observado dentro do período de 2011 a 2020 um aquecimento de 1,09 °C em comparação com o período pré-industrial (1850-1900). Desse valor, cerca de 1,07 °C, provavelmente, é derivado de ações humanas, como a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento.

Segundo o *World Resources Institute - WRI* (2020), o setor de geração de energia elétrica tem sido historicamente, e continua a ser, o maior setor emissor de gases de efeito estufa, produzindo assim cerca de 30% do total das emissões (ou 15.8 giga toneladas de CO₂) em 2016. Essas emissões continuam a crescer devido ao aumento da demanda por eletricidade, por esse motivo, infraestruturas de eletricidade, usinas de energia, linhas de transmissão e subestações, que possuem uns longos ciclos de vida, e a construção planejada de usinas de energia à base de carvão ameaçam o risco de atingirmos temperaturas maiores que 1,5°C. Nesse sentido, a necessidade de substituição das fontes fósseis para as fontes renováveis está clara para reduzir os impactos gerados pelo clima e, também, para beneficiar a saúde humana e o desenvolvimento econômico.

Os efeitos combinados de todas as atividades antrópicas em 2019 equivalem à energia acrescentada à Terra de 2,72 W/m², equivalente a cinco lâmpadas de árvore de Natal ligadas permanentemente em cada m² da superfície do globo. Essa energia adicional equivale a um acúmulo líquido de energia no planeta (já que a maior parte é reemitida para o espaço) equivalente a 0,57 W/m² por ano entre 1971 e 2018. Apenas 1% dessa energia adicional

aquece a atmosfera: 90% é absorvida pelos oceanos, 5% aquece a superfície terrestre e 3% derrete gelo. O derretimento de geleiras como as dos Alpes, dos Andes e do Himalaia é a maior causa isolada do aumento do nível do mar entre 1901 e 2018, com 41% do total. A expansão térmica do oceano respondeu por 38%, o degelo da Groenlândia e da Antártida, por 29%, e mudanças no armazenamento de água em terra reduziram o nível do mar em 8%. A chamada sensibilidade climática em equilíbrio, ou seja, quanto a Terra esquentaria caso a quantidade de CO₂ no ar dobrasse em relação à era pré-industrial, foi estimada em 3°C (OBSERVATÓRIO DO CLIMA, 2021).

Em 2020, a concentração de dióxido de carbono (CO₂) alcançou o patamar de 413.2 ± 0.2 partes por milhão (ppm), a concentração de metano (CH₄) em 1889 ± 2 partes por bilhão (ppb) e o óxido nitroso (N₂O) em 333.2 ± 0.1 partes por milhão, respectivamente cerca de 149%, 262% e 123% acima dos níveis pré-industriais (1750) (WMO, 2021). Em 2019, segundo a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), a concentração média de dióxido de carbono foi de 408.54 ppm, tendo chegado a um pico de 415 ppm, revelando o rápido e contínuo aumento desse gás de efeito estufa na atmosfera. No período de janeiro até outubro de 2019, a temperatura média da superfície do planeta aumentou em 1,1°C em relação aos níveis pré-industriais. O período de 2015 a 2020 foram os mais quentes já registrados e a década passada 2010-2019 é a mais quente já registrada. Desde a década de 1980, cada sucessiva década tem sido mais quente do qualquer uma outra desde 1850 (WMO, 2020).

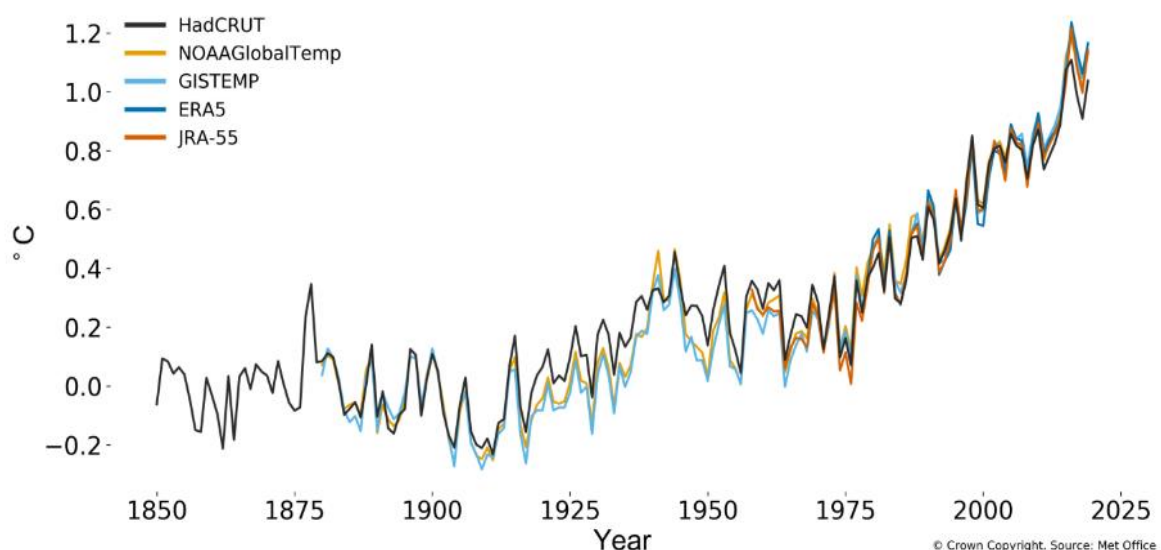


Figura 13: Média da temperatura da superfície do planeta Terra ao longo dos anos de 1850 a 2025 de acordo com dados meteorológicos de diferentes modelos. Os dados após 2019 demonstram a projeção do crescimento da temperatura para os anos futuros. Fonte: WMO (2020).

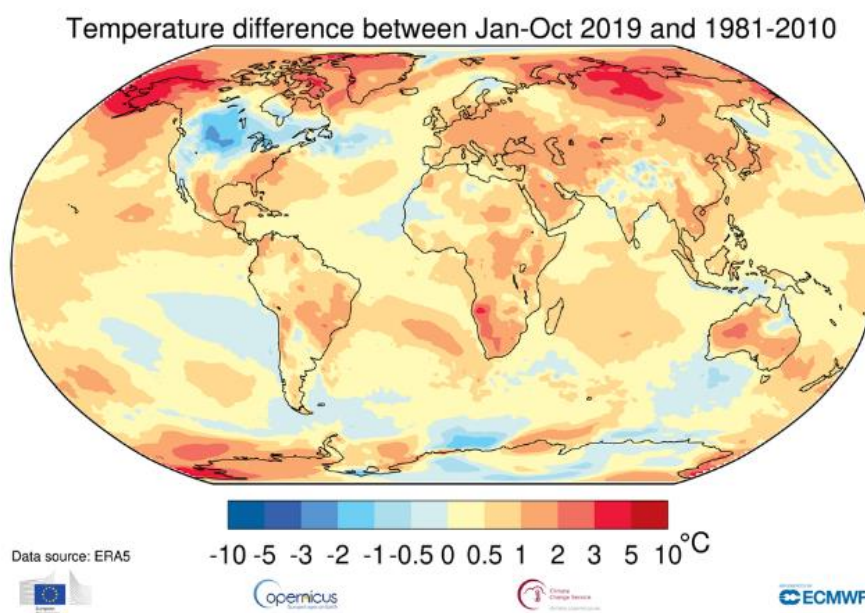


Figura 14: Diferença de temperatura da superfície terrestre ao longo do período de 1981 e 2010.

Fonte: WMO, 2020

Os impactos das mudanças climáticas podem ser simultâneos e interagem com alterações na sociedade, que se tornaram mais evidentes desde o AR5, tais como o crescimento da população urbana global; desigualdades; demandas por justiça social; rápida mudança tecnológica; continuidade da pobreza; degradação do solo e água, perda de biodiversidade, insegurança alimentar e pandemias (IPCC, 2021).

Segundo o AR6 do IPCC (2021), os novos estudos confirmam o que já tinha sido levantado anteriormente, a mudança climática já alterou ecossistemas marítimos, terrestres e de água doce em todo o planeta, esse fator implica na perda de espécies vegetais e animais; aumento de doenças para animais, plantas e o ser humano e desgaste de sistemas naturais que impactam na qualidade de vida, na atividade econômica e cultural.

3.2 O Impacto das Mudanças Climáticas

Segundo o IPCC (2021), as mudanças climáticas já estão impactando praticamente em todas as partes do mundo com o aquecimento atual de 1,1°C. Secas devastadoras, calor extremo e inundações recordes já ameaçam a segurança alimentar e os meios de subsistência de milhões de pessoas. Inundações e tempestades catastróficas forçaram mais de 20 milhões de pessoas por ano a deixarem suas casas desde o ano de 2008.

Atualmente, metade da população mundial enfrenta insegurança hídrica em pelo menos um mês a cada ano. Incêndios florestais estão queimando áreas mais extensas do que antes em muitas regiões, levando a mudanças irreversíveis na paisagem. O aumento de temperatura também facilita a propagação de doenças transmitidas por vetores, como o vírus do Nilo Ocidental, a doença de Lyme e a malária, bem como doenças transmitidas pela água, como a cólera (IPCC, 2021).

As mudanças climáticas estão impactando ecossistemas inteiros (marítimos, terrestres e de água doce). Espécies de animais estão sendo pressionadas e algumas já foram extintas. Espécies conhecidas estão morrendo em massa, enquanto outros milhares migraram para latitudes e altitudes mais altas (WRI, 2022).

Por meio do SR1.5 (*Special Report on Global Warming of 1.5C*), o IPCC (2018) levantou uma série de razões para limitar o aquecimento de temperatura da superfície do planeta em 1,5°C, pois existem diferenças nas projeções de impactos entre um aumento em 2°C⁴ frente ao aumento em 1,5°C:

1. Espera-se o aumento na mortalidade e doenças através da exacerbada ilha de calor, amplificação das ondas de calor, extrema volatilidade climática, enchentes, secas, inundação de áreas costeiras, aumento de vetores de doenças como a malária e a dengue.
2. Impactos para populações em situação de risco ligadas à pobreza. Manter o aquecimento em 1.5°C pode reduzir a exposição de 457 milhões de pessoas aos riscos climáticos. Conforme a temperatura aumenta, o estresse hídrico pode gerar o aumento migratório de comunidades agrícolas. Algumas cidades já enfrentam a migração de áreas rurais que já estão sofrendo com um aumento de 1.5°C.
3. Uma maior escassez de água, em diferentes regiões, está projetada para o aquecimento em 2°C, o dobro se for comparado com projeções para um aquecimento em 1,5°C. Também se espera maior frequência de secas e aumento de intensidades em várias regiões.
4. Insegurança alimentar maior caso o aumento seja 2°C, se comparado com um aumento em 1,5°C. Aumento do risco da má nutrição em regiões já sob pressão como o Sudeste Africano, o Sudoeste Asiático e a América do Sul, devido aos impactos do

⁴ Valor máximo de aquecimento estipulado pelo Acordo de Paris.

aumento de temperatura sobre a agricultura e a pecuária. Também estão incluídos nessa situação a piscicultura e a pesca.

5. É esperado, com o aumento da temperatura global, a degradação substancial de sistemas naturais, trazendo impactos irreversíveis sob ecossistemas e espécies animais e vegetais. Um grande exemplo disso é a perda de 99% das espécies de corais, caso o aquecimento atinja 2°C. Caso o aumento seja estabilizado em 1,5°C, espera-se que 10% dos corais existentes tenham chance de sobreviver.

O IPCC (2021), em seu sexto relatório do Grupo de Trabalho I, mostra que o mundo poderá atingir ou ultrapassar o valor de 1,5 °C de aquecimento nas próximas duas décadas, em um período de tempo menor e mais cedo do que os estudos anteriores apontavam. Nesse sentido, limitar o aquecimento a este nível para evitar impactos climáticos mais severos depende de ações na década atual. Por esse motivo, são necessários cortes mais ambiciosos nas emissões de gases de efeito estufa para limitar o aquecimento em 1,5°C. No cenário de maior emissão (SSP-8.5), é possível que a temperatura média do globo possa aumentar em 5.7°C até 2100 com resultados catastróficos.

A *Figura 15* do IPCC (2018) retrata uma parcela dos impactos esperados pelas mudanças climáticas nos sistemas naturais, modificados e antrópicos. Nota-se a diferença de intensidade de riscos e impactos. Em escala menor, mas ainda preocupante, nota-se o risco de mortalidade relacionado ao estresse térmico.

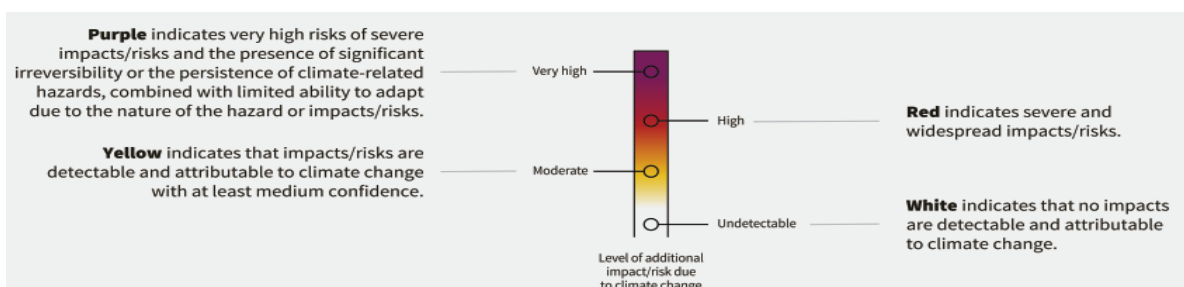
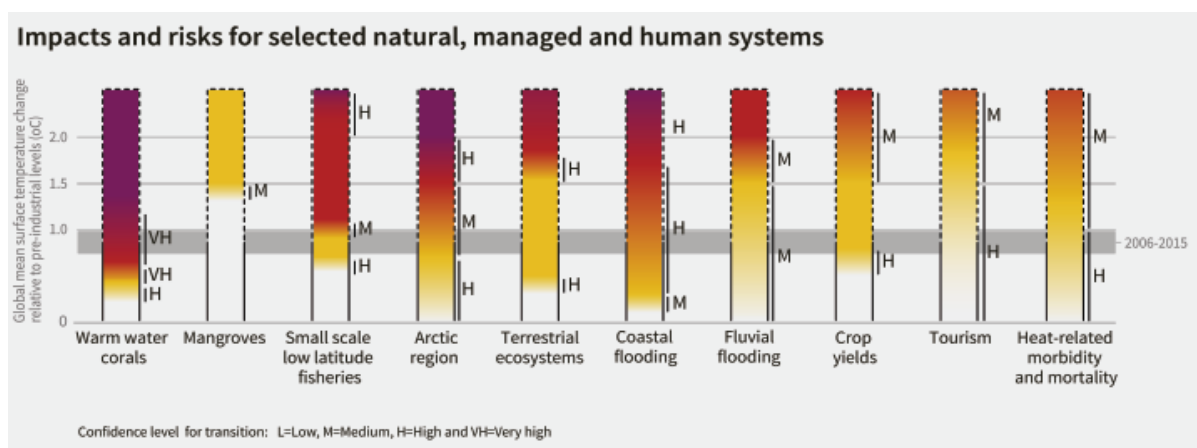


Figura 15: Riscos, intensidade e impactos atrelados ao aumento de temperatura da superfície terrestre. Fonte: IPCC (2018).

Sob esse contexto, dentro do cenário brasileiro, um exemplo de risco, dentre os vários, é esperado que o aquecimento global poderá ameaçar a produção de alimentos no país, caso nenhuma medida mitigadora e de adaptação seja realizada. Os cenários agrícolas apontam para uma redução da área cultivável de “baixo risco e alto potencial” em 2020 e 2030. O Brasil poderá perder cerca de 11 milhões de hectares de terras adequadas à agricultura, por causa das alterações climáticas até 2030 (PBMC, 2016).

Por fim, segundo o IPCC (2022), o mundo pode atingir o limite de aquecimento de 1,5°C já nas próximas duas décadas, ou seja, resta um pequeno intervalo de tempo para limitar o aquecimento até esse valor, antes de 2100. Para isso, serão necessárias ações mais decisivas e rápidas para conter as emissões de gases de efeito estufa nesta década e zerá-las até 2050.

3.3 Projeções Climáticas Futuras

Em 2013, o IPCC (2013), apresentou no AR5 os cenários RCP (*Representative Concentration Pathways*). Os cenários futuros de mudanças climáticas são representações plausíveis das emissões futuras de gases de efeito estufa baseados em uma série de suposições coerentes e fisicamente consistentes sobre suas forçantes radiativas, demografia, desenvolvimento econômico e mudanças tecnológicas.

Os RCPs⁵ são identificados por sua forçante radiativa total, expressa em W/m², a ser atingida durante ou próximo ao final do século XXI. Cada RCP provê conjuntos de dados, espacialmente distribuídos, de mudanças no uso da terra e de emissões setoriais de poluentes do ar, e especifica as concentrações anuais de gases de efeito estufa e as emissões antropogênicas até o ano 2100. Assim, grupos de estudo interdisciplinares elaboraram os cenários RCPs que usam um sistema bastante completo levando-se em conta os impactos das emissões, ou seja, o quanto haverá de alteração no balanço de radiação no sistema terrestre. Os cenários RCPs são: RCP 2.6 (baixas emissões), RCPs 4.5 e 6.0 (estabilização de médias emissões de GGE) e o RCP 8.5 (altas emissões) (IPCC, 2014).

⁵ O RCP (*Representative Concentration Pathway*) e SSP (*Shared Social Economic Pathways*) são projeções que coexistem e que foram modeladas dentro de dois diferentes grupos, o primeiro que leva em consideração as concentrações de gases de efeito estufa e forçantes radiativas e o segundo que inclui fatores socioeconômicos (educação, economia, população, urbanização).

Em 2021, o IPCC (2021) no AR6, tratou de apresentar um novo conjunto de cenários futuros, atualizando os cenários anteriores RCPs, os SSPs (*Shared Social-Economic Pathways*). O relatório do WGI apresenta possíveis cenários futuros com diferentes níveis de emissões de gases de efeito estufa de acordo com os SSPs⁶: SSP-8.5 e SSP-7.0 representando cenários com alta emissão de CO² nos quais as emissões irão quase que dobrar nos períodos de 2100 e 2050; SSP2-4.5 representando um cenário de permanência dos níveis de emissão de CO²; SSP1-1.9 e SSP1-2.6 nos quais as emissões de CO² irão decair nas próximas décadas, atingindo valores negativos nos períodos de 2050 a 2100. Os resultados para cada cenário são claros: quanto maiores os níveis de emissão de CO², maiores serão o aumento da temperatura de superfície do planeta.

Scenario	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)	Best estimate (°C)	Very likely range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

Figura 16: Aumento de temperatura da superfície terrestre ao se comparar o período de 2081-2100 com o período de 1850-1900 para cada cenário futuro de emissão de CO². Fonte: IPCC (2021).

Segundo o IPCC (2021), dentro do cenário mais otimista de todos (SSP1-1.9), as emissões antrópicas de dióxido de carbono seriam reduzidas rapidamente dentro das próximas décadas, chegando a “emissões líquidas zero” por volta de 2050, e, posteriormente, tornando-se negativas. Isso exigiria não só a redução de emissões, mas também a implementação de medidas capazes de remover o excesso de carbono já acumulado na atmosfera, como o plantio de árvores em larga escala por todo o planeta; ou seja, o homem passaria a tirar mais carbono da atmosfera do que acrescenta. Em um segundo cenário otimista (SSP1-2.6), isso também aconteceria, mas só a partir de 2080.

⁶ *Shared Socioeconomic Pathways*: cenários de emissão de gases de efeito estufa projetados de acordo com políticas climáticas diferentes até o ano de 2100.

Future emissions cause future additional warming, with total warming dominated by past and future CO₂ emissions

a) Future annual emissions of CO₂ (left) and of a subset of key non-CO₂ drivers (right), across five illustrative scenarios

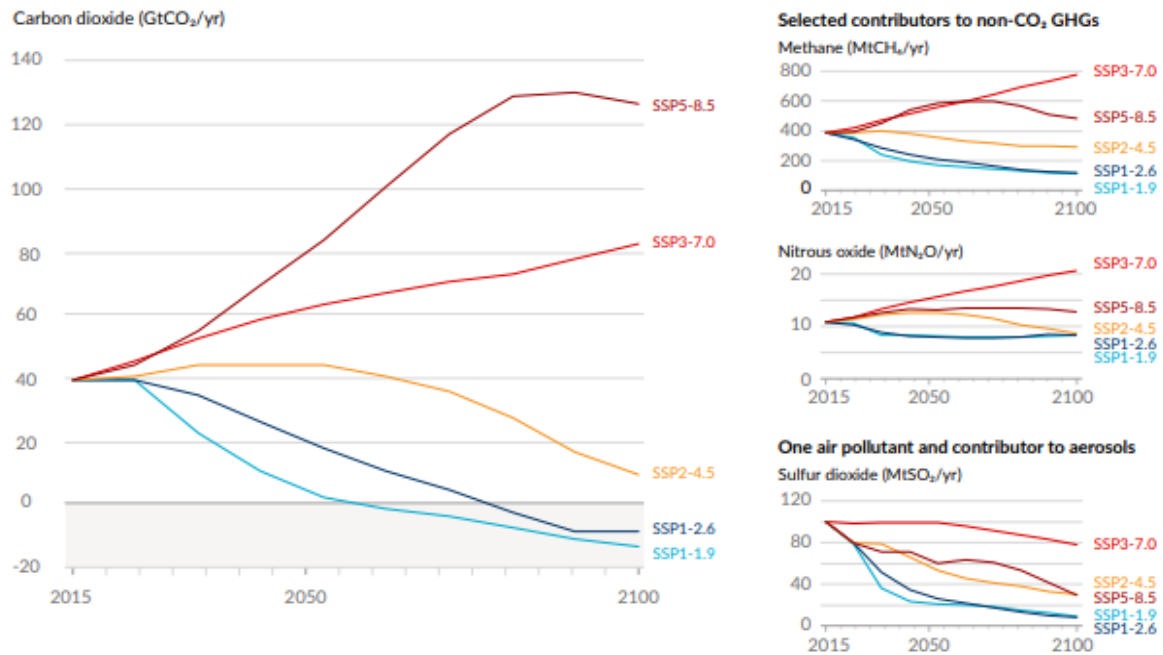


Figura 17: Taxas de emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa ao longo de 2015-2100 de acordo com cada SSP. Fonte: IPCC (2021).

b) Contribution to global surface temperature increase from different emissions, with a dominant role of CO₂ emissions

Change in global surface temperature in 2081-2100 relative to 1850-1900 (°C)

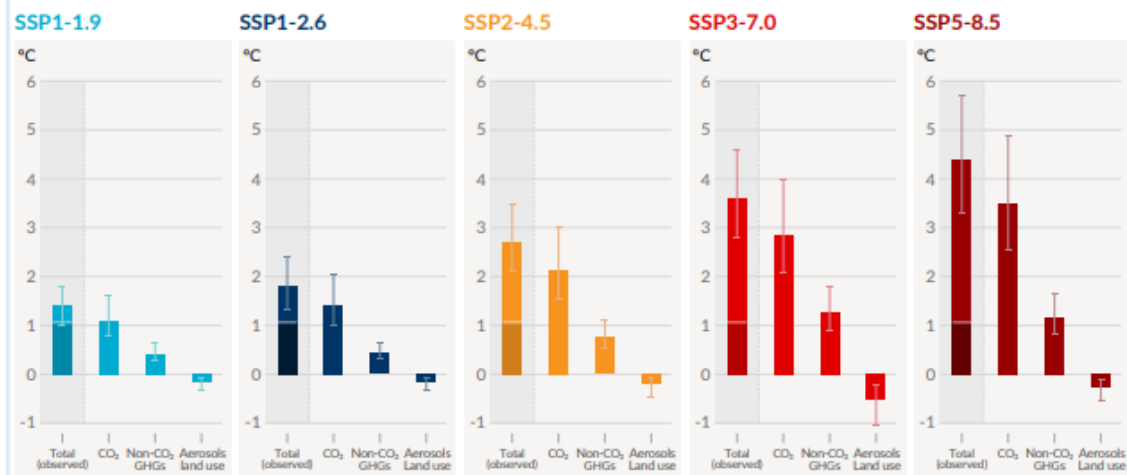


Figura 18: Emissão de CO₂ e outros gases de efeito estufa de acordo com cada situação de cenário futuro. Fonte: IPCC (2021).

Já dentro de um cenário intermediário, as emissões ainda cresceriam um pouco nos próximos anos e começaram a diminuir só a partir de 2050, mas não o suficiente para chegar a zero

antes de 2100. Nos dois cenários mais pessimistas (vermelho e violeta) as emissões continuariam subindo nas próximas décadas, porém, em intensidades diferentes.

O cenário que melhor representa a trajetória atual do mundo é o SSP3-7.0, no qual o aquecimento global ultrapassa 2°C por volta de 2050 e, no fim do século, chegaria a 3,6°C, com potencial para chegar a 4,6°C.

3.4 As Cidades e as Mudanças Climáticas

As cidades consomem cerca de 75% da energia total produzida para o transporte, indústria, serviços, edifícios, infraestrutura, distribuição de água e produção de alimentos. Juntas, as cidades ocupam uma pequena parcela da superfície total terrestre e são os territórios responsáveis por cerca de 70% da emissão antrópica dos gases de efeito estufa. Essa emissão de gases se dá pelo consumo energético dos edifícios, transporte motorizado e indústrias, quase sempre abastecidos por fontes energéticas não renováveis (UN-HABITAT, 2020). O crescimento populacional e a urbanização aumentaram rapidamente a demanda de energia nos edifícios, especialmente de eletricidade. Estima-se que a energia consumida em edifícios residenciais e comerciais aumentará em 65% entre 2018 e 2050 (EIA, 2019).

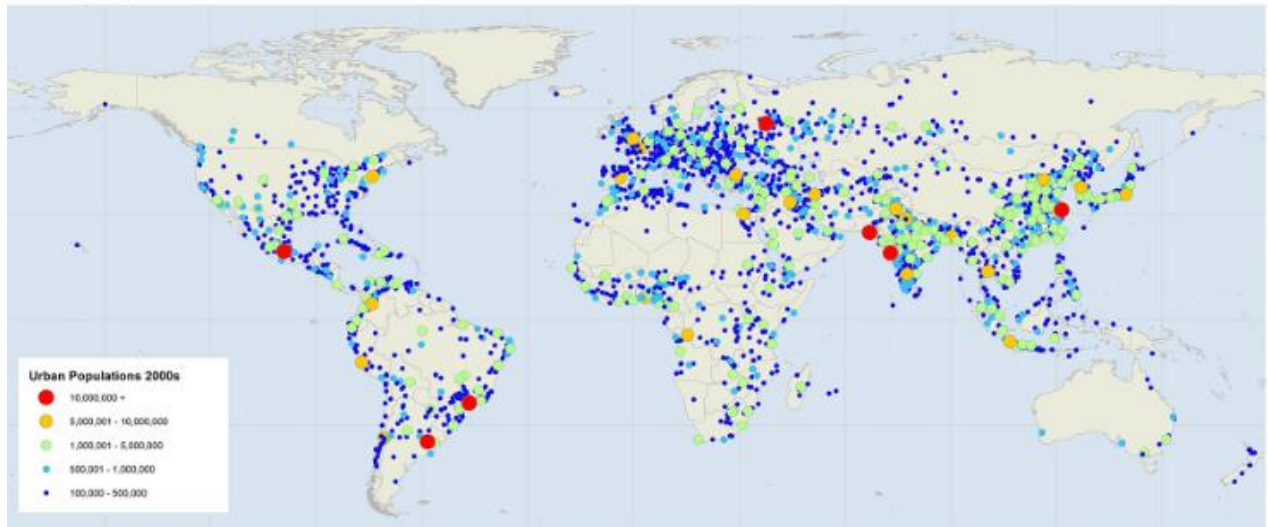
O rápido crescimento de cidades em países em desenvolvimento é um fenômeno preocupante pois o processo de urbanização nesses locais é geralmente marcado pela falta de planejamento, de infraestrutura e de capital, somado à situação de fragilidade social da grande maioria da população nesses centros urbanos. Conseqüentemente, esses fatores têm grande impacto no meio ambiente e seus recursos naturais, contaminando o ar, o solo e as águas, destruindo ecossistemas e elevando a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Sob essa perspectiva de urbanização, consumo de recursos naturais, dificuldades socioeconômicas de países em desenvolvimento e crescente aumento da emissão de gases de efeito estufa, percebe-se que combater as mudanças climáticas é atualmente um dos maiores desafios a ser enfrentado pela humanidade, sendo necessários esforços e cooperação de todas as partes, tanto para combater as mudanças climáticas, quanto para se adaptar aos seus efeitos (IPCC, 2016).

Como mitigação dos impactos gerados pelas mudanças climáticas, o IPCC (2021) levanta a importância de se concentrar esforços principalmente na redução da emissão de gases de efeito estufa, destaca o modelo de urbanização compacto, caracterizado pelo zoneamento misto do solo, com desenvolvimento orientado ao transporte (DOT), tornando mais próximas fisicamente as habitações dos locais de trabalho, para reduzir diretamente e indiretamente o

uso de energia em diversos setores. O desenvolvimento compacto pode preservar reservas de carbono e áreas para abrir espaço para a agricultura e bioenergia.

Urban populations

2000s



Urban populations

2050s

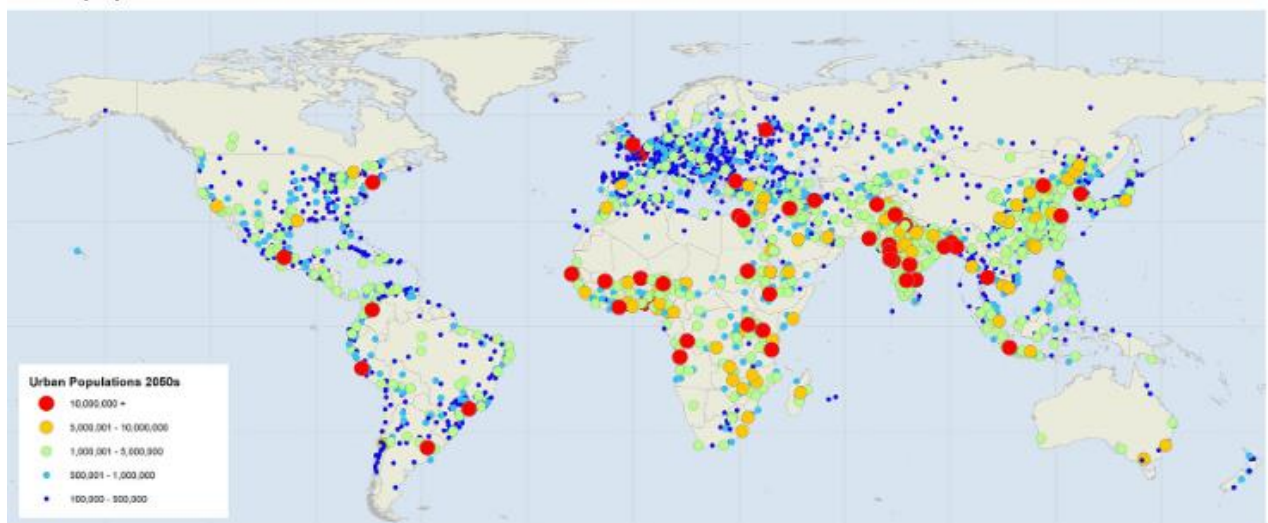


Figura 19: Acima: cidades pelo Mundo com mais de 100.000 habitantes dentro do período do ano de 2000; abaixo: população urbana estimada para o período da década de 2050. Imagem gerada por meio de dados da International Earth Science Information Network (CIESIN), Universidade de Columbia. Fonte: C40 (2018).

A respeito da adaptação das cidades frente às mudanças climáticas, o IPCC (2014) aponta a necessidade de se adaptar os edifícios, principalmente por meio da redução de consumo energético; recomenda também a manutenção dos espaços verdes, melhorias no ambiente construído por meio do planejamento urbano, das leis de zoneamento e códigos de edificações; construção e melhoria no sistema de drenagem; e proteção contra inundações.

Observa-se, assim, que grande parte da abordagem a respeito da redução do impacto climático urbano e adaptação está ligada a respostas técnicas específicas para riscos climáticos, tais como infraestrutura consolidada ou padrões de desenho urbano (TYLER et al, 2010).

Nesse cenário de falta de preparo e de planejamento, segundo o PBMC (2016), as incertezas climáticas e as tendências de urbanização mostram cidades em desenvolvimento com novos e desconhecidos desafios de planejamento. Os países em desenvolvimento precisam investir numa infraestrutura urbana em um ritmo mais rápido para atender às necessidades de uma população pobre em expansão, de forma a permitir o investimento privado, que irá criar oportunidades econômicas para uma força de trabalho nacional em expansão.

Agravando a situação, é fato que investimentos em desenvolvimento urbano e infraestrutura são extremamente caros e, em grande parte, irreversíveis. Com custos, incertezas econômicas e climáticas, os tomadores de decisão enfrentam um dilema nas cidades: como orientar os investimentos para atender às diversas necessidades dos habitantes e da economia urbana, mesmo sob condições climáticas imprevistas e impactos indiretos inesperados (TYLER, 2010).

Meios eficazes de adaptação e mitigação, frente aos impactos das mudanças climáticas nos ambientes urbanos, dependerão de políticas e medidas em várias escalas: internacionais, regionais, nacional e subnacional (PBMC, 2016). Segundo o IPCC (2021), políticas em todas as escalas que se apoiam no desenvolvimento de tecnologia, difusão e transferência da mesma, bem como financiamento para respostas às mudanças climáticas, têm sido observadas nos últimos anos. A preocupação crescente da população a respeito das mudanças climáticas resultou no surgimento de políticas de adaptação de 170 países e em várias cidades dentro das suas políticas, existe o crescimento de instrumentos para a adaptação frente às mudanças climáticas em diversos setores e que procuram assegurar melhorias na agricultura, inovação, saúde e bem estar, segurança alimentar, moradia, biodiversidade, conservação e redução de riscos e danos.

No entanto, o IPCC (2021) aponta que, apesar do progresso, existem diversos “vazios” entre os diferentes níveis de adaptação. As políticas de adaptação não estão atingindo os mais pobres e necessitados de maneira efetiva; são necessários maiores esforços e mudanças mais impactantes em todos os âmbitos para que ocorram significativos avanços.

3.5 Impactos das Mudanças Climáticas nas Cidades

De acordo com o IPCC (2022), a exposição aos impactos climáticos subiu drasticamente nas áreas urbanas desde a publicação do AR5, em 2014. As elevações mais rápidas na vulnerabilidade urbana se deram em assentamentos informais, onde se encontram condições precárias de habitação, acesso inadequado a serviços básicos e recursos limitados impedem esforços de resiliência. Esse desafio é especialmente acentuado na África Subsaariana, onde 60% da população urbana mora nesses assentamentos, e na Ásia, com 529 milhões de pessoas vivendo nas mesmas condições.

As cidades e assentamentos (particularmente os sem planejamento e informais, em áreas costeiras e em regiões montanhosas) têm crescido de forma acelerada e concentrando uma crescente exposição aos riscos e aumento da vulnerabilidade, são assim áreas que sofrem grandes efeitos das mudanças climáticas (IPCC, 2021).

Os efeitos das mudanças climáticas sobre as cidades são preocupantes, pois as alterações no ambiente causadas pela expansão urbana aumentam os riscos de estresse térmico por calor, seca, tempestades, precipitação extrema, inundações, deslizamentos de terra, escassez de água, poluição do ar e aumento do nível do mar (IPCC, 2014). Dentro desse quadro de aumento de eventos extremos e desastres, as populações mais pobres serão os grupos mais vulneráveis a esses impactos gerados pelas mudanças climáticas (IPCC, 2014; PBMC, 2016).

De acordo com o PBMC (2016), os impactos climáticos não surgem especificamente dos riscos climáticos, mas sim por meio de uma combinação de fatores que podem tirar uma cidade da situação de normalidade. Tyler (2010) e Fischetti (2001) retratam como os danos nas áreas urbanas não foram causados só pelas catástrofes naturais, mas sim, pela falta de infraestrutura, manutenção, expansão urbana não planejada e ausência de planos eficazes de emergência.

Os efeitos das mudanças climáticas têm causado impacto na saúde das pessoas, residências e em infraestruturas de importância nas cidades (transporte, saúde, água, saneamento, energia). Os múltiplos riscos climáticos e não climáticos têm impacto nas cidades, povoações e infraestruturas e, por vezes, eles se sobrepõem, aumentando os danos. Eventos extremos de calor, tais como as ondas de calor, têm se intensificado e, nas cidades, estas são agravadas pela poluição, infraestrutura limitada e o fenômeno de ilha de calor urbana (IPCC, 2022; C40, 2018; DEMUZERE et al, 2019).

Na questão das áreas urbanas, segundo o PBMC (2014), algumas regiões do Brasil poderão ter seus padrões de temperatura e de chuva alterados, com o aquecimento global. Junto com a mudança dos padrões anuais de chuva, ou mesmo onde não houver alteração do total anual, deverá ocorrer intensificação dos eventos severos. Nesse sentido, existe a possibilidade de ocorrer aumento de eventos extremos, principalmente de chuvas, nas grandes cidades brasileiras vulneráveis às mudanças climáticas como São Paulo e Rio de Janeiro.

3.6 O estresse térmico no meio urbano e seus impactos na saúde humana

Os eventos extremos de temperatura sobrecarregam o corpo humano prejudicando principalmente o sistema cardiovascular e respiratório, especialmente para as pessoas mais fragilizadas como idosos, gestantes, crianças até 4 anos e obesos. As altas temperaturas, além dos efeitos na termorregulação, podem aumentar a concentração de ozônio e outros poluentes que exacerbam as doenças cardiovasculares e respiratórias, as quais, às vezes, podem resultar em morte WHO (2018).

O calor tem também importantes efeitos indiretos na saúde: as condições de calor podem alterar o comportamento humano, a transmissão de doenças, a operação dos serviços de saúde, a qualidade do ar, as infraestruturas críticas como a energia, o transporte e a água. A escala e a natureza dos impactos do calor na saúde dependem do momento, intensidade e duração, do nível de aclimação, da adaptabilidade da população local, das infraestruturas e das instituições relacionadas ao assunto (WMO, 2020).

Adultos saudáveis possuem mecanismos regulatórios de calor eficientes que lidam com o aumento de temperatura até um determinado limite. O corpo pode aumentar a perda de calor pelas trocas radiantes, convectivas e evaporativas por meio da dilatação dos vasos e a transpiração (KOVATS; HAJAT, 2008).

De acordo com Kovats e Hajat (2008), altas temperaturas causam síndromes clínicas de insolação, exaustão pelo calor, câibras de calor e desmaios. A insolação severa ocorre quando o centro do corpo excede os 103 F (39 °C) e traz múltiplas disfunções de órgãos. A insolação possui taxa de mortalidade substancial e a progressão para a morte pode ser bastante rápida. Sobreviventes do aquecimento podem sofrer danos permanentes aos seus órgãos, podendo causar comprometimento funcional e falecimento precoce.

Segundo Fajersztajn et al (2016), os principais impactos foram registrados em locais onde o

calor extremo ocorre em contexto com envelhecimento da população, urbanização, ilha de calor urbana e desigualdades na assistência de saúde. Sob essa perspectiva, Zhao *et al.* (2019) afirmam que as mudanças climáticas aumentarão o número de mortes atreladas às ondas de calor entre 2031 e 2080. Dentre os países mais afetados, encontra-se o Brasil.

Em 2018 foram registradas condições vulneráveis a cerca de 220 milhões de pessoas expostas, com menos de 65 anos, às ondas de calor, um valor superior em comparação com o período de 1986 a 2005 (Organização Meteorológica Mundial - OMM, 2020). Segundo Diniz *et al.* (2020), as projeções climáticas realizadas para o futuro próximo (2030 - 2050) e futuro distante (2059 - 2099) evidenciam que o excesso de mortalidade de idosos relacionado às ondas de calor aumentará, sendo maior nas situações onde não há ações de adaptação urbana. Essa situação é visivelmente mais aguda, principalmente por doenças cardiovasculares, em mulheres (até 587 óbitos por 100.000 habitantes / ano).

As ondas de calor nos centros urbanos geram grande preocupação. As cidades não são a causa das ondas de calor, no entanto elas potencializam seus efeitos. Por causa da grande concentração de construções em asfalto, concreto, pedra e outros materiais inertes, as cidades acabam absorvendo e retendo mais calor do que as áreas rurais, sendo, portanto, mais vulneráveis às ondas de calor (STONE, 2012).

Portanto, é crucial que haja a implementação de medidas mitigadoras e adaptativas através de instrumentos urbanísticos já existentes, como zoneamento, código de edificações, planejamento da mobilidade urbana, etc. (TSUDA, 2019).

3.7 Conforto térmico em espaços abertos e índices de conforto térmico

O conforto humano, assim como a sensação de bem-estar e a saúde, são resultados da influência de múltiplos fatores, um dos quais é a ambiência térmica. Esse fator envolve a interação de vários outros, como temperatura, umidade e velocidade do ar e radiação térmica e características pessoais, o que inclui variáveis fisiológicas e comportamentais, como intensidade de atividade física e vestimentas, capacidade de adaptação de curto e longo prazo, entre outros. Tudo isso, além de diversos aspectos do contexto físico-ambiental e sociocultural, também a serem considerados. De fato, todas essas variáveis são reunidas de forma bastante complexa (MONTEIRO, 2018).

Os índices de conforto térmico auxiliam no entendimento da percepção térmica dos usuários de espaços abertos, especialmente quando consideram fatores climáticos e fisiológicos, o

que permite uma análise mais detalhada da interação entre a percepção térmica e as condições climáticas do ambiente analisado. (KRÜGER, ROSSI, et al., 2018)

Os índices de conforto térmico integram aspectos relacionados às trocas de calor entre corpo e ambiente de forma a simplificar a interpretação da condição térmica. Uma vez que há condições diversas em cada local de clima e aclimatação da população, os índices de conforto térmico são também, em sua maioria, específicos por localidade, variando a abordagem, as variáveis consideradas, etc. Os índices podem ser subdivididos entre aqueles de natureza indutiva (empíricos), de natureza indutiva-dedutiva (empírico-rationais) e de natureza dedutiva (rationais). Assim, há índices obtidos por meio de medições diretas (indutivos), índices obtidos empiricamente, mas tratados por meio de regressão estatística (indutivos-dedutivos), e há de forma preponderante os índices de caráter indutivo (empíricos). (MONTEIRO, 2018)

Resumidamente, a seguir serão apresentados dois índices de conforto térmico utilizados nesta pesquisa:

3.7.1 TEP (Temperatura Equivalente Percebida)

Monteiro (2008) propõe um modelo adaptativo de predição de sensação térmica em espaços abertos, considerando fatores de aclimatação ao ambiente, além das tradicionais variáveis microclimáticas urbanas (temperatura do ar, umidade, velocidade do ar e radiação térmica), variáveis subjetivas (percepção de sensações térmicas) e variáveis individuais (vestimentas e atividade física). Esse estudo utilizou métodos indutivo experimental, estatístico, analítico e comparativo. Esse trabalho resultou em um índice para avaliação do conforto térmico em espaços urbanos abertos dentro do contexto da cidade de São Paulo.

Para a proposição de uma equação que fornece valores de temperatura equivalente, assumiram-se as seguintes condições para o ambiente de referência: temperatura radiante média igual à temperatura do ar: $t_{rm} = t_{ar}$; velocidade do ar aproximadamente igual a zero: $v_{ar} = 0$ m/s; umidade relativa igual a cinquenta por cento: $u_r = 50\%$.

Desta forma, a temperatura equivalente percebida de um dado ambiente pode ser definida como uma escala de sensação térmica que apresenta valores numericamente iguais aos da temperatura do ar de um ambiente de referência ($t_{ar} = t_{rm}$, $u_r = 50\%$ e $v_{ar} = 0$) em que se verifica o mesmo valor médio de percepção de sensação térmica que no ambiente em questão.

$$TEP = -3,777 + 0,4828T_a + 0,5172T_{mrt} + 0,0802R_h - 2,333v \quad (10)$$

Ta= temperatura do ar em °C

Tmrt = temperatura radiante média em °C

Rh = umidade relativa do ar

v= velocidade do vento em m/s

Faixas interpretativas TEP	
Sensação	TEP (°C)
Muito calor	➤ 42,4
Calor	34,9 a 42,4
Pouco calor	27,3 a 34,8
Neutralidade	19,6 a 27,2
Pouco frio	12,0 a 19,5
Frio	4,4 a 11,9
Muito frio	< 4,4

Tabela 1: Faixas interpretativas de TEP. Fonte: Monteiro (2018)

3.7.2 PET - Physiological Equivalent Temperature (Temperatura Fisiológica Equivalente)

O PET é baseado no Modelo de Balanço Energético de Munique para Indivíduos (MEMI), que modela as condições térmicas do corpo humano de uma forma fisiologicamente relevante (HOPPE, 1999).

Diversos estudos utilizaram o PET para analisar a relação entre a influência do desenho urbano e a sensação térmica, no entanto, o uso do índice em diversas localidades mostrou variações nas preferências térmicas da população local. Dentre estes estudos, há grande diversidade climática, de latitude e de continentes, e, assim, a calibração do índice de conforto térmico em espaços abertos seria relevante para refletir de fato as preferências térmicas locais. Para tal, uma série de trabalhos foram conduzidos no mundo, inclusive no Brasil, para calibrar as faixas de conforto e desconforto do PET para diferentes regiões, como São Paulo, Belo Horizonte, Vitória, Campo Grande, etc. (KRÜGER, ROSSI, et al., 2018)

Höppe (1999, 2000) define a temperatura equivalente fisiológica de uma dada situação como a temperatura equivalente à temperatura do ar na qual, em uma situação típica interna, o balanço térmico do corpo humano é mantido, com temperaturas do centro do corpo e da pele iguais às da situação em questão.

Assim, a primeira equação representa o balanço energético; a segunda, o fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele; e a terceira, o fluxo de calor da superfície da pele

para a superfície externa da roupa. Resolvendo-se o sistema de três equações, encontram-se os valores da temperatura da superfície externa da roupa (t_{cl}), da temperatura da superfície da pele (t_{sk}) e da temperatura do centro do corpo (t_c).

Equação de balanço energético no corpo humano:

$$M - W + R + C + Q_{res} - E_{dif} - E_{sw} = 0 \quad (11)$$

M = taxa metabólica, em W/m^2 ; W = trabalho mecânico externo, em W/m^2 ;

R = troca de calor por radiação, em W/m^2 ;

C = troca de calor por convecção, em W/m^2 ;

Q_{res} = troca de calor pela respiração, W/m^2 ;

E_{dif} = perda de calor latente por difusão, em W/m^2 ;

E_{sw} = perda de calor latente por meio de suor regulatório, em W/m^2 ;

Equação de fluxo de calor do centro do corpo:

$$F_{c-sk} = v_b \cdot \rho_b \cdot c_b \cdot (t_c - t_{sk}) \quad (12)$$

Equação de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa

$$F_{sk-cl} = (t_{sk} - t_{cl}) / I_{cl} \quad (13)$$

onde:

F_{c-sk} : fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele, em W/m^2 ;

F_{sk-cl} = fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa, em W/m^2 ;

v_b : fluxo de sangue do centro do corpo para a pele (dependente de t_c e t_{sk}), em $L/s \cdot m^2$;

ρ_b : densidade do sangue, em kg/L ;

c_b : calor específico do sangue, em $W \cdot s / K \cdot kg$;

t_c : temperatura do centro do corpo, em $^{\circ}C$; t_{sk} = temperatura superficial da pele, em $^{\circ}C$;

t_{cl} = temperatura da superfície externa do corpo vestido, em °C; I_{cl} = resistência térmica da roupa ao calor sensível, em clo.

Segundo MONTEIRO (2018), o passo a passo para se calcular o PET é:

(1) cálculo das condições térmicas do corpo, temperatura da pele (t_{sk}) e temperatura do centro do corpo (t_c), por meio dos sistemas de equações do modelo de Munique, para uma dada combinação de parâmetros meteorológicos e pessoais; (2) inserção dos valores encontrados de temperatura da pele (t_{sk}) e temperatura do centro do corpo (t_c) no modelo de Munique, resolvendo-se o sistema de equações para achar a temperatura do ar (t_{ar}), considerando-se $t_{rm} = t_{ar}$; $v = 0,1$ m/s; $p_v = 12$ hPa; $M = 114$ W; $I_{cl} = 0,9$ clo; (c) a temperatura do ar encontrada é a temperatura equivalente fisiológica (PET).

PET (°C)	Thermal perception	Grade of physiological stress
<4.1	Very cold	Extreme cold stress
4.1–8.0	Cold	Strong cold stress
8.1–13.0	Cool	Moderate cold stress
13.1–18.0	Slightly cool	Slight cold stress
18.1–23.0	Comfortable	No thermal stress
23.1–29.0	Slightly warm	Slight heat stress
29.1–35.0	Warm	Moderate heat stress
35.1–41.0	Hot	Strong heat stress
>41.0	Very hot	Extreme heat stress

Figura 20: Faixas interpretativas PET. Fonte: Matzarakis ; Mayer H (1996)

3.8 Planos de ação voltados ao risco das ondas de calor

Há planos vigentes de adaptação climática, em sua maioria em países desenvolvidos, com o objetivo de reduzir os impactos gerados pelas mudanças do clima, que avançam na compreensão do tema e na implementação de medidas práticas que minimizem os impactos. Já no Brasil, houve pouco avanço no desenvolvimento de premissas adaptativas, sendo que, majoritariamente, as poucas medidas são ligadas à mitigação (DUARTE, 2019)

Devido aos riscos atrelados às ondas de calor, planos de ação, nos quais a vegetação tem um papel importante, estão sendo implementados em várias cidades do mundo . Alguns desses exemplos são:

- Em 2015, devido ao intenso calor e elevado número de mortes, Paris, entre outras medidas, colocou seus edifícios públicos condicionados artificialmente à disposição do público. A capital francesa equipou seus parques e praças com aspersores de água para amenizar o estresse térmico dos usuários e mapeou seus refúgios de calor. No ano de 2018 a capital francesa lançou o *Paris Action Plan*, um conjunto de medidas que objetivam minimizar a emissão de CO², expandir sua vegetação urbana, desenvolver o transporte limpo, utilizar energias renováveis, etc. A meta é atingir até 2050 o patamar de emissão zero de carbono. Em 2020 foi lançada uma versão mais atualizada do plano de adaptação que mantém o objetivo de zerar as emissões de gases de efeito estufa e, dessa vez essa versão tem como objetivo intensificar o processo todas as medidas do plano anterior



Figura 21: Inclusão do uso de água em espaços públicos de Paris. Fonte: MAIRIE DE PARIS (2018).

- Em 2018 Barcelona lançou um plano climático que mapeou a cidade apontando regiões mais sensíveis às ondas de calor, além da busca na redução da emissão de gases de efeito estufa. A cidade desenvolveu um sistema de alerta e monitoramento, com patrulhas especializadas para apoio na cidade, e planeja aumentar a quantidade e qualidade de infraestrutura verde e promover renovação energética e melhoria das condições térmicas de seus edifícios públicos e instalações. Além disso, Barcelona criou uma série de materiais de comunicação acessíveis à população sobre a expansão da arborização e os benefícios gerados pelos serviços ecológicos fornecidos por esta, para fomentar a participação de grupos no desenvolvimento das ideias, além da conscientização no modo de agir da população durante eventos de calor extremo.



Figura 22: Plano com o objetivo de ampliar a arborização e tornar a proporção de árvores igual à de habitantes no plano de arborização da cidade de Barcelona e isométrica de exemplo de arborização em quadra na cidade. Fonte: CIUDAD BARCELONA (2018).

- Em Queensland, na Austrália, foi implementado um sistema de monitoramento e alerta das ondas de calor. Em conjunto com esse sistema foram criados planos em duas etapas: 1-prevenção e preparação; 2-resposta e gerenciamento. A primeira etapa é composta por medidas que reduzem os efeitos do calor, incluindo o projeto de criar uma infraestrutura para condicionar maior preparo e apoio a eventos de ondas de calor, visando preparar e treinar comunidades e agências públicas para os eventos de calor, identificar grupos vulneráveis e informar medidas e perigos. A segunda etapa consiste no gerenciamento dos períodos de onda de calor, tais como preparar clínicas e hospitais, indicar locais de refúgio com temperatura controlada e manter alerta a população pelos canais de comunicação. A cidade de Queensland busca agora atingir o patamar de cidade com emissão zero de carbono.
- A Filadélfia, em 1995, criou um sistema de monitoramento e alerta das ondas de calor após uma forte onda de calor em nos dias 12 a 15 de julho, relacionando valores de temperatura com perigos à saúde (Philadelphia Hot Weather Watch Warming System - PWWS) (UN, 2015). Esse sistema se tornou bastante utilizado em outras localidades norte-americanas e mundiais.
- A cidade de Ahmedabad, na Índia, após sofrer com cerca de 1300 mortes relacionadas com os dias de calor intenso, tomou uma série de medidas como: alertar a população aos perigos do calor e orientar ações que visem a prevenção do aumento da mortalidade. Também houve a criação de sistemas de alertas interligados as instituições de saúde, segurança para tornar a resposta mais rápida e efetiva; desenvolver melhor capacidade e resposta do sistema de saúde frente às doenças

atreladas ao estresse térmico; e a criação de refúgios com temperaturas mais amenas para diminuir a exposição da população ao calor (AHMEDABAD MUNICIPAL CORPORATION, 2019).



Figura 23: Campanha em Ahmedabad exemplificando o efeito de coberturas de cor mais clara na temperatura interna das casas. Fonte Ahmedabad (2016).

- Buenos Aires, em 2020, lançou seu plano de adaptação climática preocupado também com os eventos climáticos extremos como as ondas de calor e outros eventos climáticos como, por exemplo, a intensidade das chuvas. Esse plano busca dentre outras iniciativas, expandir as áreas verdes, reduzir a emissão de gases de efeito estufa desenvolvendo melhor o transporte público e transporte de energia renovável, e tornar os edifícios mais eficientes energeticamente

City of Buenos Aires in numbers

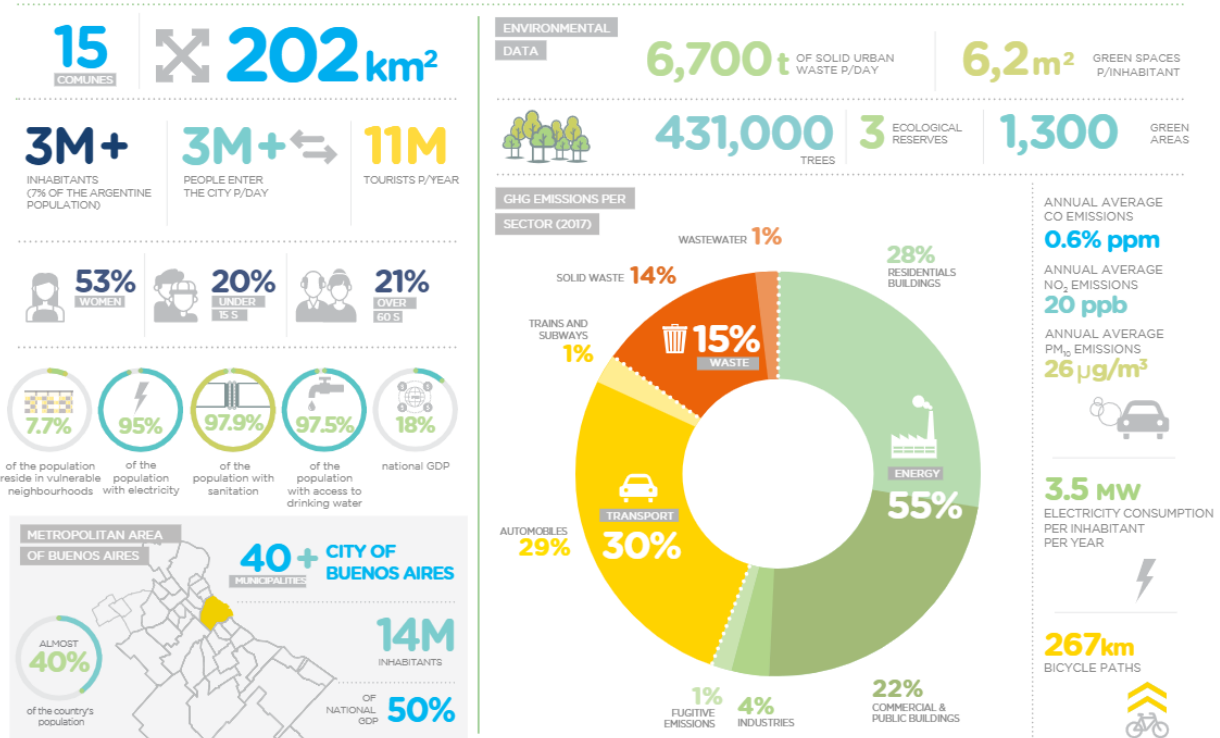


Figura 24: Infográfico com as principais diretrizes do plano de adaptação de Buenos Aires. Fonte: Buenos Aires (2021).

- Em São Paulo, em 2021, foi criado o PlanClima SP que ações, com apoio do C40 Cities, com o objetivo de diminuir o uso dos meios de transportes, aumentar a mobilidade ativa e zero emissões, incrementar a adoção de fontes energéticas renováveis em substituição aos combustíveis fósseis no transportes e nos estacionamentos residenciais, comerciais, institucionais e industriais, para iluminação, refrigeração, aquecimento da água e do ambiente, cocção; melhorar a eficiência energética de edificações e equipamentos; reduzir a geração e adequar os tratamentos de resíduos. O plano busca neutralizar as emissões de carbono até 2050.

4. Modelagem microclimática

4.1 O Modelo ENVI-met

Dentro do campo do clima urbano, as ferramentas de simulação numérica podem ser classificadas em dois tipos de acordo com os seus mecanismos: modelo de balanço energético (MBE) e dinâmica de fluidos computacional (DFC), baseada nas equações de dinâmica de fluidos e conservação de massa, momentum e energia. O MBE é principalmente para estudos em grande escala (ou seja, à escala da cidade), uma vez que aproxima a complexidade dos edifícios dentro de grids limitados e aplica geometria homogênea para toda a cidade. Devido às ausências de velocidade do ar, o MBE não consegue reproduzir as interações entre a velocidade do ar e os campos de temperatura; por esse motivo, não é indicado para os estudos microclimáticos (MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2010).

Por outro lado, o DFC fornece informações de forma mais detalhada e precisa a respeito de dados térmicos relevantes, velocidade do ar, radiação, sendo assim uma ferramenta poderosa em escalas microclimáticas para o consumo energético dos edifícios e conforto térmico ao ar livre (JAMEI et al, 2010). Entre todos os modelos baseados no DFC, o ENVI-met é uma das ferramentas mais utilizadas dentro múltiplos contextos climáticos e para diferentes formas urbanas com características diversificadas em edifícios e espaços verdes (TSOKA et al, 2018).

O ENVI-met foi concebido para simular interações complexas de atmosfera-vegetação-superfície em alta resolução, com resolução de 0,5m a 10m, utilizando equações de modelos de turbulência e equações de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) (BRUSE, 2008).

O ENVI-met é, de maneira geral, dividido em duas partes: o modelo limite 1D e o modelo 3D core. O Modelo 3D core inclui distintas estruturas, para modelar e simular a atmosfera, edifícios, perfis de solo e vegetação. Por causa da alta resolução no ENVI-met, cobrindo apenas a *urban canopy layer*, são necessárias condições meteorológicas estáveis nos seus limites para as bordas verticais e horizontais. Essas condições limites são fornecidas pelo modelo limite 1D. Portanto, os parâmetros de entrada como latitude, longitude e data são utilizados para calcular a radiação incidente. Juntos com parâmetros de velocidade do vento horizontal e direção a 10 metros de altura, rugosidade, umidade específica a 2500 metros de altura, temperatura do ar e umidade relativa do ar a 2m, os perfis verticais para a horizontalidade homogênea da camada limite 1D é criada. Para esse propósito, o modelo 1D é integrado com o tempo até que os parâmetros de perfis verticais alcancem um estado quase

estacionário (BRUSE, 1999). Para obter condições atmosféricas laminares, esse modelo 1D se estende até uma altitude de 2500 metros, o qual é a média de altura da camada limite planetária. Os perfis verticais gerados (temperatura, umidade específica do ar, vetor de vento, turbulências) são levados até os limites do modelo 3D core (KROPP, 2018).

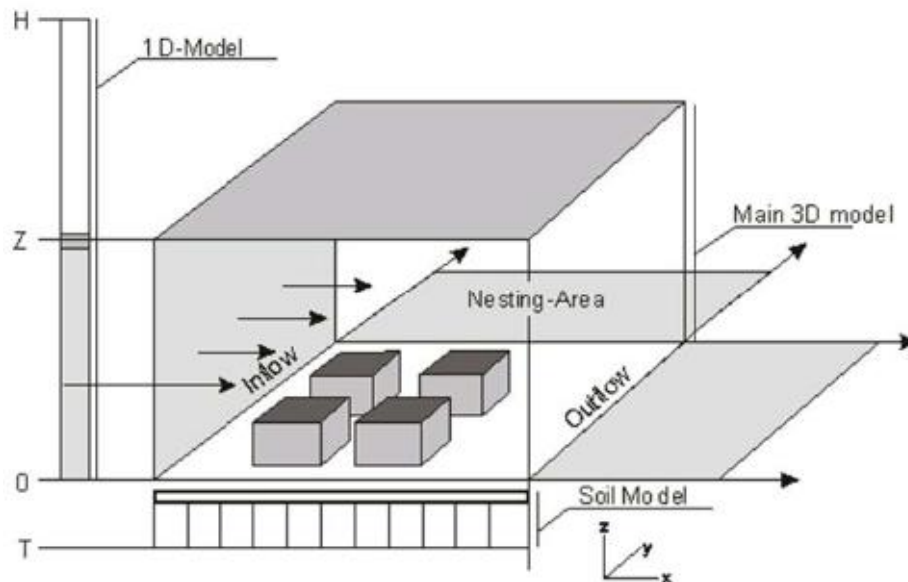


Figura 25: Ilustração esquemática de funcionamento do ENVI-met e seus modelos. Fonte: Kropp (2016).

Assim, os valores calculados ou definidos pelo usuário dentro do modelo limite 1D são copiados para as bordas dentro de condições limites “forçadas”. O modo “forçado”, *forcing*, permite simular, de maneira explícita, cenários fictícios meteorológicos. Os parâmetros meteorológicos necessários para modelar o perfil 1D podem ser originários de medições, modelos climáticos maiores (*downscaling*) ou a reanálise de dados (SIMON, 2016). As forçantes aumentam a comparabilidade e o nível de detalhes nos parâmetros que derivam de dados climáticos de um dia real, onde a interdependência climática de todos os componentes como radiação, temperatura, umidade e velocidade do vento são naturalmente harmonizadas. Se esses dados estão disponíveis, utilizar condições limites forçadas pode trazer um grande benefício. Em contraste, se alguns parâmetros estão faltando dentro de uma base de dados, ou se a base de dados não está harmonizada, pode haver imprecisões nos resultados (KROPP, 2018).

O ENVI-met tem recursos únicos; possui um modelo tridimensional de solo, alcançando profundidades de 5m, e a célula de atmosfera mais baixa é dividida em 5 pequenas células para melhor representar os processos próximos à superfície. Além disso, o modelo de

vegetação implementado é preciso. Trocas de fluxos entre vegetação e atmosfera são calculadas usando parâmetros como temperatura da folha, radiação fotoativa, disponibilidade de água, fixação de carbono da planta e gradiente de vapor de água entre a folha e a atmosfera (SIMON, 2016).

Recentemente foram introduzidas atualizações que permitem maior precisão nas simulações do ENVI-met. Na versão 4.0, um módulo de vegetação 3D foi adicionado com intuito de mimetizar a geometria complexa da vegetação. Nessa mesma versão, foi adicionado o módulo *full forcing* onde é possível inserir dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, cobertura de nuvens e radiação solar. Por fim, foi adicionado um módulo onde é possível editar os materiais das construções (fachada e cobertura), onde é possível editar propriedades físicas, incluindo o albedo, absorção e calor específico (TSOKA et al, 2018).

4.2 O modelo Envi-met e a vegetação

O ENVI-met tem sido amplamente aplicado para investigar os impactos da vegetação urbana no microclima, especificamente para três tipologias de infraestruturas verdes: árvores, paredes verdes e coberturas verdes (TSOKA et al, 2022).

Uma das chaves para o ENVI-met ser largamente utilizado para analisar o efeito da vegetação é o fato dele incluir um sofisticado modelo para simular o comportamento estomatal da vegetação como resposta do microclima, quantidade de CO² e nível de estresse hídrico (ENVI-MET, 2019). A condutância estomatal é utilizada para estimar o comportamento de folhas individuais levando-se em consideração as condições microclimáticas da planta como um todo. A principal suposição do modelo é que as plantas operam sua condutância estomatal de forma a maximizar os ganhos de CO² associados à mínima perda de água (JACOBS, 1994). De maneira empírica, a condutância estomática, relacionada à perda de água, está relacionada com o processo de fotossíntese, ou seja, a absorção de CO² (SIMON, 2018). A equação a seguir corresponde a equação de Jacobs (1994) para condutância estomática:

$$g_s = 1,6 \frac{A_n}{c_s - c_i} \quad (14)$$

Onde:

An= taxa de fotossíntese.

1,6 corresponde à diferença de difusividade entre o CO² e H²O no ar.

Cs e Ci são as concentrações de CO² na superfície da folha e dentro desta

A unidade de gs é (mms⁻¹)

A equação a seguir corresponde a resistência estomática, o inverso de gs.

$$r_s = \frac{1}{g_s} * 1000 \quad (15)$$

Onde:

rs é resistência estomática.

gs é a condutância estomática.

Portanto, o ENVI-met é capaz de avaliar certas condições de vitalidade da vegetação, tais como o suprimento de água pelo solo, taxa de transpiração das plantas e temperatura das folhas. Utilizando essa relação, o cálculo das taxas de fotossíntese permite que o modelo calcule o comportamento dos estômatos da planta. Entre outros parâmetros, o modelo de comportamento estomatal do ENVI-met leva em consideração os seguintes fatores que limitam o fluxo de fotossíntese e a condutância estomatal (SIMON, 2018):

- Radiação fotossintética ativa insuficiente
- CO² atmosférico insuficiente
- Umidade do solo e acesso à água insuficientes

Todas as interações ambiente-planta calculadas ao nível da folha individual são agregadas e transferidas de volta para a planta associada, permitindo a análise baseada em objetos do acesso à água e vitalidade de uma planta. Adicionalmente, foi introduzido um modelo de raiz tridimensional que permite o cálculo de um abastecimento de água com base para cada organismo vegetal. Fazendo uso destes avanços, as avaliações dos parâmetros da planta como aglomerados e agregados de densidade de área foliar e densidade de área radicular podem agora ser realizadas (SIMON, 2016).

Para se verificar o efeito do microclima sobre a vegetação, Simon (2016), ao estudar três exemplos de árvores em condições de implantação diferentes de localização, utilizando o modelo microclimático ENVI-met, demonstra o efeito do microclima sobre as plantas e também como diferentes situações podem impactar em seus processos metabólicos e sua vitalidade, tais como o fluxo latente, a disponibilidade de água, a temperatura das folhas e a velocidade do vento. Uma baixa velocidade de vento aumenta a resistência aerodinâmica nas

folhas e reduz a troca de CO² e água massivamente. Os dados gerados pela simulação foram, então, comparados com os dados coletados em campo e verificou-se boa precisão nos dados simulados (Figura 26).

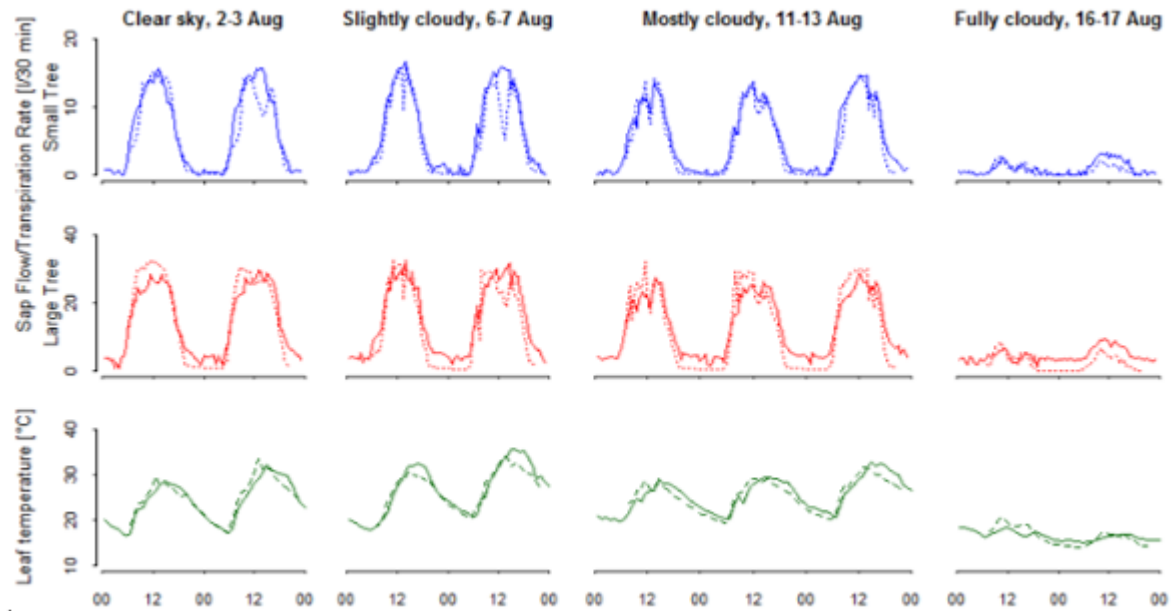


Figura 26: Comparações realizadas por SIMON (2016) de valores coletados de campo e valores simulados de fluxo de seiva e temperatura da folha no ENVI-met. Fonte: Simon (2016).

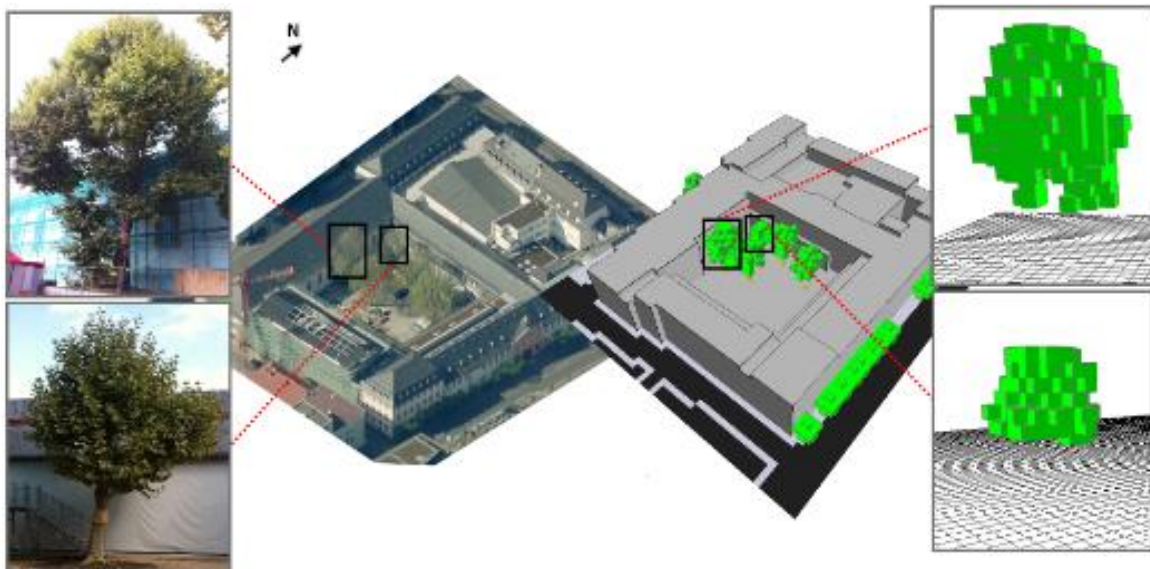


Figura 27 :Área de estudo e seu modelo tridimensional com vegetação no ENVI-met. Fonte: Simon (2016).

Dentro desse mesmo estudo, Simon (2016) retrata o efeito da quantidade de água no solo e indica que, mesmo com níveis de umidade do solo elevados, os valores de temperatura da folha ainda podem atingir números elevados. Em suas simulações no ENVI-met, esses valores atingiram valores máximos próximos dos 40 °C. O fator que trouxe maiores diferenças nos valores de temperatura da folha foi o tamanho das árvores em seus modelos: árvores maiores possuem temperaturas foliares significativamente menores do que árvores menores pelo fato das raízes atingirem camadas mais profundas e com maiores ofertas de água.

Simon (2016) demonstra que o modelo ENVI-met é capaz de avaliar certos parâmetros de vitalidade vegetal nas simulações, já que é capaz de simular com precisão dados de transpiração e temperatura de folha, que são dados relacionados à saúde vegetal.

5. Material e Método

Para modelar o as simulações no ENVI-met dentro do contexto da cidade de São Paulo e dentro de diferentes cenários climáticos, foram necessários levantamentos de dados para embasar a modelagem das simulações. Foi necessário o levantamento de informações a respeito da morfologia urbana da capital paulista por meio dos Local Climate Zones (LCZ); levantamentos de dados climáticos de Shinzato et al (2019) para modelagem de simulações sob condições climáticas atuais; levantamento de dados climáticos de projeções climáticas futuras dentro da plataforma Projeta CPTEC/INPE para modelagem de simulações dentro de cenários climáticos futuros; levantamento de dados de vegetação do Manual Técnico de Arborização Urbana da Cidade de São Paulo, dados transmitidos pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato, foram realizadas medições de LAI em campo utilizando o método não destrutivo por meio de fotos hemisféricas; levantamento de dados de materiais construtivos de Gusson (2020) .

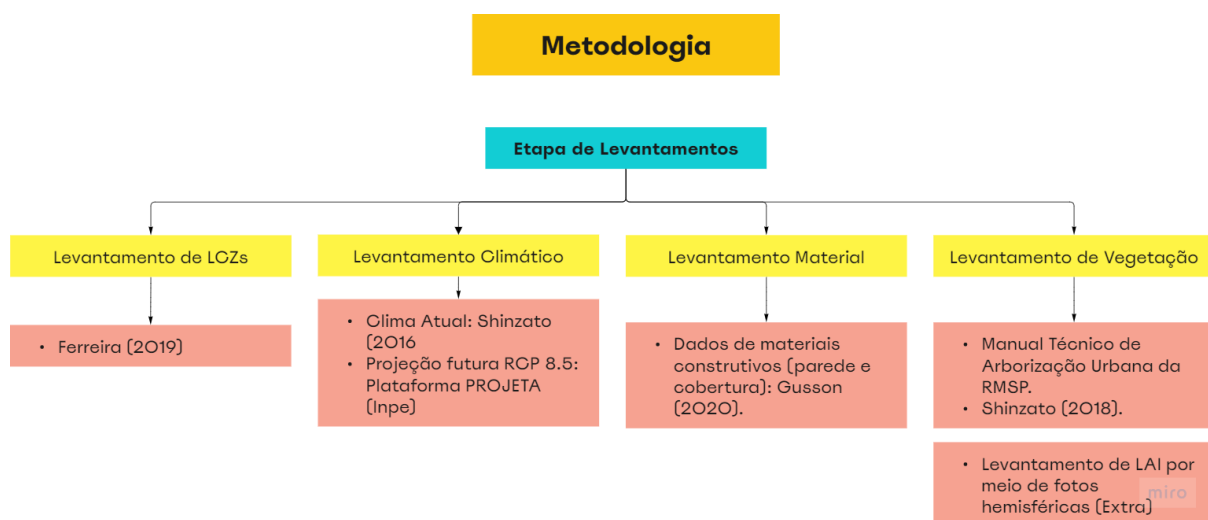


Figura 28: Fluxograma metodológico da pesquisa: Etapa de levantamentos. Fonte: Autor

Com dados em mãos, foi possível modelar no ENVI-met três cenários climáticos dentro de três diferentes Local Climate Zones que correspondem as três principais tipologias da cidade de São Paulo (LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8) com a presença e ausência da vegetação. O tipo de vegetação escolhida nesta pesquisa foi a arborização viária. Um total de 22 simulações foram realizadas para quantificar o efeito da vegetação dentro de diferentes cenários climáticos (atual e projeção climática futura), também foram realizadas comparações de resultados de simulações utilizando diferentes valores de LAD nas árvores para comparar diferenças entre simulações com LAD medido e calculado em campo com $LAD=1m^2/m^3$.

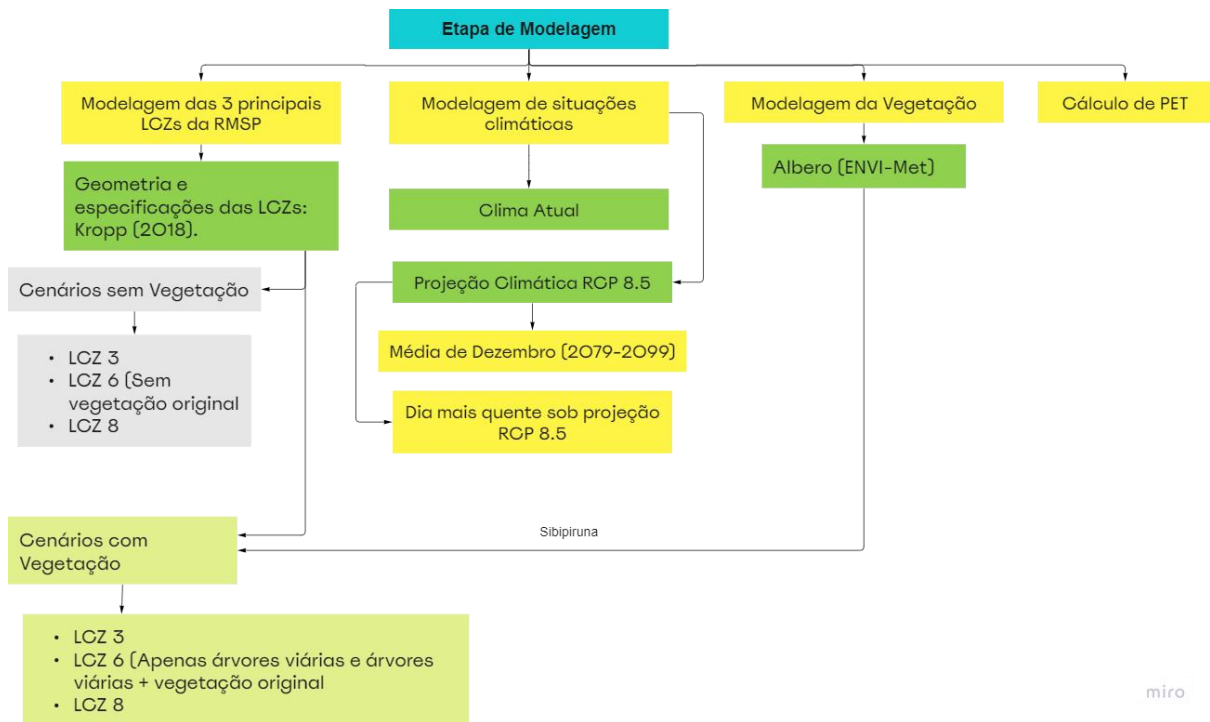


Figura 29: Fluxograma metodológico da etapa de modelagem. Fonte: Autor

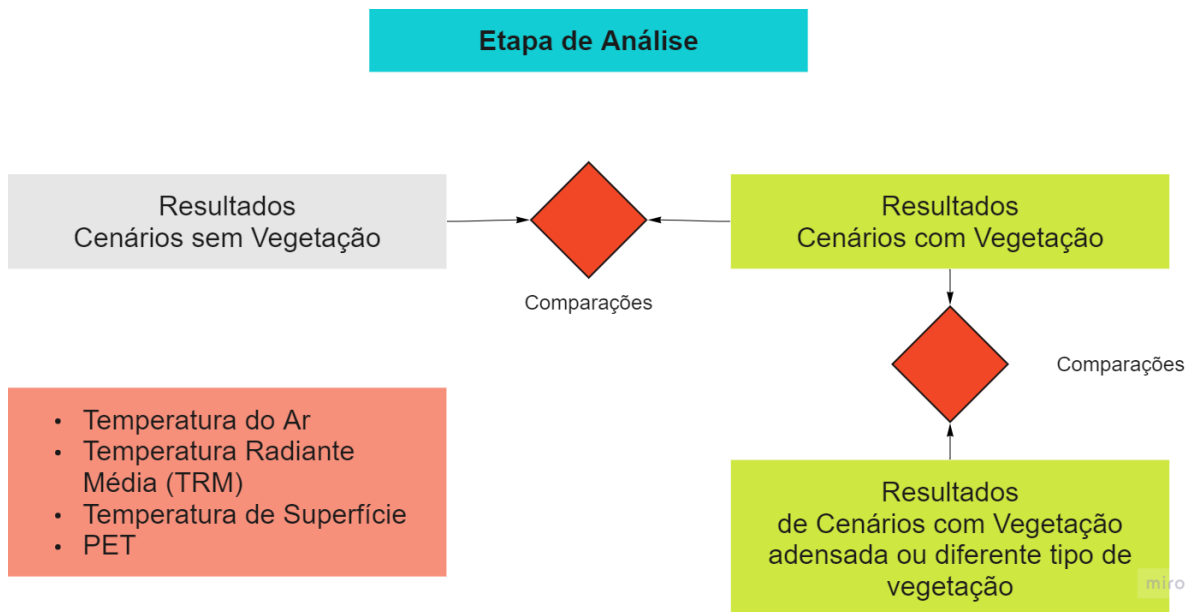


Figura 30: Fluxograma metodológico da etapa de análise. Fonte: Autor.

5.1 Levantamento de dados da morfologia urbana

5.1.1 Local Climate Zone (LCZ)

Segundo Stewart e Oke (2012), as Local Climate Zones (LCZ) podem ser definidas como regiões de cobertura de superfície uniforme em questão de estrutura, material e humana. As

LCZs se estendem a centenas de metros até vários quilômetros na escala horizontal. As LCZs configuram um sistema de classificação capaz de analisar a morfologia e o microclima urbano.

Desde sua introdução em 2012, as LCZ emergiram como um novo padrão para caracterizar as paisagens urbanas, propondo uma classificação holística que leva em consideração a cobertura dentro da microescala, associada com propriedades físicas (DEMUZERE et al, 2021).

As LCZ são organizadas em 17 classes, 10 das quais podem ser consideradas urbanas, tratando-se, assim, de um sistema originalmente designado para promover um melhor entendimento para os estudos a respeito da ilha de calor urbana, permitindo a padronização da observação da temperatura urbana (STEWART; OKE, 2012). Cada LCZ é definida por diversas variáveis (Figura 31) tais como *Building plan fraction*; *Impervious plan fraction*; *Canyon aspect ratio*; *Sky view factor*; *Mean height of roughness elements*; *Thermal admittance of system*; *Antropogenic heat flux density*.

A Figura 31 e Figura 32 a seguir apresentam as especificidades e características de cada LCZ:

Local Climate Zone	Building plan fraction ⁽¹⁾ , λ_b (%)	Impervious plan fraction ⁽²⁾ , λ_i (%)	Canyon aspect ratio ⁽³⁾ , $\lambda_s = H/W$	Sky view factor, ψ_{sky}	Mean height of roughness elements, z_H (m)	Thermal admittance ⁽⁴⁾ of system, μ ($J m^{-2} s^{-1/2} K^{-1}$)	Anthropogenic heat flux density ⁽⁵⁾ , Q_F ($W m^{-2}$)
LCZ 1 Compact high-rise	40–60	40–60	> 2	0.2–0.4	> 25	1,500–1,800	50–300
LCZ 2 Compact midrise	40–70	30–50	0.75–2	0.3–0.6	10–25	1,500–2,200	< 75
LCZ 3 Compact lowrise	40–70	20–50	0.75–1.5	0.2–0.6	3–10	1,200–1,800	< 75
LCZ 4 Open high-rise	20–40	30–40	0.75–1.25	0.5–0.7	> 25	1,400–1,800	< 50
LCZ 5 Open midrise	20–40	30–50	0.3–0.75	0.5–0.8	10–25	1,400–2,000	< 25
LCZ 6 Open lowrise	20–40	20–50	0.3–0.75	0.6–0.9	3–10	1,200–1,800	< 25
LCZ 7 Lightweight lowrise	60–90	< 20	1–2	0.2–0.5	2–4	800–1,500	< 35
LCZ 8 Large lowrise	30–50	40–50	0.1–0.3	> 0.7	3–10	1,200–1,800	< 50
LCZ 9 Sparsely built	10–20	< 20	0.1–0.25	> 0.8	3–10	1,000–1,800	< 10
LCZ 10 Heavy industry	20–30	20–40	0.2–0.5	0.6–0.9	5–15	1,000–2,500	> 300

Figura 31: Propriedades típicas encontradas dentro da série das LCZs construídas. Uma tabulação completa de todas as classes LCZ incluindo propriedades encontradas por Stewart e Oke (2012).

Fonte: Oke et al (2017).

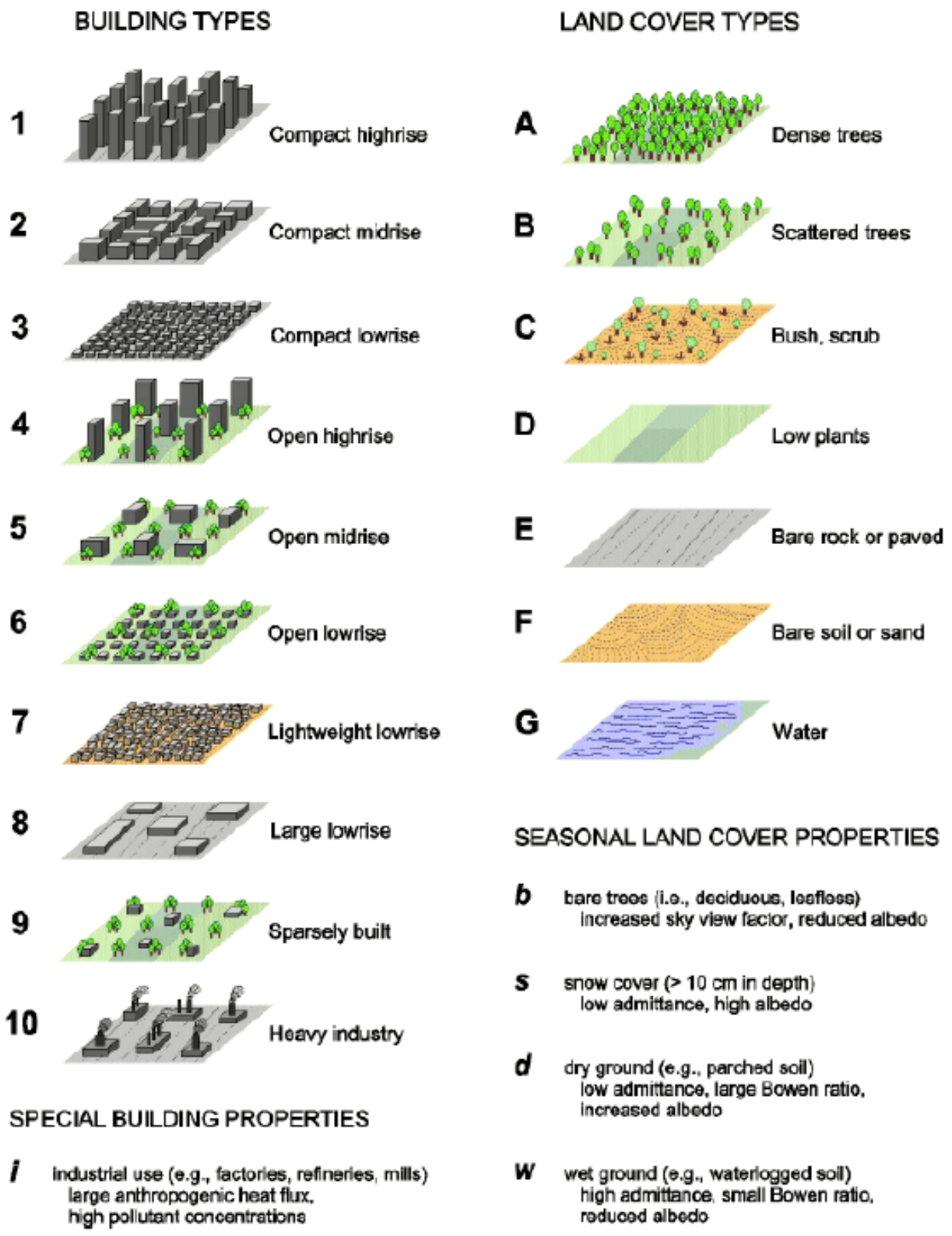


Figura 32: Classes de LCZ. Fonte: Stewart e Oke (2012).

5.1.2 Principais LCZs da RMSP

Essa pesquisa utilizou dados mapeados de LCZ elaborados por Ferreira (2019)⁷ para a Região Metropolitana de São Paulo - RMSP, por meio de imagens de satélite LANDSAT⁸, com áreas de treinamento a partir do Google Earth e utilização do classificador *Local Climate Zones Classification*. Essa é a metodologia de Bechtel et al (2015), proposta, na época, pelo *World Urban Database and Access Portal Tool (WUDAPT)*⁹.

Os dados originais de Ferreira (2019) foram então processados para este trabalho por meio do software de geoprocessamento QGIS (Quantum GIS)¹⁰, permitindo, assim, visualizar a distribuição, identificar as principais LCZs existentes na cidade de São Paulo e quantificar o tamanho destas dentro do município.

Como resultado desse processamento foi identificada a predominância das LCZ 3 (40%), LCZ 6 (14,5%) e LCZ 8 (16,1) (Figura 33) dentro das tipologias construídas na malha urbana da cidade de São Paulo que, juntas, correspondem a cerca de 70% das áreas construídas na cidade de São Paulo.

⁷ Pesquisa de doutorado de Luciana Schwandner Ferreira, realizada no LABAUT, sob orientação da Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte, financiada pela FAPESP 15/17360-5 vinculada ao projeto 2016/02825-5). Disponível em <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-02102019-173844/pt-br.php> Acesso em agosto de 2022.

⁸ LANDSAT é a nomenclatura de um programa de satélites de observação da Terra de origem Norte-americana. A série teve início na segunda metade da década de 1960, a partir de um projeto desenvolvido pela Administração Nacional de Aeronáutica e Espaço (NASA), sendo dedicado exclusivamente à observação dos recursos naturais terrestres. Esse programa foi inicialmente denominado ERTS (*Earth Resources Technology Satellite*) e, em 1975, passou a se chamar Landsat.

⁹ O projecto *World Urban Database and Access Portal Tools* é um projeto aberto à comunidade para reunir informações de *Local Climate Zones* de cidades de todo o mundo. Mais informações: <https://www.wudapt.org/>.

¹⁰ QGIS é um software livre, com código-fonte aberto, multiplataforma de sistema de informação geográfica que permite a visualização, edição e análise de dados georreferenciados. Disponível em: <https://www.qgis.org>. Acesso em janeiro de 2021.

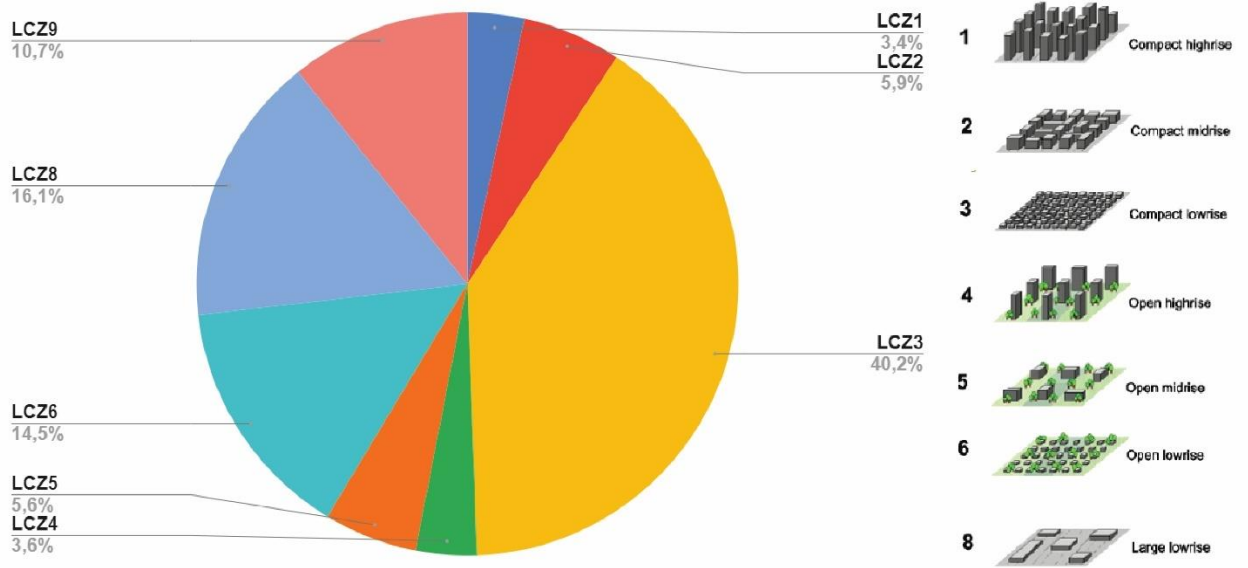


Figura 33: Porcentagens das LCZ construídas na cidade de São Paulo

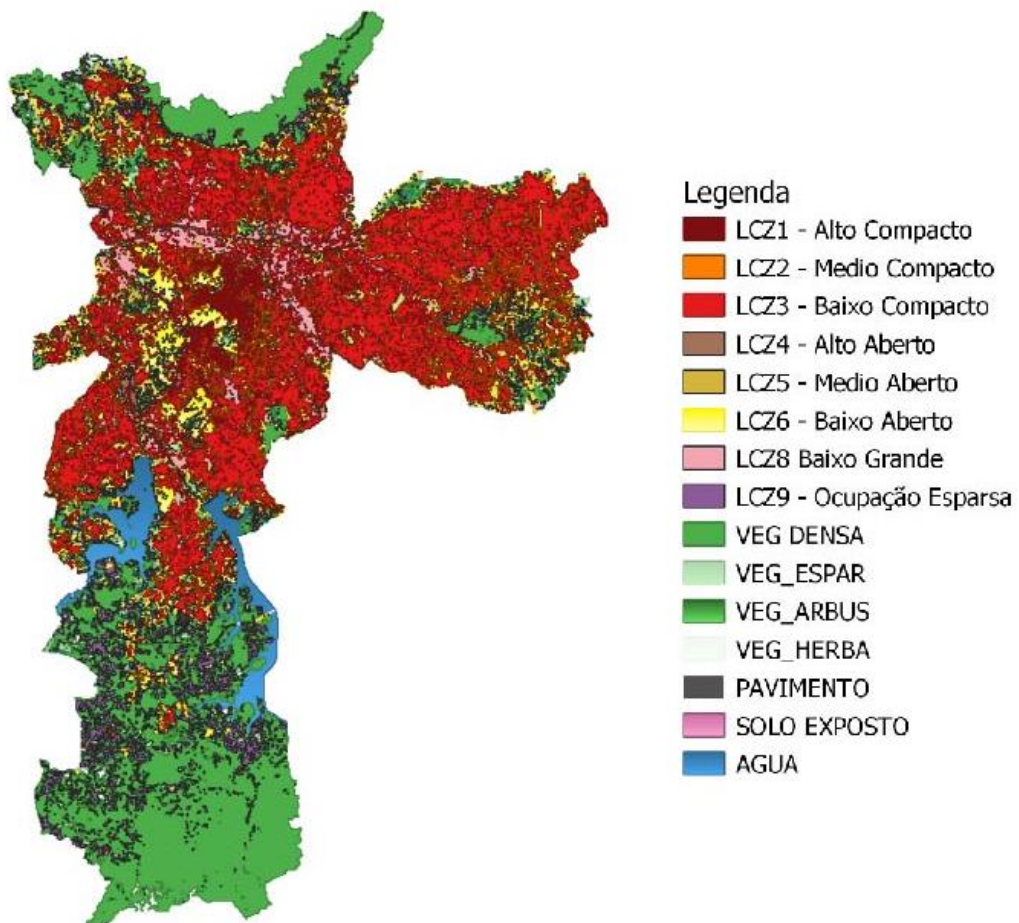


Figura 34: Distribuição das LCZs dentro do município de São Paulo. Fonte: editado pelo autor a partir de Ferreira (2019).

As 3 principais LCZs encontradas na cidade de São Paulo são:

1. **LCZ 3 (baixo-compacto)** - Edifícios densos e mistos de 1 a 3 andares, lotes e quadra com pouca ou nenhuma arborização. Segundo Stewart; Oke (2017), a superfície do solo é majoritariamente impermeabilizada por concreto e asfalto (nas vias) e os principais materiais encontrados são: materiais de construção, pedras, tijolos, azulejos.



Figura 35: LCZ 3 – baixo-compacto - Pinheiros. Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.

2. **LCZ 6 (baixo-aberto)** - Arranjos abertos de edifícios baixos com cerca de 1 a 3 andares. Predomina nessa tipologia o solo permeável e coberto por vegetação rasteira e arborização dispersa. Segundo Stewart; Oke (2012), os materiais principais dessa tipologia são materiais de construção (tijolo, concreto, madeira, azulejos).



Figura 36: Jardim Europa - LCZ 6 – baixo-aberto. Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.

3. **LCZ 8 (baixo-grande)** - Arranjos de edifícios largos e baixos com cerca de 1 a 3 andares de altura, pouca ou nenhuma arborização. De acordo com Stewart; Oke (2012), grande parte do solo está impermeabilizado e os materiais principais presentes são concretos, metal, pedras e materiais de construção.

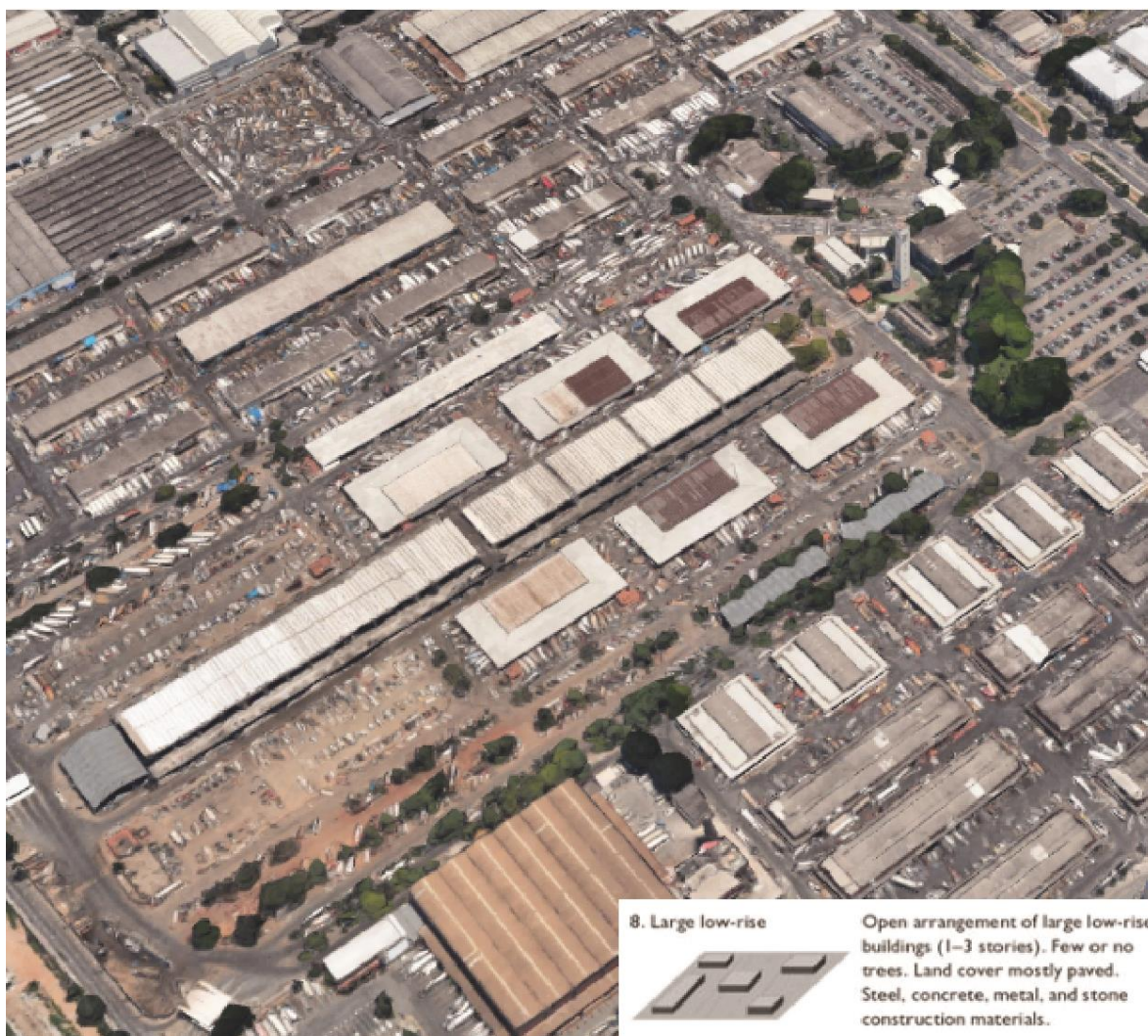


Figura 37: LCZ 8 - CEAGESP – baixo-grande . Fonte: imagem editada do Google Earth e de Oke et al (2017), pelo autor.

5.2 Levantamento de dados microclimáticos

Para as simulações de contexto climático atual, foram utilizados dados microclimáticos de Shinzato et al. (2019)¹¹ que correspondem a um dia quente, observado durante a pesquisa. Esses dados foram coletados *in loco* utilizando-se estações meteorológicas Campbell na região do Parque Trianon (Parque Tenente Siqueira Salles) em vários períodos entre 2016 e 2018 nos quais este autor também participou, na época, como bolsista de Iniciação científica.

¹¹ Pesquisa de pós-doutorado realizada no LABAUT, sob orientação da Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte e financiada pela FAPESP (16/01204-7), vinculada ao projeto 2016/02925-5. Os dados de radiação foram gentilmente cedidos pelo Prof. Dr. Amauri Pereira de Oliveira, do Laboratório de Micrometeorologia – LabMicro, do IAG.

Essas estações meteorológicas são equipadas com: tripé (TW Tripod/ Mast Assembly 1,5m), datalogger (Measurement and Control Datalogger CR800-ST-SW-NC), e os sensores: direção e velocidade do vento (Gill 2-D Sonic Wind WINDSONIC1-L24 a 1,5m dos solo), termohigrômetro (Vaisala Temperature/RH HMP45C-L12), piranômetro (Kipp & Zonen Pyranometer W / Sun Shield CMP3-L12, Solar Sensor Mounting Stand CM22), sensor de temperatura de solo (Temp Probe 108-L12) e globo cinza com sensor de temperatura (Hobo TMCx-HD).

Os dados de Shinzato et al (2019) permitem, no ENVI-Met, a configuração *full forcing* da simulação, o modo que traz melhor precisão nas simulações no modelo. Nesse sentido, esses dados foram inseridos nas simulações como forçantes e correspondem a dados de radiação direta, radiação indireta, temperatura do rr, umidade relativa do ar, velocidade do vento, direção do vento e precipitação.

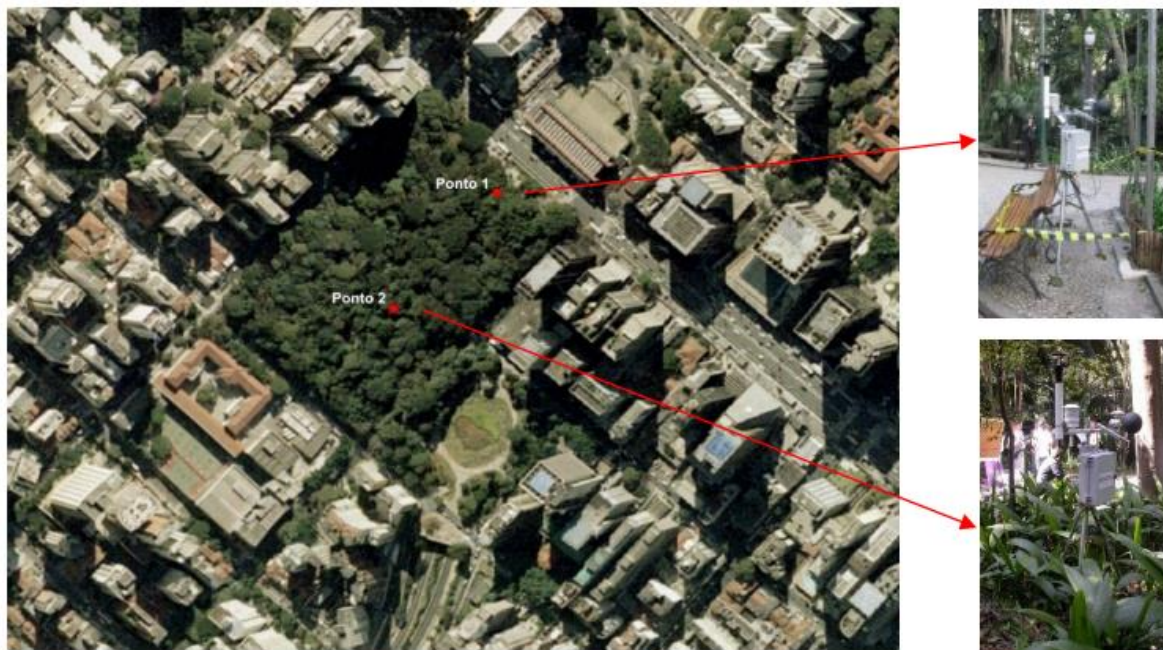


Figura 38: Localização das estações meteorológicas no Parque Trianon Fonte: Shinzato et al (2019).

Data	Hora	Radiação Global (kWh/m²)	Radiação Difusa (kWh/m²)	Radiação Direta (kWh/m²)	Temperatura (°C)	Umidade (%)	Velocidade (km/h)	Direção do Vento	0
03/04/2016	05:00:00	0	0	75.303	294.1	85.9	1.5	135	0
03/04/2016	05:30:00	0	0	362.222	293.7	100	1.5	135	0
03/04/2016	06:00:00	4.945	30.647	364.451	293.6	100	1.5	135	0
03/04/2016	06:30:00	9.294	102.532	367.777	293.4	100	1.5	135	0
03/04/2016	07:00:00	13.642	174.417	371.103	293.5	100	1.5	135	0
03/04/2016	07:30:00	149.509	158.145	564.145	293.5	91.7	1.5	135	0
03/04/2016	08:00:00	285.375	141.873	386.083	293.8	87.5	1.5	135	0
03/04/2016	08:30:00	408.068	112.52	395.768	294.4	83.1	1.5	135	0
03/04/2016	09:00:00	530.76	83.167	405.452	295	79.1	1.5	135	0
03/04/2016	09:30:00	594.035	84.938	413.98	295.9	74.9	1.5	135	0
03/04/2016	10:00:00	657.309	86.709	422.508	297.2	67.2	1.5	135	0
03/04/2016	10:30:00	635.117	133.104	424.57	298.2	62.2	1.5	135	0
03/04/2016	11:00:00	612.925	179.498	426.632	300.7	51.5	1.5	135	0
03/04/2016	11:30:00	561.654	195.676	432.8	301.2	49.3	1.5	135	0
03/04/2016	12:00:00	510.382	211.854	438.967	301.8	44.6	1.5	135	0
03/04/2016	12:30:00	441.333	212.649	400.12	302.7	42.8	1.5	135	0
03/04/2016	13:00:00	372.283	213.444	361.272	302.7	38.9	1.5	135	0
03/04/2016	13:30:00	383.374	204.369	388.753	303.6	39.2	1.5	135	0
03/04/2016	14:00:00	394.465	195.294	416.234	302.9	38.2	1.5	135	0
03/04/2016	14:30:00	284.773	148.784	420.861	302.7	40.2	1.5	135	0
03/04/2016	15:00:00	175.08	102.274	425.487	303.2	40.5	1.5	135	0
03/04/2016	15:30:00	117.953	77.768	413.382	303.2	40.5	1.5	135	0
03/04/2016	16:00:00	60.825	53.261	401.276	303.3	40.9	1.5	135	0
03/04/2016	16:30:00	38.506	34.439	400.083	303	49.3	1.5	135	0
03/04/2016	17:00:00	16.187	15.617	398.889	301.9	55.8	1.5	135	0
03/04/2016	17:30:00	0	0	392.153	301.1	61	1.5	135	0
03/04/2016	18:00:00	0	0	385.417	300.2	63.8	1.5	135	0
03/04/2016	18:30:00	0	0	379.99	299.8	62.8	1.5	135	0
03/04/2016	19:00:00	0	0	374.562	299.4	62	1.5	135	0
03/04/2016	19:30:00	0	0	371.74	298.9	66.1	1.5	135	0
03/04/2016	20:00:00	0	0	368.917	298.5	65.4	1.5	135	0
03/04/2016	20:30:00	0	0	367.956	298.4	66.6	1.5	135	0
03/04/2016	21:00:00	0	0	366.995	298	66	1.5	135	0
03/04/2016	21:30:00	0	0	366.128	297.8	66.3	1.5	135	0
03/04/2016	22:00:00	0	0	365.261	297.9	65.8	1.5	135	0
03/04/2016	22:30:00	0	0	363.484	297.7	67.3	1.5	135	0
03/04/2016	23:00:00	0	0	361.707	297.5	66.8	1.5	135	0
03/04/2016	23:30:00	0	0	359.27	297.2	68.5	1.5	135	0
03/04/2016	00:00:00	0	0	356.832	297	68	1.5	135	0
03/04/2016	00:30:00	0	0	355.41	297	67.2	1.5	135	0
03/04/2016	01:00:00	0	0	353.988	296.8	69.5	1.5	135	0
03/04/2016	01:30:00	0	0	353.571	296.5	69.6	1.5	135	0
03/04/2016	02:00:00	0	0	353.153	296.4	70.4	1.5	135	0
03/04/2016	02:30:00	0	0	356.169	296.3	70.7	1.5	135	0
03/04/2016	03:00:00	0	0	359.185	296.1	71.6	1.5	135	0
03/04/2016	03:30:00	0	0	359.988	295.9	72.7	1.5	135	0
03/04/2016	04:00:00	0	0	360.79	295.9	72.9	1.5	135	0
03/04/2016	04:30:00	0	0	359.818	295.8	72	1.5	135	0
03/04/2016	05:00:00	0	0	358.845	295.6	73.5	1.5	135	0

Tabela 2: Dados microclimáticos medidos no Parque Trianon em 2016. Fonte: Dados fornecidos pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato.

5.3 Levantamento de dados de projeções climáticas futuras

Para as projeções climáticas futuras foram utilizados os dados da Plataforma Projeta¹² CPTEC/INPE, um banco de dados do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) que possui informações de projeções climáticas futuras para o RCP 4.5 e RCP 8.5 de acordo com vários modelos climáticos, contando com dados de diferentes resoluções e modelos.

A plataforma PROJETA foi desenvolvida no contexto do Programa Políticas sobre Mudança do Clima (PoMuC) pelo governo brasileiro, coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, dentro da Cooperação para Desenvolvimento Sustentável Brasil-Alemanha, na Iniciativa Internacional de Proteção do Clima (IKI) do Ministério Federal do Meio Ambiente, Proteção da Natureza, Construção e Segurança Nuclear (BMUB), da Alemanha. Esse projeto conta com o apoio técnico da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.

Ela tem como objetivo automatizar o processo de extração, visualização e disponibilização dos dados de simulações regionalizadas das projeções climáticas futuras para o Brasil, gerados pelo CPTEC/INPE, e

disponibiliza projeções climáticas a partir dos modelos MIROC5 e HADGEM2-ES para os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, correspondentes ao período de janeiro de 2006 até janeiro de 2099.

A plataforma PROJETA CPTEC/INPE conta com diversos tipos de modelos climáticos, diferentes resoluções e abrange todo o território nacional. A coleta de dados do PROJETA/INPE foi realizada de acordo com o sugerido por Diniz (2019)¹³; dentro da plataforma, optou-se pelo modelo de projeção climática HADGEM2-ES-sudeste com resolução de 5km, a maior resolução existente dentro do modelo, para o cenário climático RCP8.5, município de São Paulo.

¹² Mais informações: <https://projeta.cptec.inpe.br/#/about>

¹³ Informação passada oralmente pela pesquisadora meteorologista Fernanda Rodrigues Diniz, bolsista FAPESP (número do processo: 2019/09879-1), orientanda do Prof. Dr. Fábio Luiz Teixeira Gonçalves (USP/IAG/DCA) que utiliza a mesma plataforma como base para o desenvolvimento de seu Doutorado, "Mortalidade de idosos relacionada às ondas de calor nas capitais do Brasil: Uma análise no presente e projeções futuras nos cenários das mudanças climáticas".

Foram extraídos os dados de temperatura do ar a 2m (TR2M) e umidade relativa do ar dentro (UR) para o intervalo de tempo de 2006 até 2099.

Cenário Climático:	HADGEN2-ES
Variáveis coletadas:	Temperatura do Ar (2m) (valores horários); Umidade relativa do ar (UR%) (valor médio diário)
Localização:	Município de São Paulo
Data Inicial	01/01/2006
Data Final	01/01/2099
Formato de arquivo	.csvz

Tabela 3: Dados extraídos da plataforma Projeta Inpe.

Para as condições microclimáticas no ENVI-met, são necessários dados horários de temperatura do ar e umidade relativa do ar para poder configurar a simulação no modo *simple forcing*; no entanto, nenhum dos dados do Projeta CPTEC/INPE está neste formato.

O Projeta CPTEC/INPE conta com dados em diversos intervalos de tempo, de dados horários até dados anuais, variando sua disponibilidade conforme a variável solicitada. No caso da temperatura do ar, os dados existentes com menor intervalo de tempo são de 3 em 3 horas. Quanto à umidade relativa do ar, o menor intervalo de tempo corresponde às médias diárias de umidade relativa do ar.

Por esse motivo, para incorporação dessas variáveis no ENVI-met, foi necessária uma adequação desses dados. Foram realizadas interpolações nos valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar¹⁴ para que esses dados fossem extrapolados para um intervalo de tempo de 1 em 1 hora, necessário no ENVI-met. Para tanto, foram seguidos os seguintes passos:

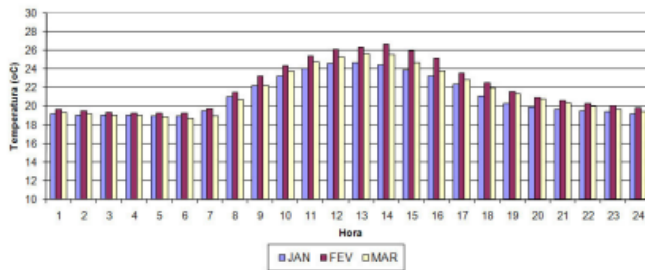
- Para temperatura do ar: utilizando-se a mesma distribuição do ciclo diurno médio observacional do mês, conforme IAG (2008) (Figura 39), correspondente ao mês da simulação, estima-se os valores horários de 1 em 1 hora, utilizando-se a média de temperatura do ar (TR2M) diária do período. Com a média de temperatura do ar diária em mãos, é possível forçar valores de 1 em 1 hora que sigam o mesmo formato da curva horária de temperatura do ar.
- Umidade relativa do ar: utilizando-se a mesma distribuição do ciclo diurno médio observacional do mês da simulação do IAG (2008) (Figura 40), estima-se os dados

¹⁴ Orientação sugerida pelo Prof. Dr. Humberto Ribeiro da Rocha, Professor Titular do IAG (Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, do Departamento de Ciências Atmosféricas.

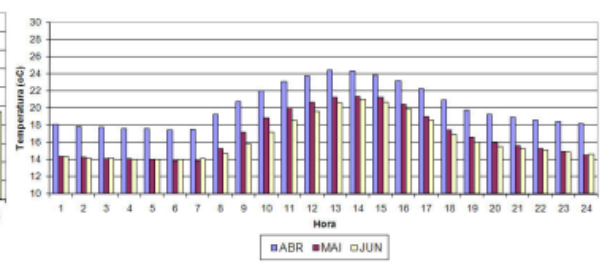
horários de 1 em 1 hora, utilizando-se a média de umidade relativa do ar (UR) diária do período. Com a média umidade relativa do ar diária em mãos, é possível forçar valores de 1 em 1 hora que sigam o mesmo formato da curva horária de umidade relativa do ar

CICLO DIURNO DA TEMPERATURA DO AR

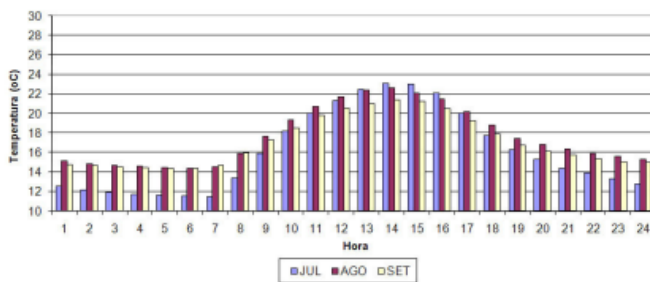
a) Janeiro-Fevereiro-Março



b) Abril-Maio-Junho



c) Julho-Agosto-Setembro



d) Outubro-Novembro-Dezembro

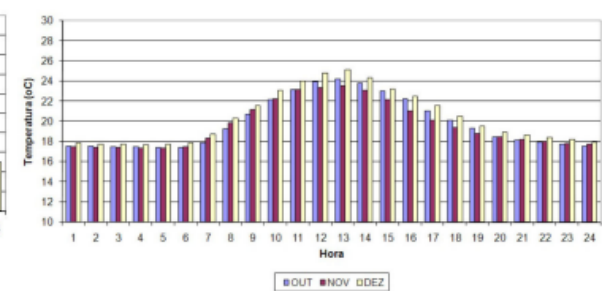


Figura 39: Temperatura média horária em 2008 a) Janeiro-Fevereiro-Março b) Abril-Maio-Junho c) Julho-Agosto-Setembro d) Outubro Novembro-Dezembro. Fonte: IAG (2008).

CICLO DIURNO DA UMIDADE RELATIVA DO AR

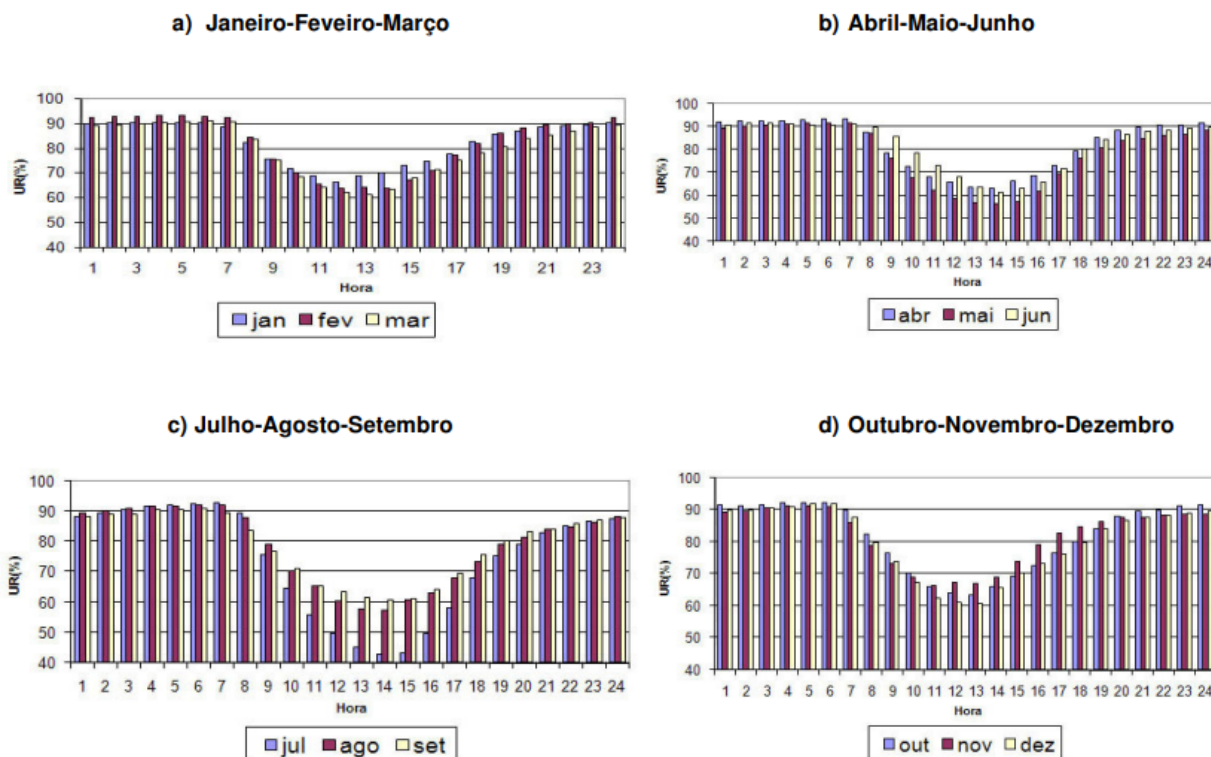


Figura 40: Umidade relativa média horária em 2008 a) Janeiro-Fevereiro-Março b) Abril-Maio-Junho c) Julho-Agosto-Setembro d) Outubro Novembro-Dezembro. Fonte: IAG (2008).

O primeiro cenário de projeção climática futura a ser simulado no ENVI-met busca compreender como será o cenário climático médio dentro do RCP 8.5, em no período de 2079-2099. Assim, foram extraídos do Projeto INPE os dados climáticos correspondentes ao mês com temperatura do ar mais quente do período de 2079 a 2099, a saber, dezembro. Observou-se que esse mês desse período possui o valor médio mais alto de temperatura do ar, de 31°C, e um valor médio de umidade relativa do ar, de 54%. Esses valores estão 7 graus Celsius acima da média atual de dezembro.

Com esses valores, foi feita uma interpolação dos dados, com base na série horária para o mês de dezembro (IAG, 2008). Tendo como base os valores horários do mês de dezembro de 2008, foi possível estimar os valores horários para as duas variáveis, temperatura do ar e umidade relativa do ar (Figura 41). Esses valores horários estimados foram assim inseridos nas simulações dessa condição climática para cada tipologia de LCZ estudada.

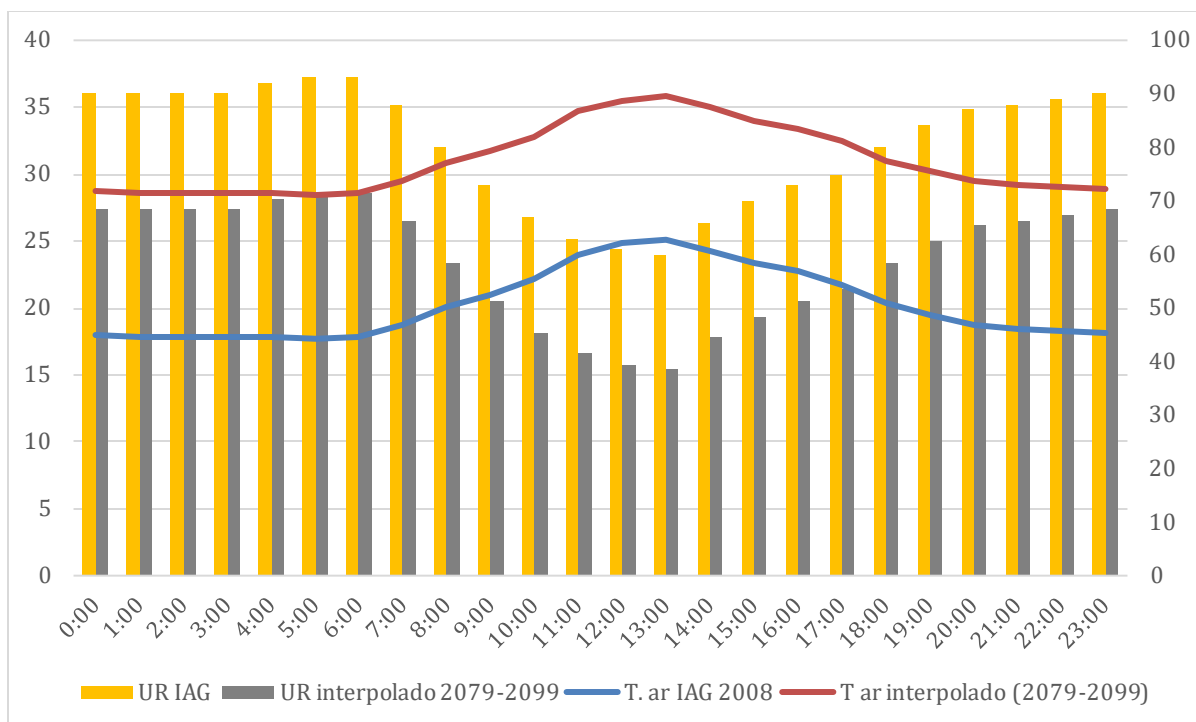


Figura 41: Valores de temperatura do ar interpolados e umidade relativa do ar estimados para dezembro (2079-2099), baseados na média horária de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o mês de novembro, conforme o Boletim Meteorológico do IAG (2008). Fonte: Autor.

Para simular uma condição climática extrema na cidade de São Paulo, foram utilizados dados correspondentes ao dia mais quente encontrado na base de dados do Projeta INPE, que foi o dia 23 de novembro de 2099, com uma temperatura média de 39 °C e UR de 63% (Figura 37), cerca de 15°C mais alta do que a temperatura média atual. A interpolação dos dados horários foi realizada seguindo os mesmos passos anteriormente descritos resultando em dados horários de temperatura do ar e umidade relativa (Figura 42).

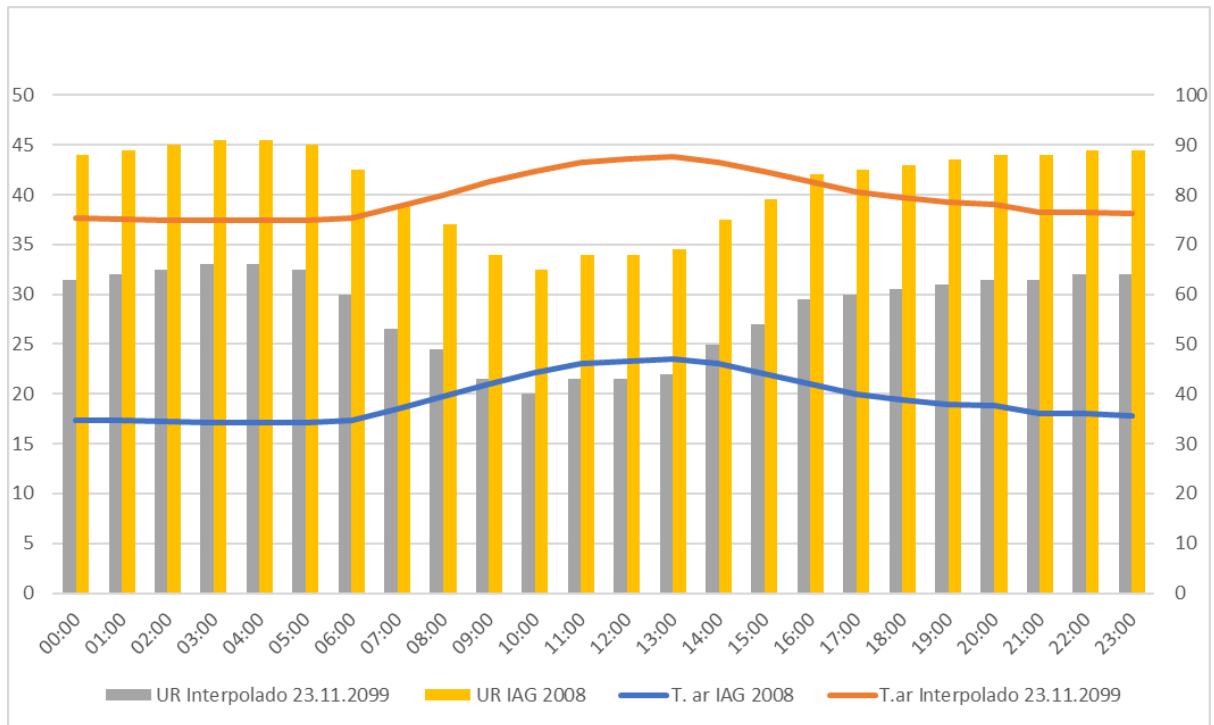


Figura 42: Valores de temperatura do ar interpolados e umidade relativa do ar estimados para o dia 23.11.2009, baseados na média horária de temperatura do ar e umidade relativa do ar para o mês de novembro, conforme o Boletim Meteorológico do IAG (2008). Fonte: Autor.

5.4 Levantamento de dados dos materiais construtivos e de solo

O ENVI-met conta uma biblioteca de materiais e solo aplicáveis nas simulações. No entanto, para tornar o resultado das simulações mais próximos à realidade da cidade de São Paulo, foram utilizados os dados das propriedades físicas dos materiais construtivos e de solo disponíveis em Gusson (2020) e Shinzato et al (2019). Essas propriedades são necessárias para a modelagem tridimensional nas simulações das LCZs. As propriedades são:

- A cobertura dos edifícios (laje) é composta por perfil de 3 camadas de materiais, sendo um contrapiso com 2 cm de espessura, uma laje de concreto com 7 cm de espessura e uma camada de poliestireno expandido (EPS) e concreto com 15 cm de espessura.

	Contrapiso (Database-3D: COP#151)	Laje de Concreto (Database- 3D:LJC081)	EPS + Concreto (Database-3D: EPSC01)
Default Thickness	0.02	0.075	0.15
Absorption	0.6	0.6	0.6
Transmission	0	0	0
Reflection	0.4	0.4	0.4
Emissivity	0.9	0.9	0.9
Specific Heat	1000	1000	1000
Thermal Conductivity	1,15	1,79	0.287
Density	2000	2200	401

Tabela 4: Propriedades dos materiais referentes a cobertura dos edifícios no ENVI-met Fonte: Gusson (2020)



Figura 43: Perfil de cobertura na base de dados do ENVI-met. Fonte: Gusson 2020.

- As paredes dos edifícios são compostas por um perfil com 19 cm de espessura, e compostas por um bloco de concreto com uma camada de ar em seu interior.

Bloco Concreto 14 + ARG (Database-3D: TIJ149)	
Default Thickness	0.0415
Absorption	0.102
Transmission	0
Reflection	0.898
Emissivity	0.9
Specific Heat	920
Thermal Conductivity	0.410
Density	2108

Tabela 5: Propriedades do bloco de concreto para as paredes. Fonte: Gusson (2020).

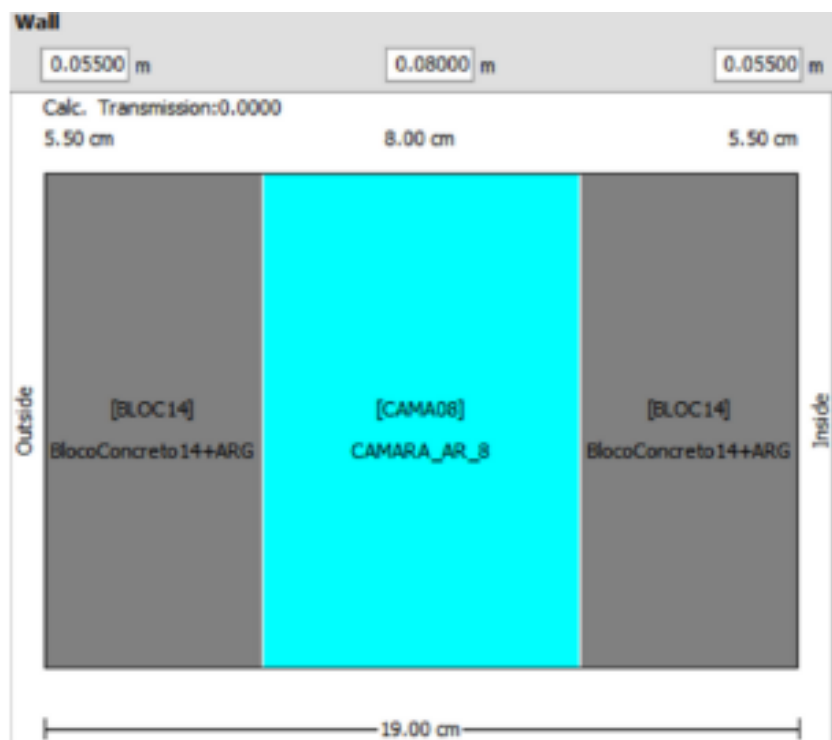


Figura 44: Perfil de parede modelada por GUSSON (2020) dentro da base de dados do ENVI-met.

Fonte: Gusson 2020.

- As calçadas das quadras são compostas de concreto.

Cimento Concreto (Database: 0000ZB)	
Type of Material	Artificial Material
Water content at saturation	0
Water content at field capacity	0
Water content at wilting point	0
Matrix Potential	0
Hydraulic conductivity	0
Volumetric heat capacity	2.083
Clapp & Hornberger Constant	0
Heat Conductivity	1.63
Additional Value 1	0
Additional Value 2	0

Tabela 6: Propriedades do pavimento de concreto. Fonte: Gusson (2020).

Pavimento (Database: PAV001)	
z0 Roughness Length	0.01
Albedo	0.4
Emissivity	0.9
Extra ID	0
Surface is Irrigate?	false
Additional Value 1	0
Additional Value 2	0

Tabela 7: Propriedades do pavimento. Fonte: Gusson (2020).

- As vias dos modelos são compostas por asfalto e o solo, abaixo dele, corresponde a um asfalto gnaiss, seguido por um solo argiloso.

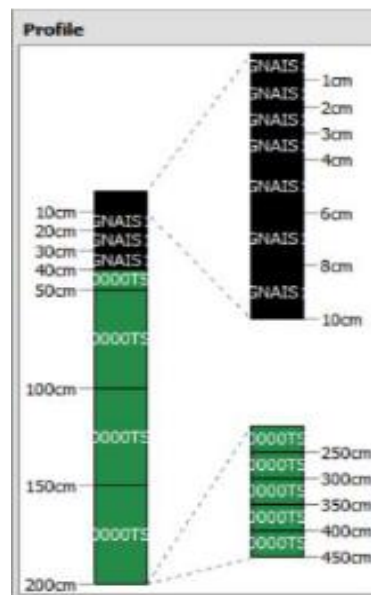


Figura 45: Perfil de solo com asfalto. Fonte: Gusson (2020).

Asfalto (Database: ASFSP1)	
z0 roughness Length	0.01
Albedo	0.2
Emissivity	0.95
Extra ID	0
Surface is irrigated	false
Additional Value 1	0
Additional Value 2	0

Tabela 8: Propriedades materiais do asfalto no ENVI-met. Fonte: Gusson (2020).

Asfalto Gnaisse (Database: GNAIS1)	
Type of Material	Artificial Material
Water content at saturation	0
Water content at field capacity	0
Water content at wilting point	0
Matrix Potential	0
Hydraulic conductivity	0
Volumetric heat capacity	2.62
Clapp & Hornberger Constant	0
Heat Conductivity	1.26
Additional Value 1	0
Additional Value 2	0

Tabela 9: Propriedades do asfalto gnaisse. Fonte: Gusson (2020).

Sandy Clay Loam - franco-arenoso-argiloso (Database: 0000TS)	
Type of Material	Natural Soil
Water content at saturation	0.42
Water content at field capacity	0.255
Water content at wilting point	0.0175
Matrix Potential	-0.299
Hydraulic conductivity	6.3
Volumetric heat capacity	1.175
Clapp & Hornberger Constant	7.12
Heat Conductivity	0
Additional Value 1	0
Additional Value 2	0

Tabela 10: Propriedades do solo Sandy Clay Loam. Fonte: Gusson (2020).

- Perfil do solo: as propriedades do solo correspondem ao tipo *franco-arenoso-argiloso* (Shinzato et al, 2019).

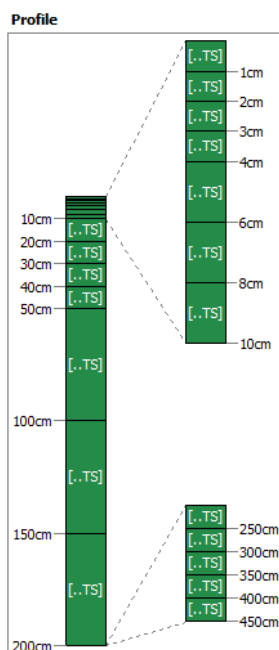


Figura 46: Perfil do solo Sandy Clay Loam (franco-arenoso-argiloso) Shinzato et al (2019). Fonte:

Autor

5.5 Levantamento de dados de Vegetação

Alguns dados de vegetação foram extraídos do Manual Técnico de Arborização Urbana (SVMA, 2015) que possui informações de tamanho médio de copa e altura vegetal das principais espécies de árvores do município de São Paulo. Também foram utilizados dados transmitidos¹⁵ pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato que apontou a espécie de árvore conhecida como Sibipiruna como a espécie arbórea de maior presença presente no meio urbano da capital paulista.

Nome científico	Nome popular	Altura	Diâmetro do caule	Tipo de copa	Folhas	Folhagem ornamental	Flores
Grande Porte							
<i>Myroxylum peruliferum</i>	Cabreúva	10-20m	60-80cm	flabeliforme	decídua		melíferas
<i>Cordia americana</i>	Guajuvira	10-25m	70-80cm	elíptica vertical	decídua		
<i>Platycamus regnellii</i>	Pau pereira	15-22m	50-70cm	globosa aberta	decídua	folhas grandes	roxas e vistosas
<i>Poecklante parviflora</i>	Coração de negro	15-25m	40-60cm	globosa	perenifólia		cachos brancos abundantes
<i>Poinciana pluviosa</i> var. <i>pelltophoroides</i>	Sibipiruna	10-18m	40-70cm	flabeliforme	semidecídua		amarelas em racemos apicais
<i>Samanea tubulosa</i>	Sete-cascas	10-18m	30-70cm	flabeliforme	decídua		pompom creme com a parte terminal rosada
<i>Spondias mombin</i>	Cajá	18-25m	50-80cm	elíptica horizontal	decídua		pequenas e melíferas
<i>Terminalia kuhlmannii</i>	Araçá d'água	20-30m	40-60cm	elíptica vertical	decídua		
<i>Zeyheria tuberculosa</i>	Ipê-tabaco	15-23m	40-60cm	globosa	semidecídua		
<i>Agathis robusta</i>	Pinheiro-kauri	40-50m	60-100cm	elíptica vertical	perenifólia		

Figura 47: Catálogo de espécies de árvores e seus tamanhos de acordo com o Manual Técnico de Arborização Urbana. Fonte: SVMA (2015).

¹⁵ Informação transmitida verbalmente pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato.

Foram levantados em campo dados primários de Índice de Área Foliar – LAI (Leaf Area Index – LAI) de sibipirunas, por meio de fotos hemisféricas pós-processadas, no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo.

Por meio das fotos hemisféricas pós-processadas, torna-se possível obter a distribuição das folhas e quantificar a geometria de aberturas na copa (*gap fraction*) da copa de acordo com diferentes ângulos zenitais e azimutais. Para a análise das fotos hemisféricas foi utilizado o modelo Can- Eye 6.49, desenvolvido em 2003 e atualizado até a sua versão de 2017, pelo grupo de pesquisa INRA (França) - National Institute of Agronomical Research.

A principal vantagem desse modelo é que, no cálculo do LAI, este considera um parâmetro de dispersão λ_0 (NILSON, 1971; LEMEURE e BLAD, 1974), também chamado de *clumping index* (CHEN, BLACK, 1992) que quantifica os efeitos da distribuição espacial não aleatória do dossel (JONCKHEERE et al, 2003).

O CAN-Eye calcula o valor do LAI verdadeiro (*true LAI*) e também estima o valor do LAI efetivo (*effective LAI*). O LAI efetivo pode ser definido como “metade da área total de luz interceptada pelas folhas por unidade horizontal de área de superfície do solo baseada na suposição que os elementos da folhagem estão distribuídos de maneira aleatória no espaço”. Já o LAI verdadeiro é definido como “metade da área total de área foliar por unidade de superfície de área de solo (ZHENG; MOSKAL, 2009)”. O valor verdadeiro é determinado pela lei de Poisson, assumindo que as folhas estão distribuídas de forma regular no dossel, sendo válido apenas para as espécies de copas homogêneas. A relação entre LAI verdadeiro e LAI efetivo é dada pela seguinte expressão:

$$LAI_{eff} = \lambda_0 LAI \quad (16)$$

LAI é o valor de LAI verdadeiro (obtido por métodos destrutivos diretos)

LAI_{eff} é o LAI efetivo obtido por métodos indiretos (ex: fotos hemisféricas).

λ_0 é o parâmetro de dispersão (*clumping index*) (CHEN; BLACK, 1992).

A equação abaixo indica o cálculo do *gap fraction* considerando os valores de LAI (densidade foliar) e do *clumping index* (sobreposição aleatória das folhas) (WEISS, 2011)

$$P_0(\theta_v, \varphi_v) = e^{-\lambda \cdot G(\theta_v, \varphi_v) \cdot LAI \cdot \cos(\theta_v)} \quad (17)$$

Onde: $P_0(\theta_v, \varphi_v)$ = *gap fraction*

λ o. $G(\theta_v, \varphi_v)$: Coeficiente de inclinação das folhas

LAI: Valor LAI (LAI)

$\cos(\theta_v)$: ângulo zenital

Para o levantamento com as fotos hemisféricas, de início é necessário realizar a calibração da câmera digital e sua lente grande angular (olho de peixe) no modelo CAN-EYE. A câmera utilizada nessa etapa foi uma CANONEOS Rebel t3i Full Frame e lente grande angular Sigma XX.

Na primeira fase de calibração é necessário o ajuste do centro óptico (optical center), cujo objetivo é localizar o centro verdadeiro da lente grande angular em relação ao centro da imagem. Assim, para identificar o centro verdadeiro, é necessária uma análise pelas coordenadas (x, y) de três pontos definidos sobre a lente grande angular. Estes pontos, por sua vez, servirão para determinar as circunferências concêntricas que serão os parâmetros para se chegar ao centro verdadeiro da lente, pelo CAN-EYE.

Foi utilizada uma tampa de material plástico confeccionada em uma impressora 3D do Laboratório de Modelos e Ensaio – FAUUSP (Yoshida, 2014), sendo esta dimensionada para cobrir totalmente a lente hemisférica da câmera.

Nessa tampa foram feitos três pequenos furos, que são os três pontos na lente descritos anteriormente, e que servem para ajustar as coordenadas x,y das imagens registradas. O passo seguinte consiste em registrar fotos em diferentes posições, rotacionando a tampa sobre a lente (Figura 49), a cada fotografia. A definição das coordenadas x,y foi feita utilizando-se um modelo básico de edição de imagens, o Microsoft Paint, que indica os valores x,y dos pixels em cada ponto.

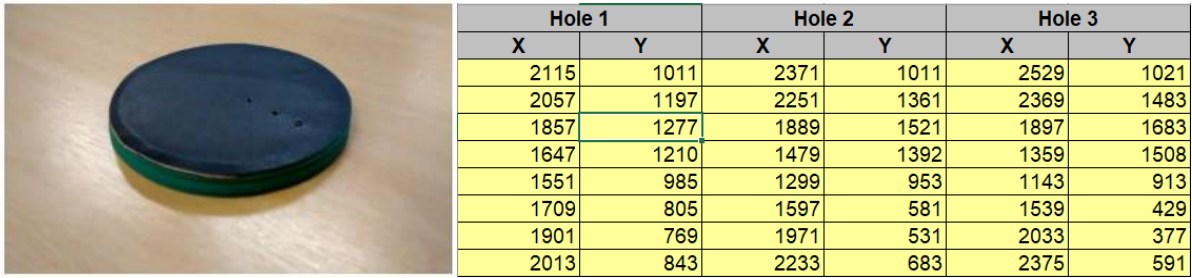


Figura 48: Tampa modelada na impressora 3D com furos e coordenadas x,y dos 3 pontos de cada foto registrada. Fonte: Autor.

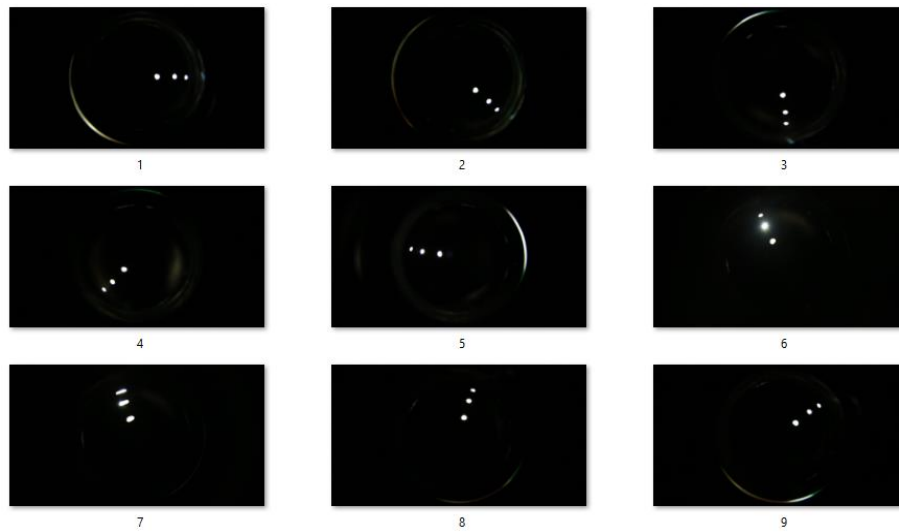


Figura 49 :Pontos em diferentes posições para calibração do centro óptico no CAN-EYE. Fonte: Autor

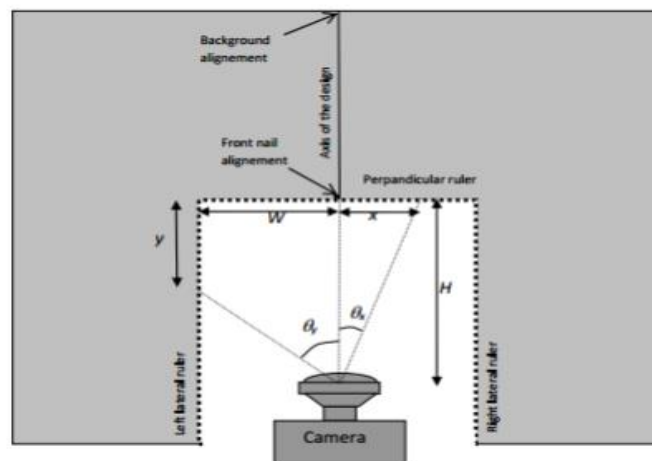


Figura 50: Esquema representativo de calibração da câmera e lente hemisférica no CAN-EYE. Fonte: Weiss (2017).

A segunda fase é a calibração do tipo da lente grande angular, denominada *Projection Function*. Para isso é necessária a construção de um quadro, utilizando-se 3 réguas perpendiculares entre si, conforme mostra a Figura 52. Para esse estudo foram utilizadas três réguas acrílicas de 30 cm de comprimento cada, com a parede como plano de fundo. A câmera foi ajustada para que a lente e as três réguas ficassem alinhadas. Foram registradas fotos com distâncias de 30 e 34 cm. O centro da lente deve ficar alinhado com o centro da régua em paralelo com a lente da câmera. Com o prolongamento do traçado de ângulos (θ_x , θ_y , conforme mostra a Figura 50), a partir do centro da lente, é possível se determinar onde esses ângulos chegam nas réguas e o seu posicionamento pelas coordenadas x,y.

Para cada distância da câmera, são formados diferentes ângulos de abrangência. Portanto, o limite desses ângulos sobre a régua define pontos onde, então, suas coordenadas x e y são determinadas a partir de modelos de edição de imagens. Tendo essas coordenadas, são formados os círculos que o CAN EYE utiliza para seu funcionamento.

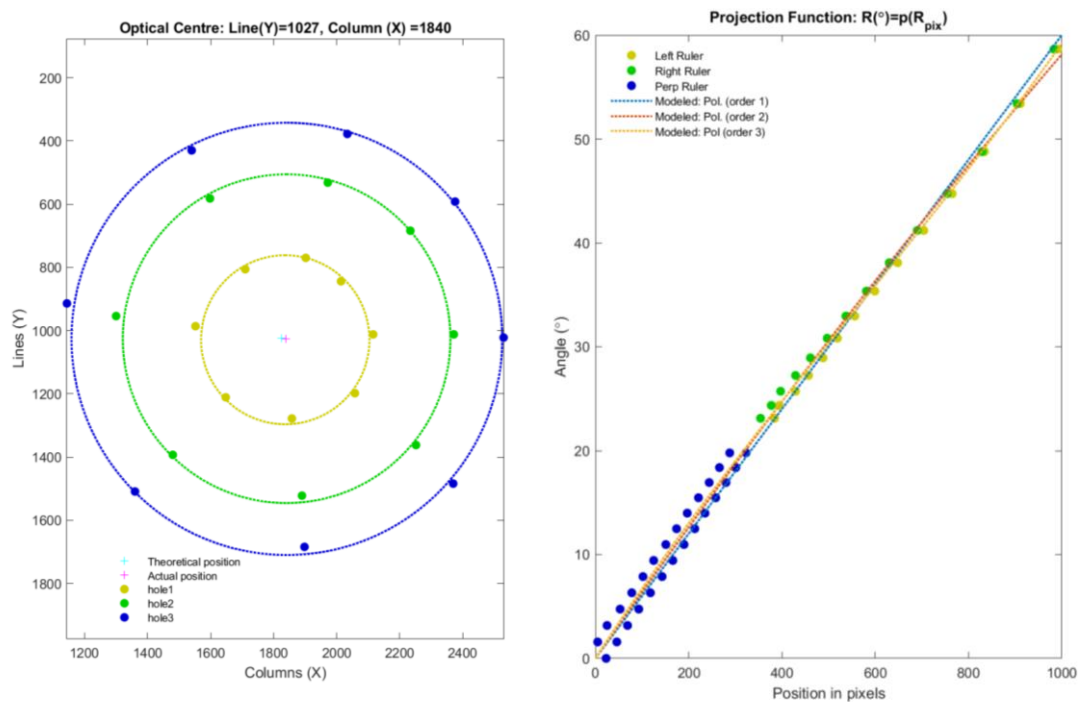


Figura 51: Resultado do centro óptico de acordo com as calibrações realizadas nessa pesquisa.

Fonte: Autor.

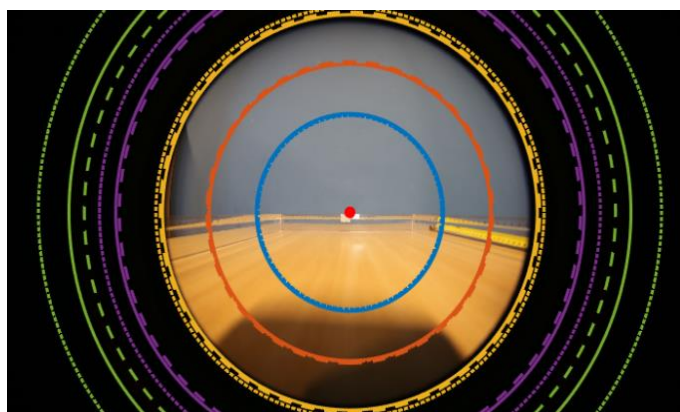


Figura 52: Centro óptico de acordo com as calibrações realizadas nessa pesquisa. Fonte: Autor.

Feita a etapa de calibração no CAN-EYE, são criados pelo modelo os arquivos referentes à calibração da câmera e da lente hemisférica, que podem ser utilizados em outras pesquisas. Encerrada essa etapa, é possível realizar o cálculo de LAI através das fotos registradas em campo.

Figura 53:

A análise das fotos hemisféricas é caracterizada pelo processamento de imagens. Caso seja de interesse do usuário, é possível criar máscaras que servem de filtro de distinção do que é folhagem, céu e outros elementos (chão, edifícios, etc). Para identificar, nas fotografias, o que é vegetação e o que é céu, o modelo utiliza um filtro de cores. A Figura 51, abaixo, é uma demonstração a respeito da definição de cores e contrastes no CAN-EYE, com distinção da porção que será considerada como céu e vegetação. A Figura 48 retrata o resultado da filtragem dessa etapa.

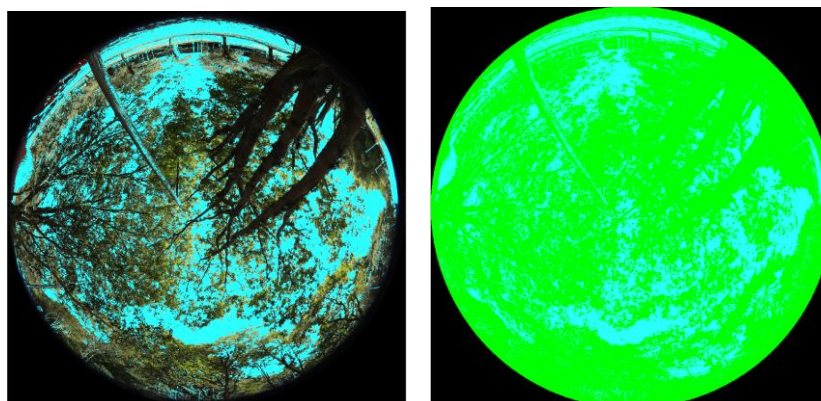


Figura 54: Resultado do mascaramento de imagens hemisféricas no CAN-EYE. Fonte: Autor.

No dia 02/06/2022, foi realizada no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, a medição de LAI de espécies de árvores existentes na RMS. Esse levantamento foi realizado por volta das 11 horas da manhã.

Foram selecionados pontos com a presença da espécie sibipiruna e as fotos foram registradas a uma distância de 1,7 metros de altura em relação ao solo. São necessárias pelo menos 3 fotos em cada ponto para serem analisadas no modelo.



Figura 55: Fotos hemisféricas nos pontos 1, 2 e 3 no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - USP. Fonte: Autor.

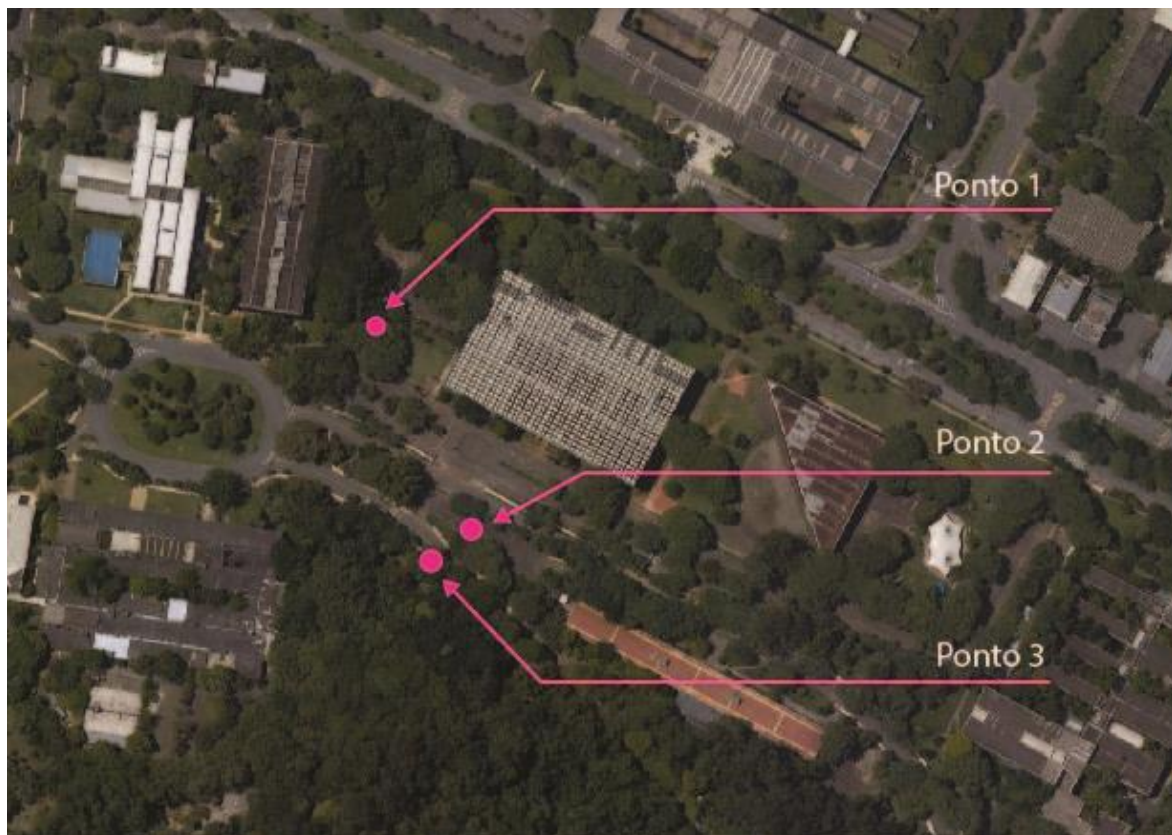


Figura 56: Vista aérea dos pontos 1, 2 e 3. Fonte: Autor.



Figura 57: Sibipiruna próxima à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo - USP. Fonte: Autor



Figura 58:: Levantamento em campo no entorno da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Fonte: Autor.

Feita a calibração e o registro de fotos hemisféricas, as imagens foram analisadas e processadas no Can-Eye . Os resultados são apresentados na tabela abaixo:

	Eff. PAI	True PAI	Eff. ALA (°)	True ALA(°)	%of saturated cells
CE V6.1	1,41	2,30	27,27	32,00	5,8
CE V5.1	1,29	2,23	23,82	30,00	
P57	1,41	2,29			
Miller	1,33	1,68	80,00		
LAI2000, 3 rings	1,71				
LAI2000, 4 rings	1,68				
LAI2000, 5 rings	1,36				

Tabela 11: Resultados gerados pelo CAN-EYE. Fonte: Autor.

PAI : Plant Area Index

ALA : Average Leaf inclination Angle

FAPAR : Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

FCOVER : Vegetation cover fraction

% of saturated cells: células da imagem saturadas de folhas

O ENVI-met utiliza em seus cálculos de vegetação, o Leaf Area Density (LAD). Existem meios de se calcular o LAD utilizando valores LAI. Para se calcular o LAD a partir do LAI, foram utilizados os parâmetros levantados por ZUCCHI (2018)¹⁶ que utiliza a seguinte equação como base:

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz \quad (18)$$

$$LAD(z) = Lm(h - zm/h - z)ne^{n(h-zm/h-z)} \quad (19)$$

Onde:

h= altura total da copa

Lm= LAD máximo (calculado pela fórmula $Lm=2xLAI/h$)

zm= é a altura da copa onde há o LAD máximo

¹⁶ Pesquisa de iniciação científica de Luísa Zucchi com o tema: O impacto da vegetação nos microclimas urbanos: quantificação da densidade foliar de diferentes grupos arbóreos pelas metodologias de fotos hemisféricas e de analisador de dossel. Processo Fapesp 16/20433-7.

z é a altura que se quer saber um LAD específico (cada altura da copa tem um LAD diferente, para saber a média, se fazia o LAD a cada 1m de altura da copa e se calculava a média dos LADs)

n = coeficiente de altura LAD (varial com valor entre 6 ou 0,5 dependendo da altura (Z) que era calculado o LAD. $n=6$ se $0 \leq z \leq z_m$ ou $n=0,5$ se $z_m \leq z \leq h$)

Utilizando-se o valor de TruePAI¹⁷ = 2,3 resultantes do cálculo do CAN-EYE e levando-se em consideração a altura de 15 metros para a espécie sibipiruna, $z_m = 4,5$ (tomando como base que a sibipiruna possui formato de copa semelhante a espécie *Acer grandidentatum*), valor de $z=4,5$. Temos que $LAD = 0,3 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

O PAI (Plant Área Index) corresponde a um valor referente a todo o corpo vegetal (tronco, caules e folhas), não sendo exatamente um valor LAI. O CAN-EYE não é capaz de calcular exclusivamente o LAI, portanto nessa pesquisa, foi utilizado PAI = LAI.

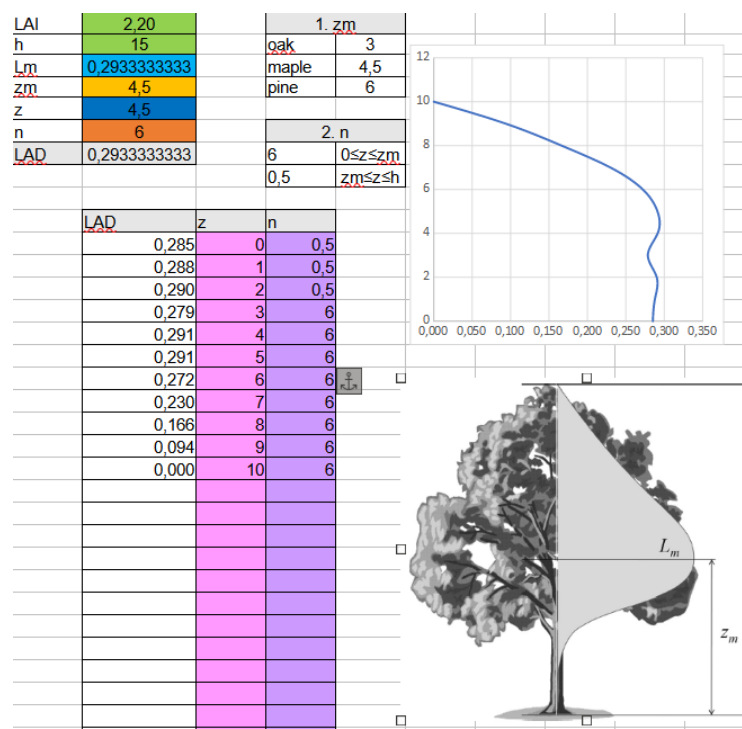


Figura 59: Imagem do modelo de cálculo LAD a partir de LAI desenvolvido por Zucchi (2018). Fonte: Autor.

¹⁷ Foi utilizado o TruePAI nesse estudo pois trata-se de um valor que leva em consideração a sobreposição de folhas uma sobre as outras.

O valor $LAD = 0,3m^2/m^3$ foi assim utilizado para a modelagem da copa da sibipiruna, onde e para a comparação entre simulações com sibipirunas modeladas com valores pré-definidos e $LAD=0,3m^2/m^3$ (calculado a partir de levantamento *in loco*).

5.6 Modelagem, Parametrização e Simulação

O formato da quadra, a geometria dos edifícios, as parametrizações de solo, superfície e materiais foram realizadas de acordo com Kropp (2018)¹⁸ e Kropp et al (2018) que, juntamente com pesquisadores do LABAUT, adaptaram os padrões das LCZs de Stewart e Oke (2012), para padrões mais próximos dos encontrados na cidade de São Paulo. Todas as quadras LCZs possuem o tamanho de 100m x 100m e, nesta pesquisa, foram modeladas as LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8:

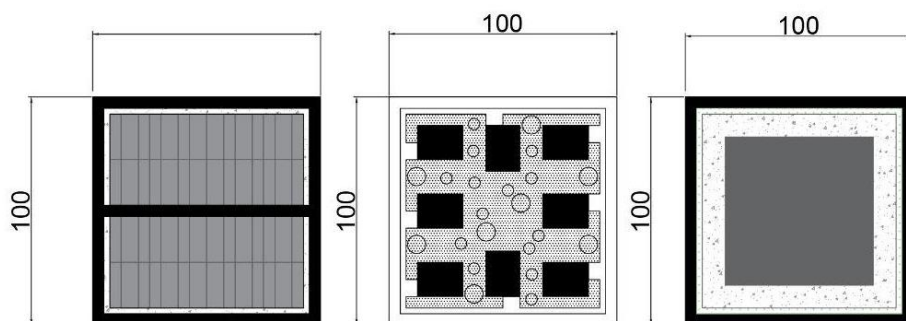


Figura 60: Quadras LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8, modeladas de acordo com Kropp (2018) e Kropp et al (2018).

- A LCZ 3 (Figura 61) é composta por dois volumes de edifícios que representam lotes com quase nenhuma área livre em seu interior. Esses dois volumes estão separados por uma pequena via em seu interior e a altura desses volumes é de 9 metros de altura (3 andares). Nesse tipo de LCZ quase não há vegetação e o solo é bastante impermeável e coberto por concreto e asfalto.

¹⁸ Pesquisa de mestrado de Tim Kropp (2018), no mesmo grupo dos desenvolvedores do ENVI-met, do Fachgebiet Geographie Geographisches Institut Fachbereich 09 da Johannes Gutenberg Universität Mainz. (. A pesquisa contou com o apoio de pesquisadores do LABAUT no desenvolvimento de modelos LCZ mais próximos à realidade urbana da RMSP.

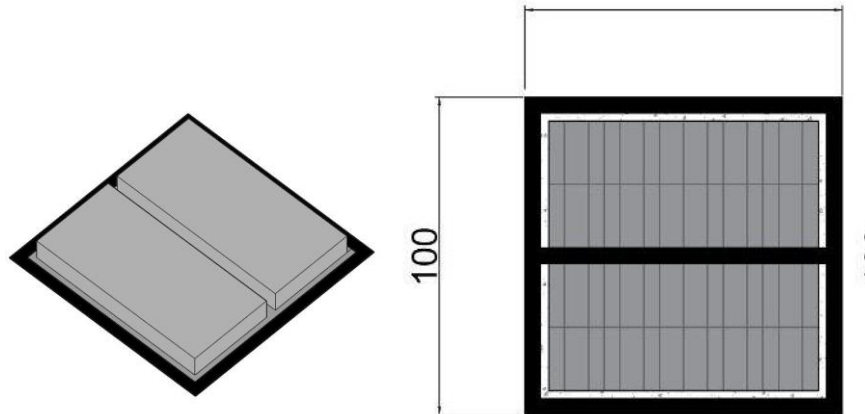


Figura 61: Modelo isométrico e planta da quadra LCZ 3. Fonte: Autor.

- A LCZ 6 (Figura 60) representa um modelo de quadra com grande parte do solo coberto por grama (alta permeabilidade), com algumas árvores, edifícios menores e mais esparsos, com uma média de altura de 7,5 m (2-3 andares).

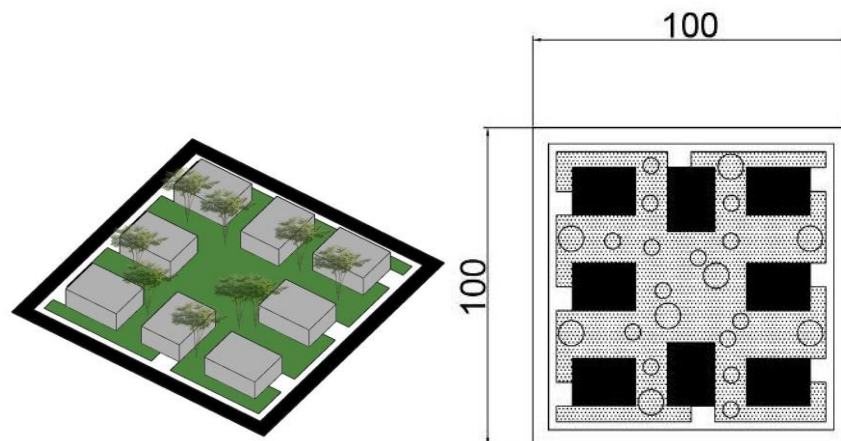


Figura 60: Modelo isométrico da quadra e planta da quadra LCZ 6. Fonte: Autor.

- Por fim, a LCZ 8 (Figura 62) representa um modelo de quadra praticamente sem vegetação e solo impermeável; os recuos da edificação em relação às vias são maiores, comparados com a LCZ 3, o volume edificado é mais centralizado e, basicamente, representa um grande galpão ocupando a quadra.

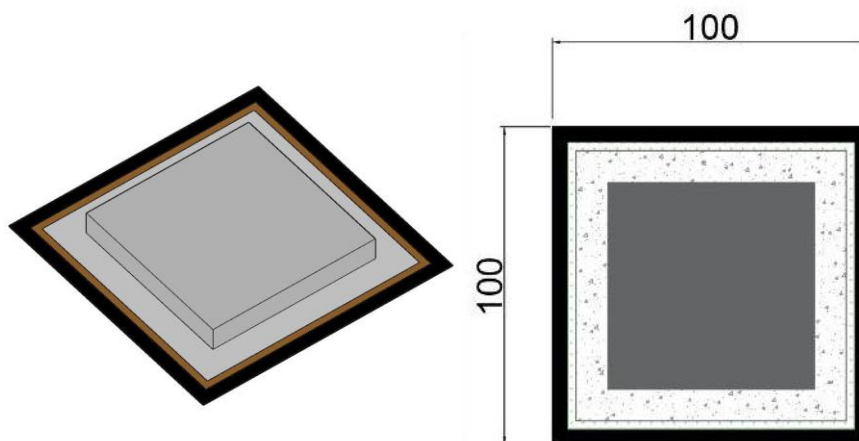


Figura 62: Modelo Isométrico e planta da quadra LCZ 8. Fonte Autor.

As LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 foram modeladas tridimensionalmente por meio do, Sketchup¹⁹, para o qual o ENVI-met tem um *plugin*, tornando a modelagem muito mais ágil em comparação ao modo anterior, através do *plugin* Spaces, disponibilizado no mesmo modelo.

Assim, foi modelado para cada tipologia de LCZ um conjunto de 9 quadras, todas com a mesma tipologia, no formato de 3x3 quadras, totalizando uma área de 300 metros x 300 metros.

Esse formato foi selecionado para que sejam extraídos os resultados da quadra central (Figura 63), que é a região mais estável na simulação e menos afetada pelos efeitos de borda da simulação, em especial as trocas convectivas e radiação solar.

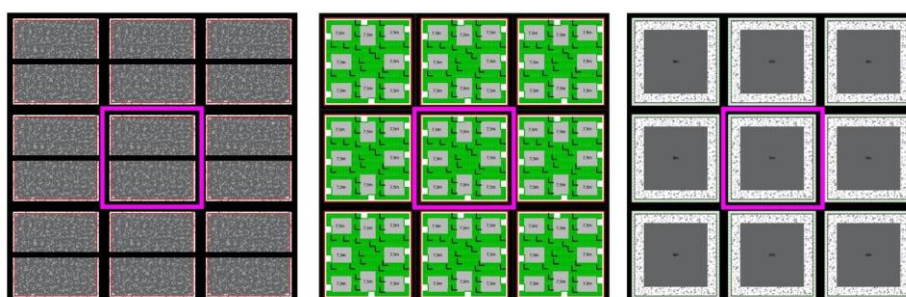


Figura 63: LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 em formato 3x3 quadras, com a quadra central em destaque.

Fonte: Autor.

Nessa etapa de modelagem, é possível se determinar a resolução espacial da simulação, sendo este um ponto importante para estimar o tempo de processamento e o nível de

¹⁹ Mais informações em: <https://www.sketchup.com/pt-BR>.

resolução de informação gerada pela simulação. A resolução espacial adotada para este trabalho foi de 3 metros, conforme sugerido pelo Prof. Dr. Helge Simon²⁰, para simulações que buscam analisar o efeito da vegetação.

5.7 Modelagem da vegetação no ENVI-met

O ENVI-met permite modelar a vegetação de duas maneiras. Gramínias, gramas e arbustos e outros tipos de plantas que são dotadas de uma estrutura vertical simples e que não possuem copa são modeladas como *simple plants*. A densidade de área foliar das *simple plants* são representadas por 10 camadas na atmosfera enquanto as raízes consistem em 10 camadas de área de raiz no modelo do solo. Plantas com uma copa mais complexa, como árvores por exemplo, são representadas por *clusters* de células que possuem um valor LAD, gerando, assim, a forma tridimensional da planta. Pelo fato dessas plantas terem a sua própria geometria tridimensional, elas são denominadas de *3D-plants* e são, assim, editáveis pelo módulo *Albero* (SIMON, 2016).

O ENVI-met possui uma extensa base de dados a respeito de diversos tipos de vegetação (árvores, arbustos, palmeiras e gramíneas).; Dentro do *Albero* é possível modelar novos tipos de arbóreos e editar os diversos tipos de vegetação existentes; dessa maneira, é possível parametrizar a altura, o tamanho e a geometria de copa, a profundidade de raízes e a densidade de área foliar. A respeito da copa, é possível especificar o formato, seu arranjo, quais células do modelo estão sendo ocupadas por folhas e o valor de densidade de área foliar (LAD) para cada célula da copa.

Para tornar as simulações com a presença da vegetação mais próximas à realidade da cidade de São Paulo, essa pesquisa criou um novo tipo arbóreo para ser utilizado nas simulações. Dessa maneira, foi modelado um tipo arbóreo baseado na espécie arbórea *Sibipiruna* e sua modelagem se baseou nos levantamentos descritos anteriormente.

²⁰ Engenheiro de softwares chefe do modelo computacional ENVI-met e professor do Fachgebiet Geographie Geographisches Institut Fachbereich 09 da Johannes Gutenberg Universität Mainz. Esteve presente no workshop do ENVI-met realizado na Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo em março de 2018. Mais informações em https://www.fau.usp.br/wp-content/uploads/2021/04/Informativo_22_2019_web.pdf

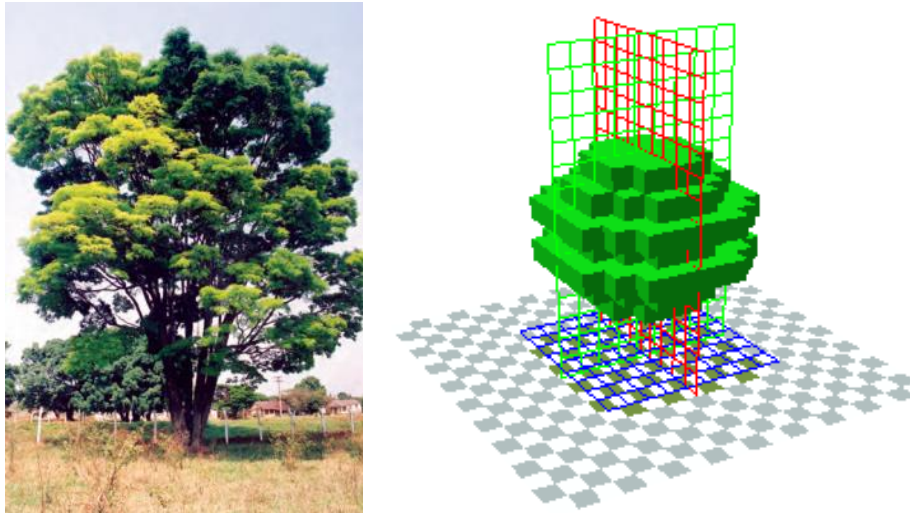


Figura 64: Sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa* var. *peltophoroides* (esquerda) e modelo de árvore no Albero (direita). Fonte: Editado de Ramalho (2003).

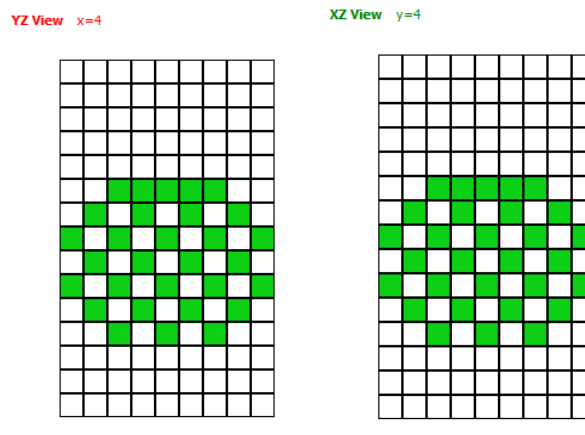


Figura 65: Vistas dos planos YZ e XZ da Sibipiruna modelada no Albero. Fonte: Autor.

Duas situações de copa com diferentes valores de LAD foram modeladas nesta pesquisa (Figura 61):

1. A primeira copa de sibipiruna modelada possui células com valor $LAD = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$, conforme sugerido pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato²¹. Esse valor de $LAD = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ foi utilizado nas simulações de comparação do efeito da vegetação no ENVI-met desta pesquisa. Pelo fato de existirem células vazias dentro do modelo dessa copa, o LAD médio da copa modelada é de $0,67 \text{ m}^2/\text{m}^3$, já que a árvore possui um volume total de 295 células, sendo 199 células com folhas $LAD = 1 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

²¹ Shinzato et al (2018) realizaram medições de LAI e LAD no Parque Tenente Siqueira Campos - Trianon que posteriormente foram ajustados no ENVI-met. Os valores LAD da vegetação nas simulações de Shinzato et al (2018) estão próximos de $1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ e serviram como base para a definição das células de copa de árvore no Albero, para esta pesquisa.

2. A segunda copa de sibipiruna modelada possui valor de células de $0,44\text{m}^2/\text{m}^3$. Pelo fato de a copa da sibipiruna modelada possuir células vazias que não possuem folhas, e sabendo que a copa possui 295 células, sendo 199 destas com folhas, o valor médio de LAD desta copa é de $0,3\text{m}^2/\text{m}^3$, que corresponde ao valor LAD da medição em campo. O intuito da modelagem dessa copa é comparar resultados de simulações que utilizaram vegetação com células $\text{LAD}=0,3\text{m}^2/\text{m}^3$ com simulações que utilizaram células $\text{LAD}=1\text{m}^2/\text{m}^3$,

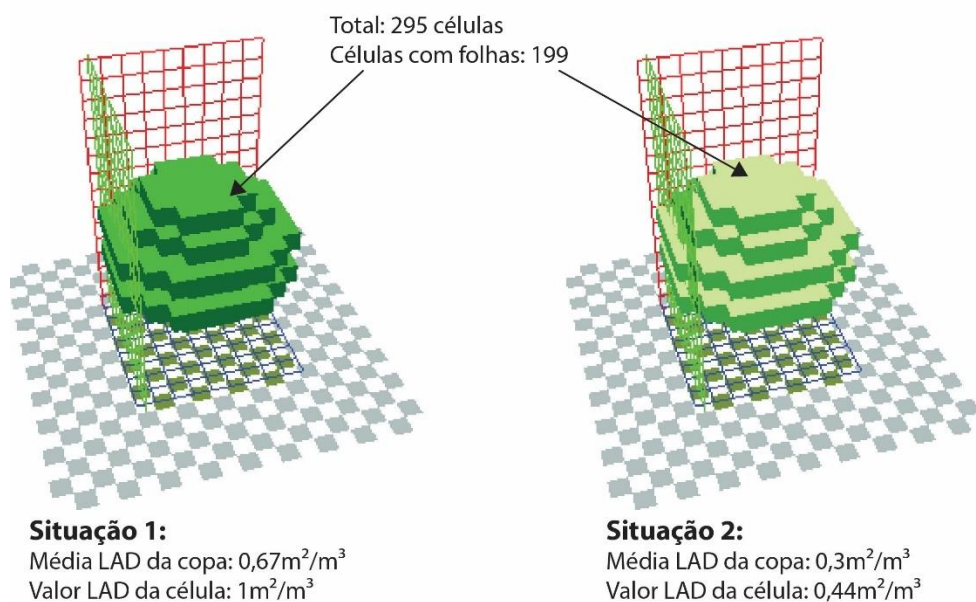


Figura 66: Copas Sibipirunas modeladas com diferentes valores de LAD. Fonte: Autor.

A geometria da copa da Sibipiruna, foi baseada na geometria de copa da espécie Jacarandá Mimosa (*Jacaranda mimosifolia*), presente no banco de dados do *Albero* do ENVI-met. Assim, a copa da Sibipiruna modelada no *Albero* não é totalmente preenchida por células com folhas.

5.8 Modelagem dos cenários sem vegetação no ENVI-met

As LCZ 3 (Figura 67) e LCZ 8 (Figura 71) são tipologias originalmente sem vegetação e, dessa forma, já podem ser considerados cenários sem vegetação. Já a LCZ 6, no entanto, por ser uma tipologia LCZ que possui, pela definição de Stewart e Oke (2012), alguma vegetação esparsa em seu interior, foi testada, de início, sem vegetação, eliminando-se, inclusive, o gramado no interior dos lotes.

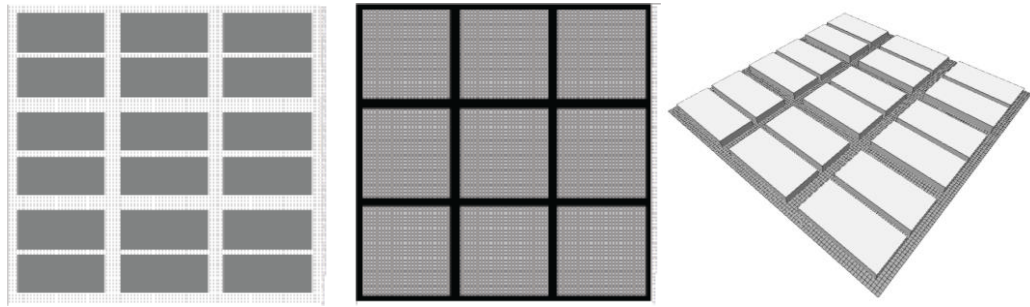


Figura 67: Vista da LCZ 3 (esquerda) e seu perfil do solo (direita) para o conjunto de quadras LCZ 3 no Spaces. Fonte: Autor.

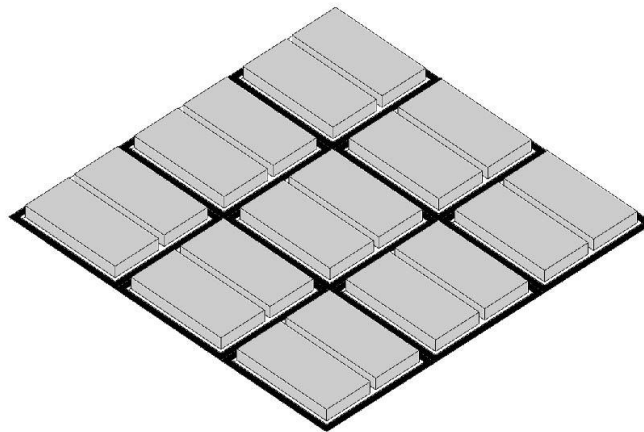


Figura 68: 9 quadras LCZ 3 no formato 3x3 modelada no Sketchup. Fonte: Autor

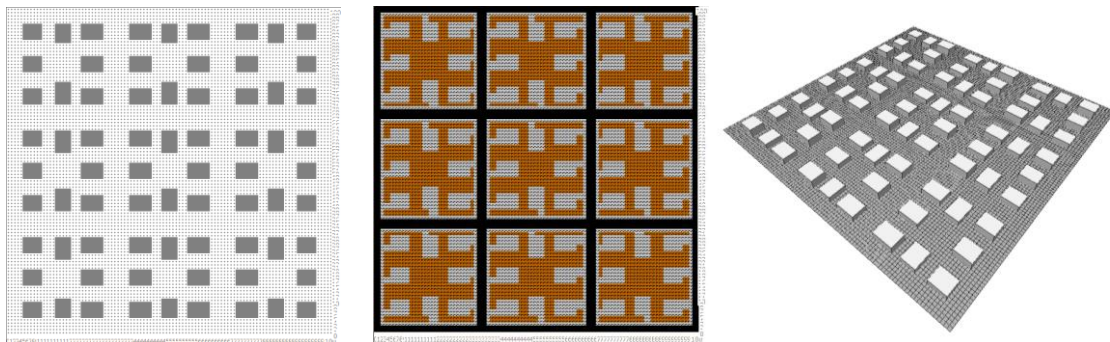


Figura 69: Vista dos edifícios LCZ 6 (esquerda) e seu perfil do solo (direita) no Spaces. Fonte: Autor.

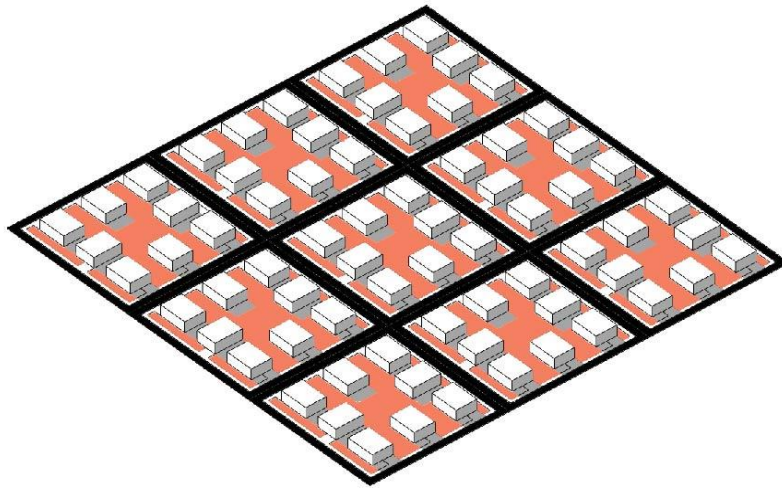


Figura 70: 9 quadras LCZ 6 no formato 3x3 sem vegetação modelada no Sketchup. Fonte: Autor

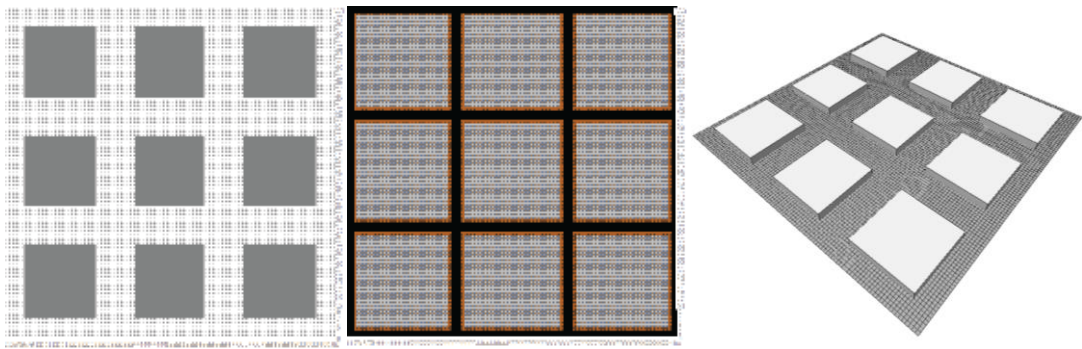


Figura 71: Vista de dos edifícios LCZ 8 (esquerda) e seu perfil de solo (direita) no Spaces. Fonte: Autor.

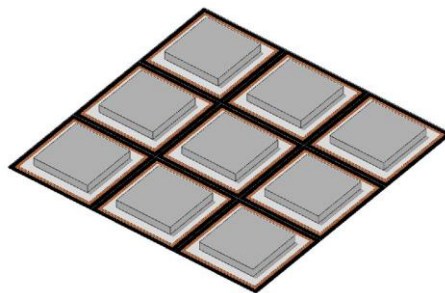


Figura 72: 9 quadras LCZ 6 no formato 3x3 modelada no Sketchup. Fonte: Autor

5.9 Modelagem dos cenários com vegetação no ENVI-met

Devido à existência de espaço das nas vias das quadras LCZs estudadas, o tipo de vegetação selecionada para esta pesquisa é a arborização viária, e esta foi inserida apenas dentro do espaço viário da quadra central de cada simulação, para todos os cenários modelados (LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8). Conforme levantamentos realizados em São Paulo (ver capítulo 5.5), a vegetação arbórea utilizada nas simulações foi baseada na a Sibipiruna (*Caesalpinia pluviosa*). Nas simulações as árvores foram implantadas a uma distância de 3 células uma das outras, em relação ao tronco, representando uma distância total de 9 metros em relação a seu eixo.

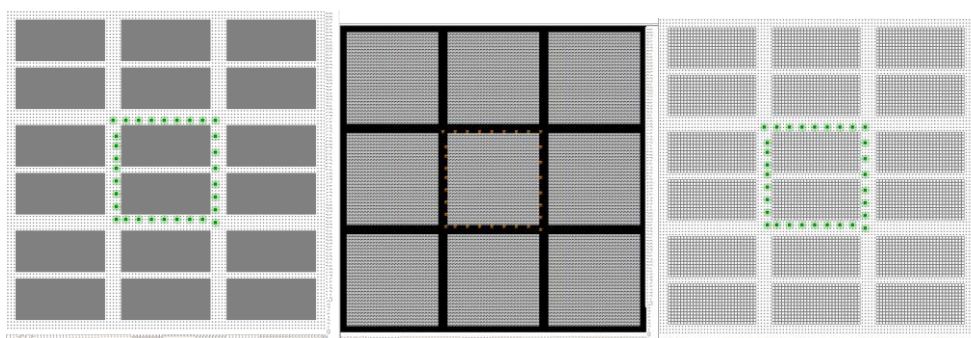


Figura 73: Modelo de quadras 3x3 LCZ 3 vista: vista dos edifícios e vegetação (esquerda); perfil do solo (meio); perfil de vegetação (direita)

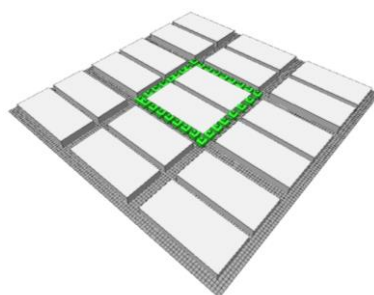


Figura 74: Isométrica 3x3 LCZ 3: Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.

Como explicitado acima, a LCZ 6 é uma tipologia LCZ que originalmente possui vegetação esparsa em seu interior, conforme Stewart e Oke (2012). Dois cenários foram modelados para essa tipologia: o primeiro (Figura 74 e Figura 75), apenas a arborização viária; o segundo (Figura 76 e Figura 77), onde toda há a vegetação original (árvores no interior do lote + gramado) e a arborização viária implementada.

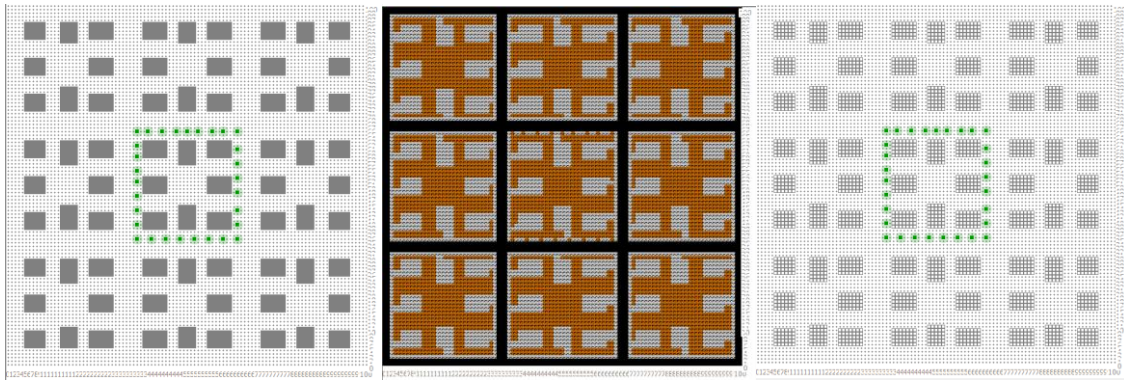


Figura 75: Modelo de quadras 3x3 LCZ 6 (primeiro cenário): vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.

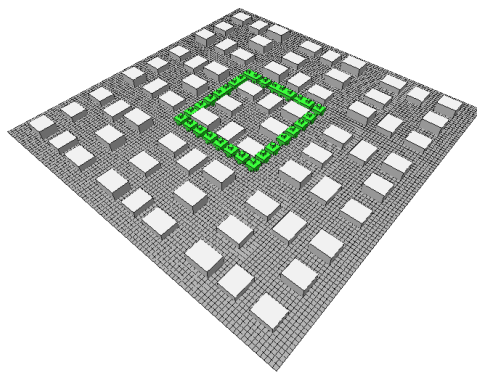


Figura 76: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 com vegetação. Fonte: Autor.

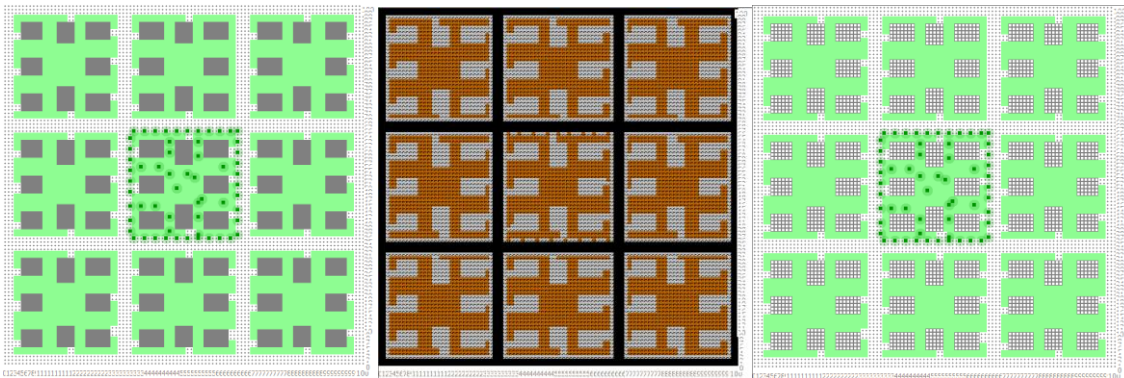


Figura 77: Modelo de quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário): Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.

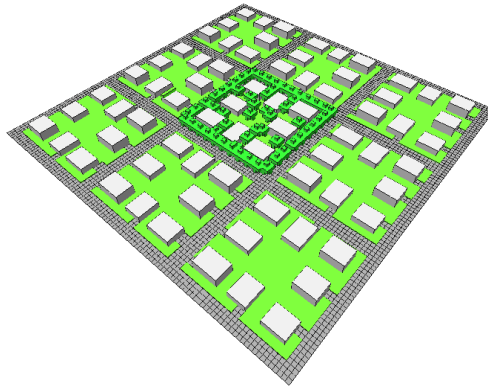


Figura 78: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário) com vegetação. Fonte: Autor.

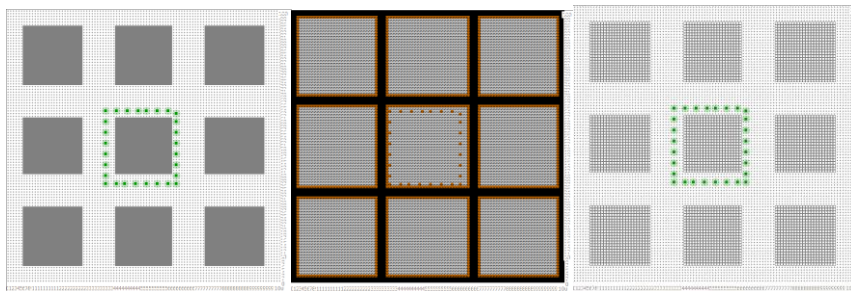


Figura 79: Modelo de quadras 3x3 LCZ 8: Vista de dos edifícios e vegetação (esquerda); seu perfil de solo (meio); perfil de vegetação (direita). Fonte: Autor.

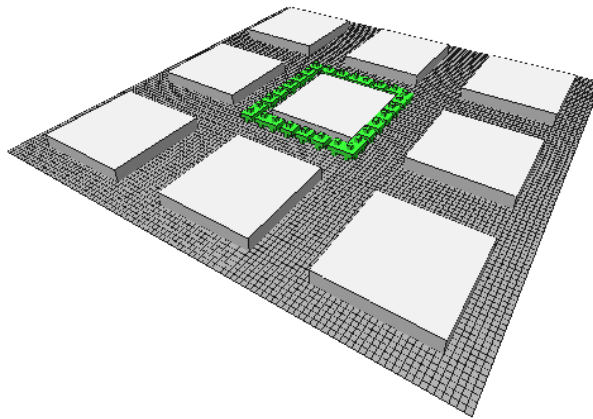


Figura 80: Isométrica das quadras 3x3 LCZ 8 com vegetação. Fonte: Autor.

5.10 Simulações no ENVI-met

São apresentadas 22 simulações paramétricas no ENVI-met, sob diferentes cenários climáticos, diferentes tipologias de LCZ, com a presença ou ausência da vegetação e com diferentes LAD

As simulações foram divididas em 4 grupos:

1. O primeiro apresenta as simulações LCZ com e sem vegetação no contexto climático atual, com dados microclimáticos levantados por Shinzato et al (2019).
2. O segundo apresenta as simulações LCZ com e sem vegetação no cenário climático futuro para o mês de dezembro do período 2079 a 2099, seguindo as projeções RCP 8.5 do Projeta CPTEC/INPE para São Paulo.
3. O terceiro apresenta as simulações LCZ com e sem vegetação no cenário climático futuro e corresponde ao dia mais quente dentro do período de 2006 a 2099, seguindo as projeções RCP 8.5 do Projeta CPTEC/INPE.
4. O quarto apresenta comparações entre simulações nas condições climáticas atuais²², nas quais a vegetação foi parametrizada com diferentes valores de LAD para a tipologia LCZ 6. Esse quarto grupo de simulações tem como objetivo comparar o LAD medido em campo, calculado com o pós-processamento de imagens no Can-Eye, com o valor de LAD pré-definido²³.

²² Dados climáticos de Shinzato et al (2019).

²³ Valor LAD=1m³/m³ para as células da copa da Sibipiruna, sugerido pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato.

Quadro 1: Tipologias LCZ simuladas e seus respectivos cenários climáticos

(1) Cenário Climático Atual (Dados de Shinzato et al (2019))	
Sem Vegetação	Descrição
LCZ3.SVEG.ATUAL	LCZ 3 sem vegetação sob condições climáticas atuais
LCZ6.SVEG.ATUAL	LCZ 6 sem vegetação sob condições climáticas atuais
LCZ8.SVEG.ATUAL	LCZ 8 sem vegetação sob condições climáticas atuais
Com Vegetação	Descrição
LCZ3.CVEG.ATUAL	LCZ 3 com vegetação sob condições climáticas atuais
LCZ6.CVEG.ATUAL	LCZ 6 com vegetação sob condições climáticas atuais
LCZ6.CVEG.ORI.ATUAL	LCZ 6 em sua forma original, com vegetação (viária) e sob condições climáticas atuais
LCZ8.CVEG.ATUAL	LCZ 8 com vegetação sob condições climáticas atuais
(2) Projeção Futura (Dados de Projeta INPE) DEZ (2079-2099)	
Sem Vegetação	Descrição
LCZ3.SVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 3 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
LCZ6.SVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 6 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
LCZ8.SVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 8 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
Com Vegetação	Descrição
LCZ3.CVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 3 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
LCZ6.CVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 6 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
LCZ8.CVEG.RCP8.5DEZ	LCZ 8 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (DEZ 2079-2099)
(3) Projeção Futura (Dados de Projeta INPE) 23.11.2099 (Dia mais quente)	
Sem Vegetação	Descrição
LCZ3.SVEG.RCP8.5MAX	LCZ 3 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
LCZ6.SVEG.RCP8.5MAX	LCZ 6 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
LCZ8.SVEG.RCP8.5MAX	LCZ 8 sem vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
Com Vegetação	Descrição
LCZ3.CVEG.RCP8.5MAX	LCZ 3 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
LCZ3.CVEG.RCP8.5MAX	LCZ 3 com vegetação mais adensada e sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
LCZ6.CVEG.RCP8.5MAX	LCZ 6 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
LCZ8.CVEG.RCP8.5MAX	LCZ 8 com vegetação sob condições climáticas RCP 8.5 (23.11.2099)
(4) Comparações de LAD (Leaf Area Density)	
LCZ6LAD1.0	LCZ 6 em sua forma original com vegetação original + viária com células LAD = 1m ² /m ³ (Média de copa LAD=0,67m ² /m ³).
LCZ6LAD0.3	LCZ 6 em sua forma original com vegetação original + viária com células LAD = 0.44m ² /m ³ (Média de copa LAD = 0,3m ² /m ³ – valor de medido em campo)

A tabela abaixo apresenta os dados de configuração e de entrada no ENVI-met, que foram utilizados na simulação juntamente com os dados microclimáticos levantados por Shinzato et al (2019).

Start Simulation at day	03.04.2016
Wind Speed in 10m ab. Groud (m/s)	1 m/s (novo)
Specific Humidity in 2500m (g Water/ kg air)	8
Simulation Duration	24hrs
Simulation Start Hour:	05:00
Simulation Ending Hour	4:59
Nesting Grids	4
Simulation Resolution	3m
Simulation Type	<i>full forcing</i>
Soil Humidity (Upper Layer 0-20cm))	65
Soil Humidity (Middle Layer 20-50cm))	70
Soil Humidity (Lower Layer 50-200cm))	75
Soil Humidity (Bedrock Layer below 200cm)	75
Soil Initial Temperature (Upper Layer 0-20cm)	20
Soil Initial Temperature (Middle Layer 20-50cm)	20
Soil Initial Temperature (Lower Layer 50-200cm)	19
Soil Initial Temperature (Bedrock Layer below 200cm)	18

Tabela 12: Dados de entrada para o cenário climático atual 03.04.2016. Fonte: Autor.

Seguem abaixo os dados de entrada para as simulações de projeções climáticas futuras no cenário RCP 8.5: dezembro (2079-2099) e 23.11.2019 (dia mais quente do período de 2006 -2099 segundo a Plataforma Projeta CPTEC/INPE).

Start Simulation at day	23.11.2099
Wind Speed in 10m ab. Groud (m/s)	1m/s
Wind Direction (0N/90E/180S/270W)	135
Specific Humidity in 2500m (g Water/ kg air)	8
Simulation Duration	24hrs
Simulation Start Hour:	00:00
Simulation Ending Hour	23:59
Nesting Grids	4
Simulation Resolution	3m
Simulation Type	<i>simple forcing</i>
Soil Humidity (Upper Layer 0-20cm))	65
Soil Humidity (Middle Layer 20-50cm))	70
Soil Humidity (Lower Layer 50-200cm))	75
Soil Humidity (Bedrock Layer below 200cm)	75
Soil Initial Temperature (Upper Layer 0-20cm)	20
Soil Initial Temperature (Middle Layer 20-50cm)	20
Soil Initial Temperature (Lower Layer 50-200cm)	19
Soil Initial Temperature (Bedrock Layer below 200cm)	18

Tabela 13: Dados de entrada para o cenário de projeções climáticas futuras.

5.10 Cálculo de PET (Physiological Equivalent Temperature)

O ENVI-met conta com o plugin *Bio-met* capaz de calcular quatro índices de conforto comumente utilizados internacionalmente: PMV/PPD²⁴, PET²⁵, UTCI²⁶ e SET²⁷. Nessa pesquisa o índice de conforto térmico utilizado será o PET e TEP²⁸ para todas as simulações realizadas.

A configuração do PET no *Bio-met* estão baseadas na ISO 7730 estão representadas na tabela a seguir (Figura 81):

Set personal parameters

Set personal human parameters

Body parameters

Age of person (y): 35 Gender: Male

Weight (kg): 75.00 Height (m): 1.75

Clothing parameters

Static Clothing Insulation (clo): 0.50

Body metabolism

Basal Rate (W): 84.49

Work Metabolism (W): 63.92 Calculate

Calculate from walking speed (m/s: 1)

Sum metabolic work (W): 148.41

Set human parameters

Define body, clothing and activity properties for the person to be analysed by BioMet.

Impact of person properties differs between the individual biomet indicators.

Reset human parameters to default values

Reset settings to a "Standard Human" according to ISO 7730

Update data

OK Cancel

Figura 81: Configuração de cálculo de PET no Bio-met. Fonte: Autor.

5.11 Cálculo de TEP nas simulações do ENVI-met

O índice empírico de conforto TEP (Temperatura Equivalente Percebida), desenvolvido por Monteiro e Alucci (2008) e Monteiro (2018), foi criado para quantificar o conforto térmico em espaços abertos e calibrados para a cidade de São Paulo. Por esse motivo, trata-se de um índice de conforto térmico adequado nesta pesquisa.

²⁴ PMV e PPD - Predicted Mean Vote e Predicted Percentage Dissatisfied (Voto Médio Predito e Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas).

²⁵ Physiological Equivalent Temperature

²⁶ Universal Thermal Climate Index

²⁷ Standard Effective Temperature

²⁸ Temperatura Equivalente Percebida (TEP)

O cálculo de TEP nas simulações do ENVI-met foi realizado por meio do *plugin* desenvolvido pelo Prof. Dr. Helge Simon, engenheiro chefe do modelo computacional ENVI-met, em colaboração para a pesquisa de Gusson (2020).

6. Resultados e Discussões

6.1 Cenário Climático Atual

Este capítulo está dividido em quatro partes. Nas três primeiras serão apresentados os resultados comparativos das simulações no ENVI-met das LCZs (LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8), com presença e ausência da vegetação, em 3 contextos climáticos: (1) clima atual; (2) projeção futura RCP 8.5 para o mês de dezembro, no período 2079-2099; e (3) projeção futura RCP 8.5 do dia mais quente de São Paulo no período 2006 a 2099. A quarta e última parte apresenta a comparação entre simulações com árvores que possuem diferentes valores de LAD em suas copas: $LAD = 0,67\text{m}^2/\text{m}^3$ e $LAD = 0,3\text{m}^2/\text{m}^3$ (medido em campo)

Os resultados das simulações aqui apresentados são todos correspondentes à 1,5 metros²⁹ de altura acima da superfície (eixo z), por ser a altura média aproximada do core central do corpo humano, em pé, nos usos habituais do espaço urbano.

As imagens das simulações representam os resultados comparativos entre os cenários com vegetação e sem vegetação, nos horários mais críticos de temperatura do ar, temperatura radiante média (TRM), temperatura de superfície e PET.

6.2 Cenário Climático Atual

6.2.1 Temperatura do Ar

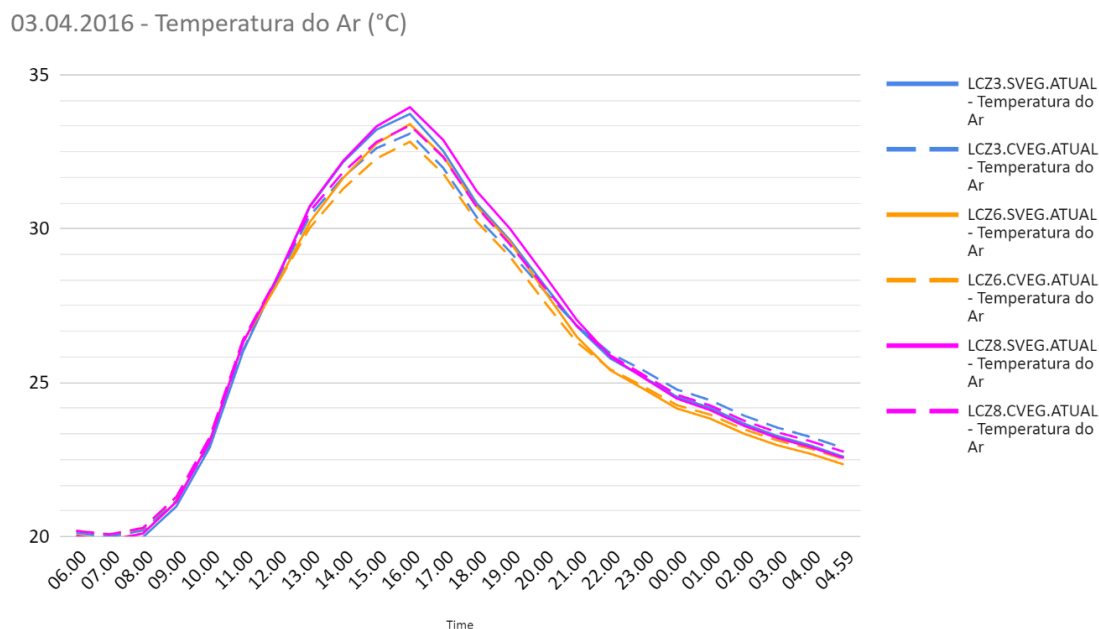


Figura 82: Temperatura do ar para cada LCZ, com e sem vegetação, no cenário climático atual.

Ao se observar os resultados de temperatura do ar das simulações, observa-se para todos os cenários LCZs que a presença da vegetação reduz a temperatura do ar durante o dia, destacando-se, principalmente, o período da tarde. Durante a noite, o efeito da vegetação na temperatura do ar é praticamente nulo.

Dentro desse cenário, a redução máxima ocorre durante o período mais quente do dia (15 horas), sendo a redução média da temperatura do ar de 0,72 °C em todos os cenários LCZ.

Ao se observar os resultados especializados de temperatura do ar de cada cenário comparativo LCZ (Figura 83, Figura 84 e Figura 85), observa-se que a região onde estão localizadas as árvores são aquelas com maiores diferenças e menores valores de temperatura do ar, podendo atingir pontualmente uma diferença até mesmo superior a 1 °C.

Ao se comparar os valores de temperatura do ar das simulações (Figura 77) LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8, percebe-se que a temperatura do ar nas LCZ 3 e LCZ 8 tendem ser maiores do que na LCZ 6. Esses valores médios indicam o quanto a morfologia urbana é impactante no microclima. A LCZ 6, ainda que sem vegetação, por ser mais aberta e contar com a predominância do solo natural (*loam clay soil*), frente ao solo impermeabilizado pelo concreto

e asfalto, resulta em valores ligeiramente menores de temperatura do ar do que as tipologias LCZ 3 e LCZ 8.

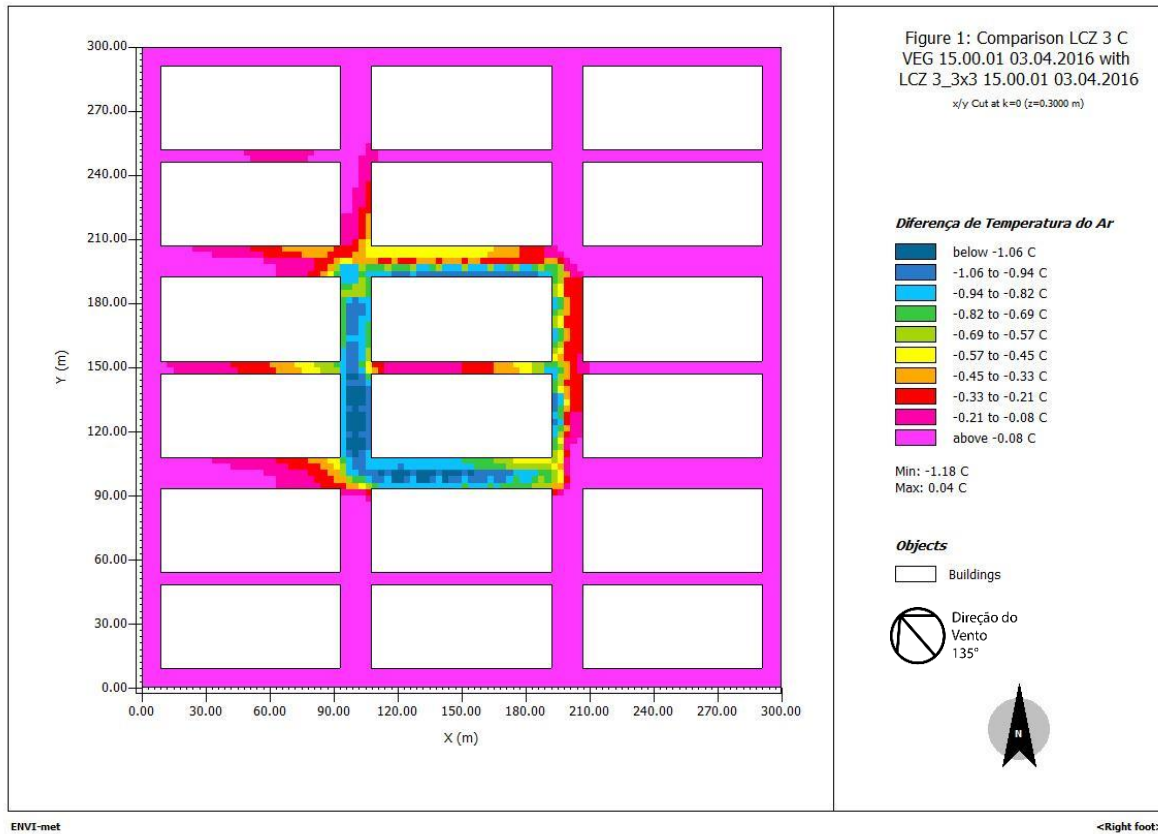


Figura 83: Diferença de temperatura do ar a 1,5m de altura entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação, no cenário climático atual. Fonte: Autor.



Figura 84: Diferença de temperatura do ar a 1,5m de altura entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação cenário no cenário climático atual. Fonte: Autor.



Figura 85: Diferença de temperatura do ar dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.

6.2.2 Temperatura Radiante Média

Observa-se que em todos os cenários LCZ simulados, a presença da vegetação reduz de forma ainda mais expressiva a temperatura radiante média durante o período diurno. Isso se deve principalmente ao efeito de sombreamento proporcionado pela copa das árvores que interceptam a radiação solar, reduzindo, assim, o total de radiação abaixo do dossel.

Nota-se também que os cenários com vegetação, durante a noite, apresentam temperatura radiante média maior do que os cenários sem vegetação. Esse fenômeno ocorre porque, abaixo do dossel, com menor fator de visão de céu, a copa das árvores dificulta a perda de radiação de onda longa, no período noturno.

Nota-se como as diferentes LCZs resultam em diferentes valores de TRM. É possível observar que a LCZ 6 sem vegetação apresenta valores médios de TRM maiores do que a LCZ 3 sem vegetação. Isso ocorre porque, na simulação, a vegetação foi suprimida, deixando espaços abertos no interior dos lotes que elevam o valor médio de TRM dessa LCZ, sem dossel arbóreo para interceptar a radiação solar.

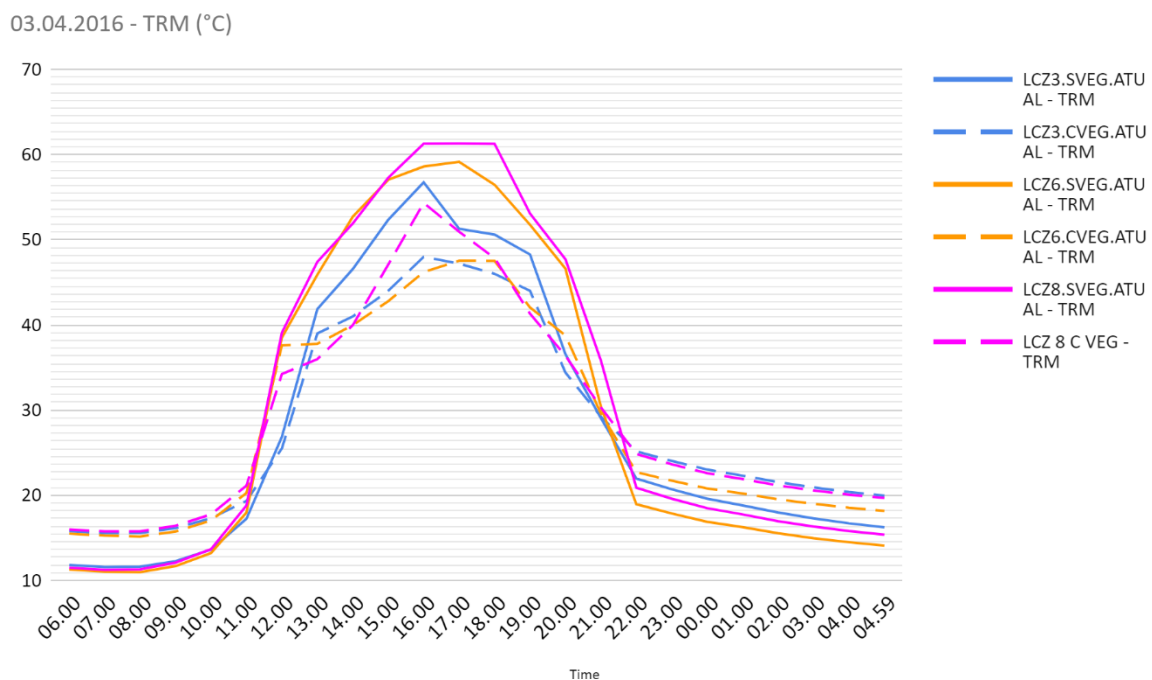


Figura 86: TRM para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).



Figura 87: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.

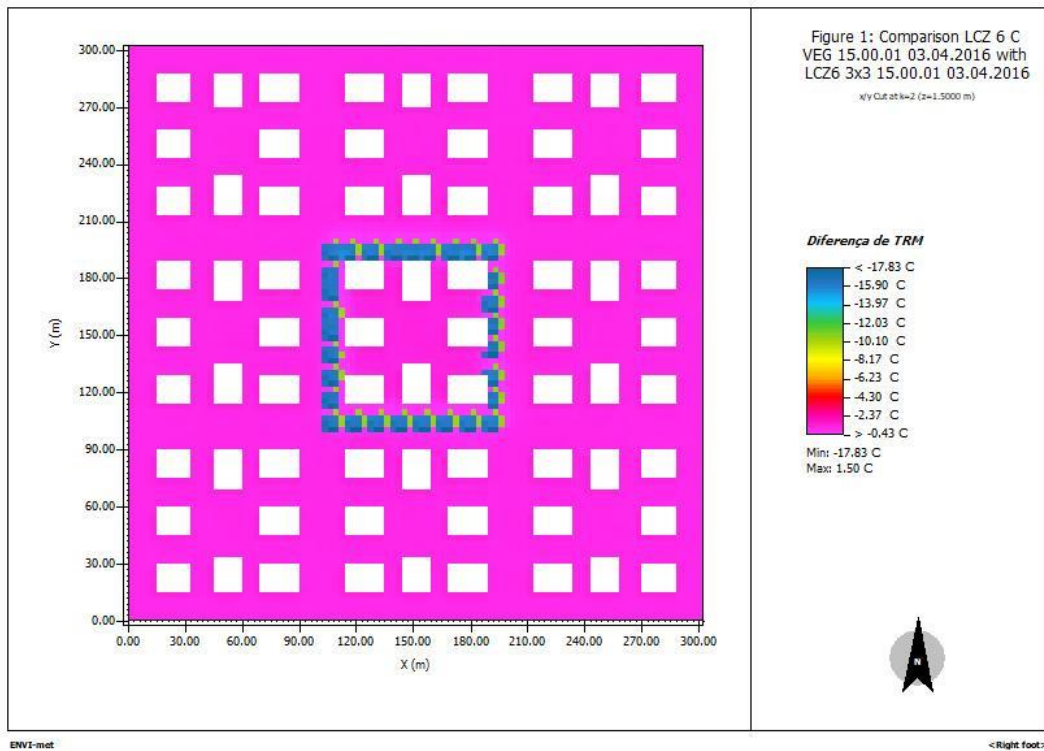


Figura 88: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.

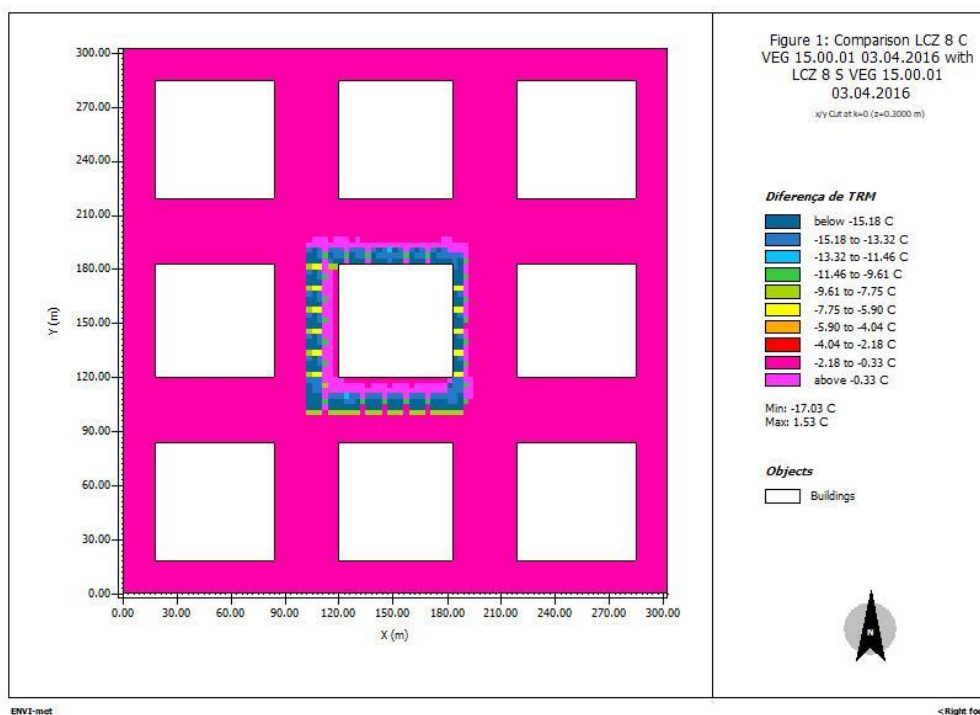


Figura 89: Diferença de TRM dentro da altura de 1,5m entre o cenário LCZ 6 com vegetação e o cenário LCZ 3 sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.

6.2.3 Temperatura de Superfície

Ao se observar os valores médios das simulações de cada LCZ com e sem vegetação, observa-se que a vegetação reduz consideravelmente a temperatura da superfície. Isso ocorre, assim como na TRM, devido à interceptação da radiação solar por meio da copa das árvores que, assim, diminui a quantidade de radiação absorvida pelas superfícies abaixo do dossel.

Observa-se também que, durante a noite, os valores de temperatura de superfície são ligeiramente maiores nos cenários com vegetação; isso ocorre devido à menor perda de radiação de longa emitida pela superfície, abaixo do dossel.

Nota-se os diferentes valores médios de temperatura de superfície para cada LCZ, especialmente durante o período da tarde. Percebe-se que a LCZ 6 possui valores menores de temperatura de superfície em relação a LCZ 8 e a LCZ 3. Isso ocorre pois, apesar da LCZ 6 sem vegetação não possuir arborização no interior da quadra, predomina nessa tipologia o solo exposto, mais frio do que as superfícies de concreto que predominam nas LCZ 3 e LCZ 8.

03.04.2016 - Temperatura de Superfície (°C)

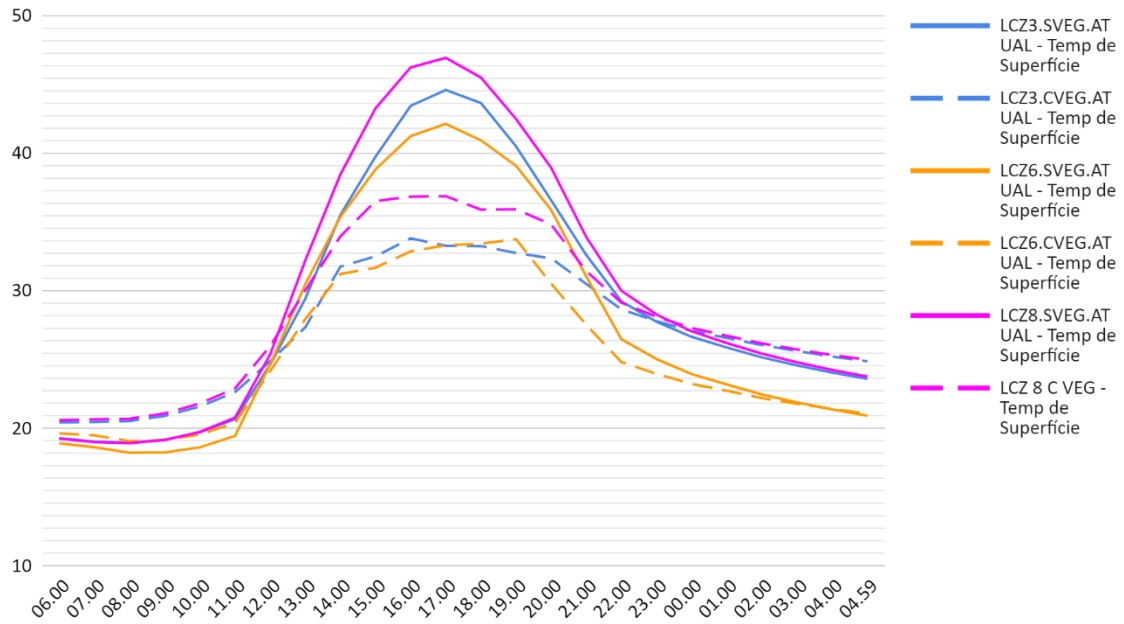


Figura 90: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).

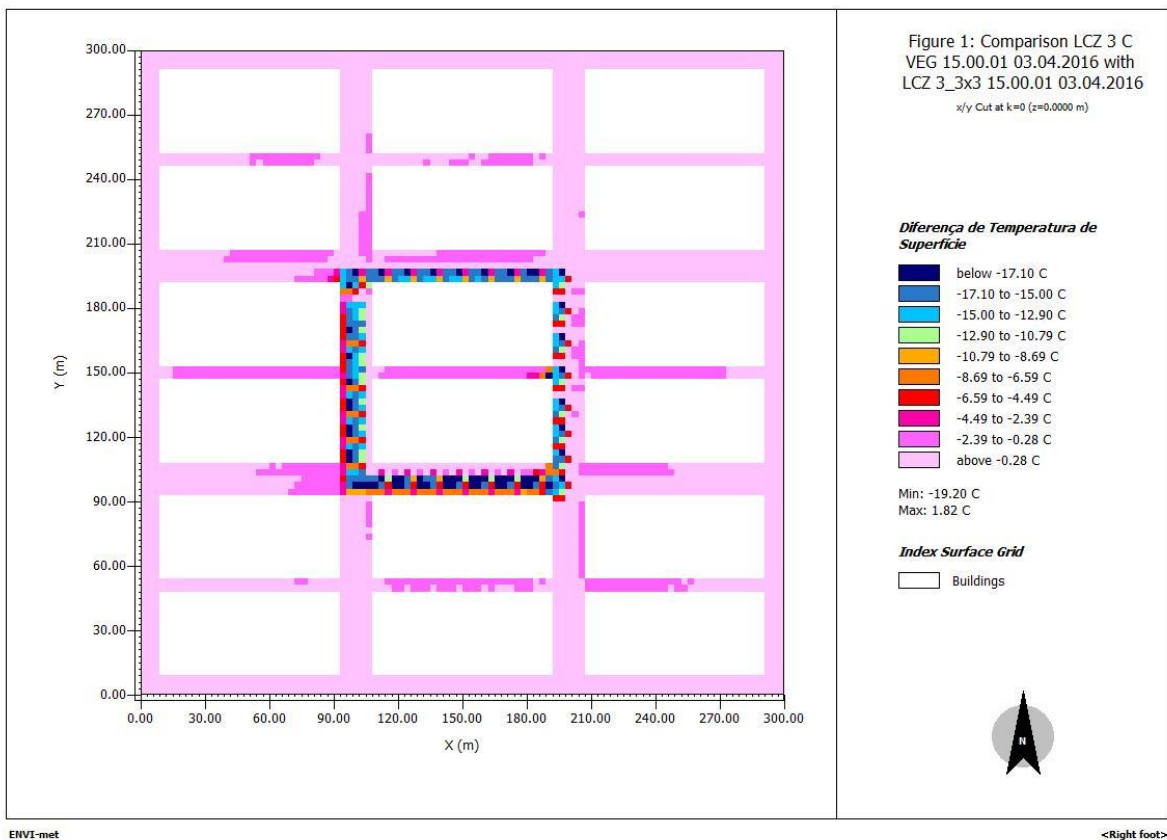


Figura 91: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.



Figura 92: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.

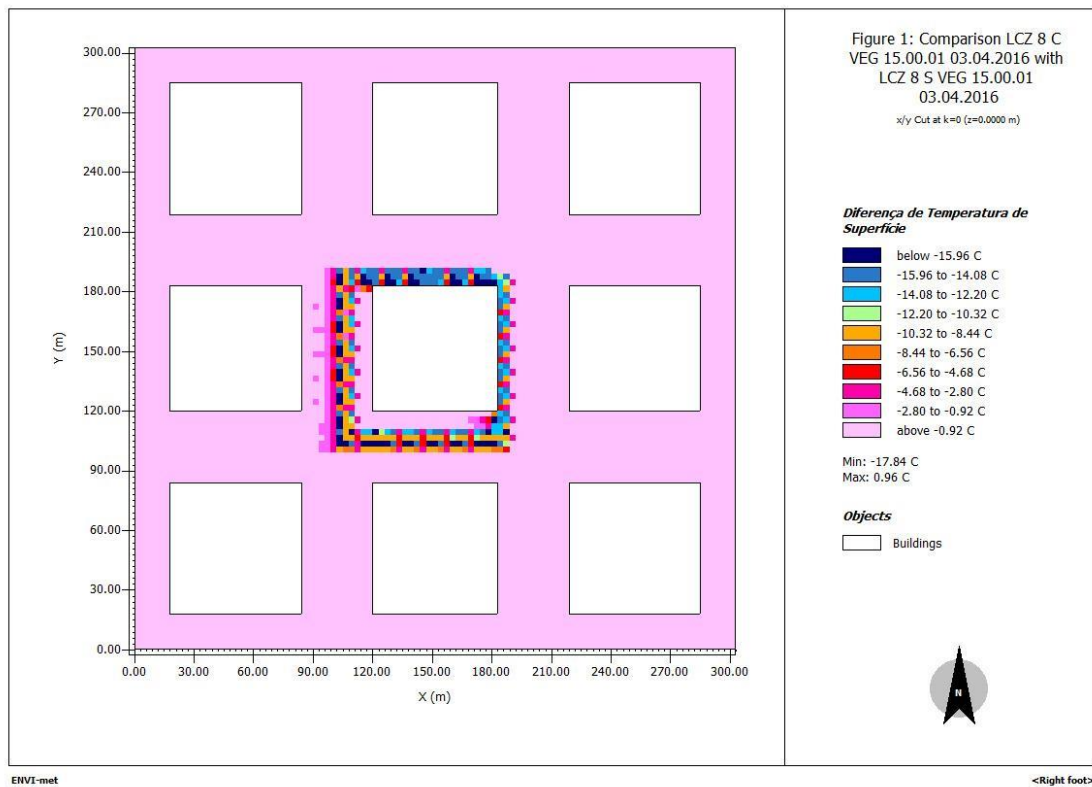


Figura 93: Diferença de temperatura de superfície entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação no cenário climático atual. Fonte: Autor.

6.2.4 PET e TEP

Em todos os cenários simulados, a presença da vegetação reduz os valores médios de PET e TEP durante o período diurno, reduzindo em cerca de 5 °C (para PET) e 7°C (para TEP) no horário mais quente do dia. Isso ocorre principalmente porque os cenários com vegetação possuem valores médios de TRM menores e a TRM é uma das principais variáveis de efeito no valor de PET.

Observa-se a diferença nos valores de PET também para cada tipo de LCZ com e sem vegetação. Nota-se, assim, que a LCZ 6 apresenta valores médios de PET e TEP significativamente mais altos e próximos aos da LCZ 3 sem vegetação. No cenário com vegetação, os valores médios de PET da LCZ 6 são maiores do que na LCZ 3, pelo fato das LCZ 6 não possuírem vegetação no interior das quadras.

No cenário climático atual, para o mês de abril de 2016, para todas as LCZs simuladas, observam-se os valores de PET e TEP considerados altos durante o período da tarde especialmente, indicando desconforto térmico por calor ao se observar as faixas interpretativas de PET e TEP nas Figuras 89 e 90. Durante o período mais quente (15 horas), nos cenários sem vegetação, as faixas interpretativas atingem valores de percepção térmica de muito calor, nos cenários com vegetação, observa-se que os valores atingem valores que indicam percepção térmica menor do que os cenários sem vegetação, sendo a sensação de calor.

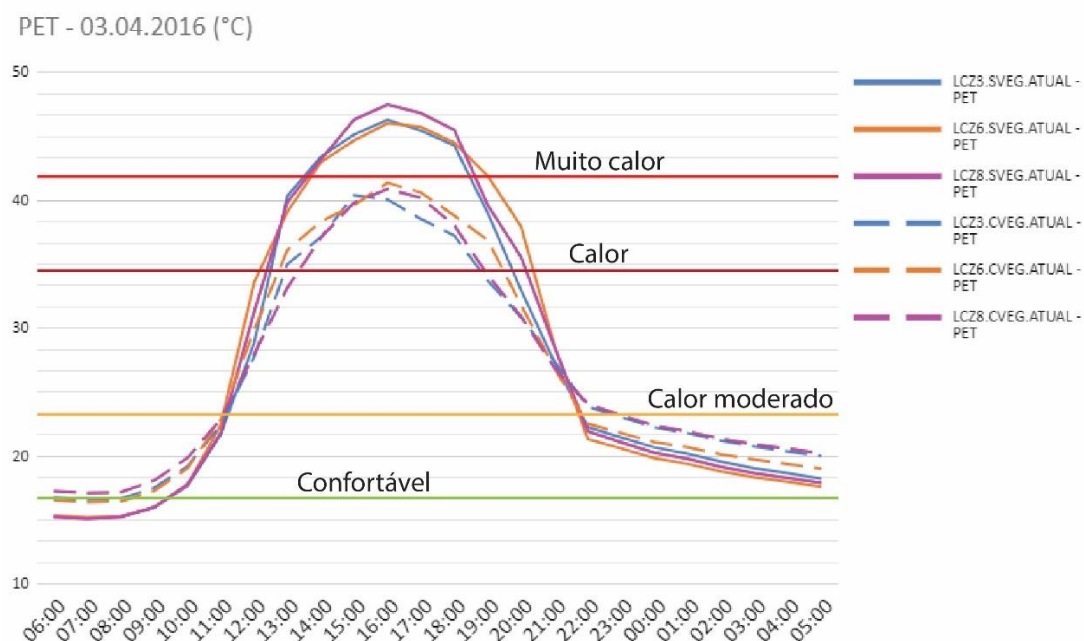


Figura 94: PET para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).

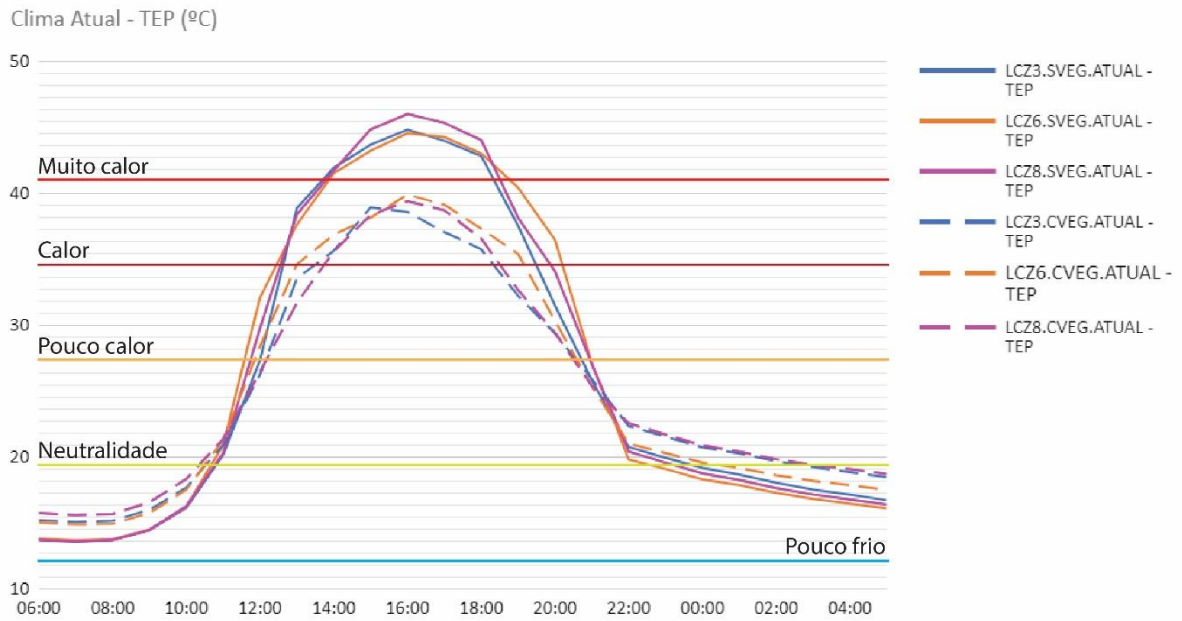


Figura 95: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).

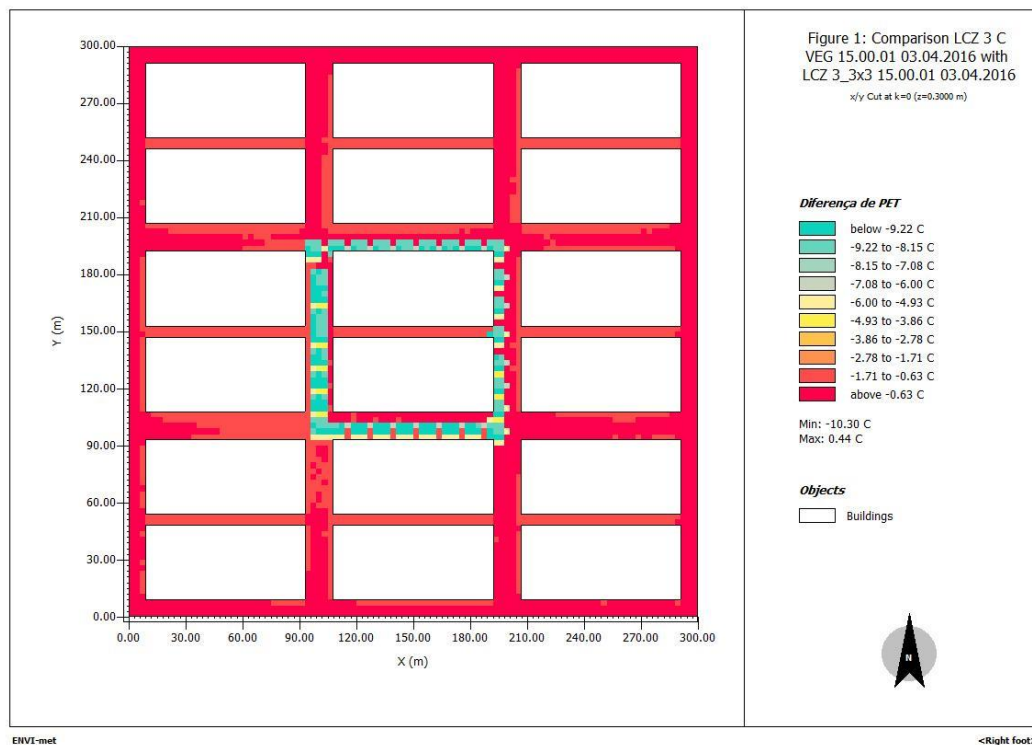


Figura 96: Diferença de PET entre o cenário LCZ 3 com vegetação e o cenário LCZ 3 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.



Figura 97: Diferença de PET entre o cenário LCZ 6 com vegetação e o cenário LCZ 6 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.

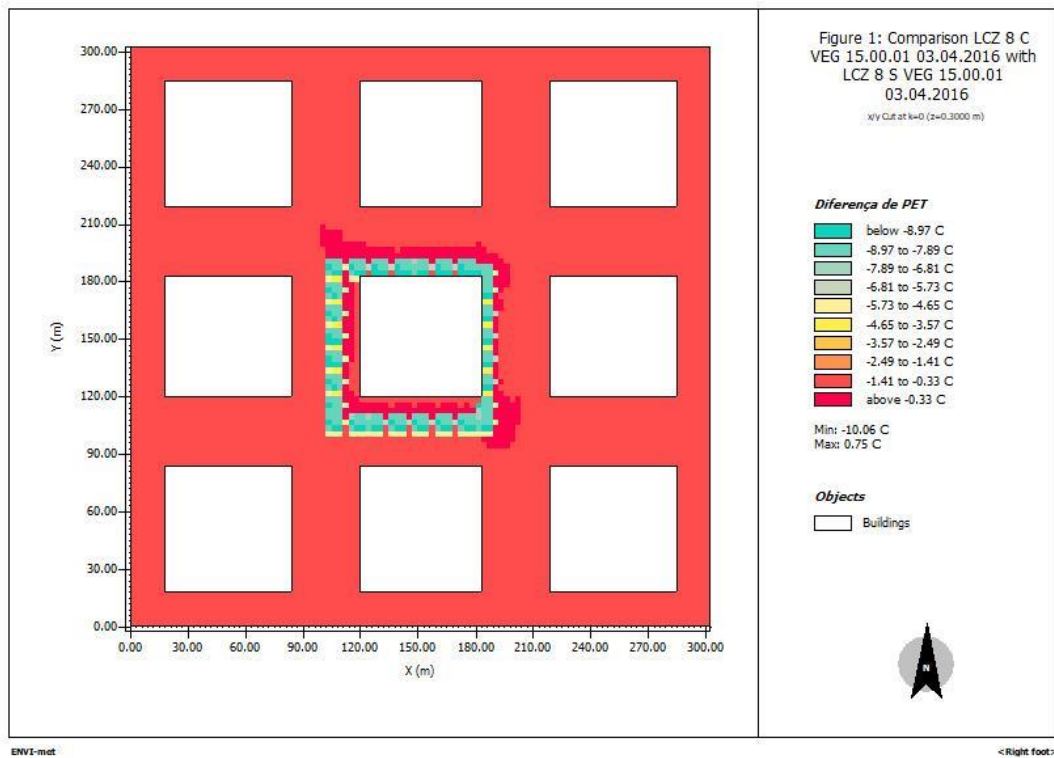


Figura 98: Diferença de PET entre o cenário LCZ 8 com vegetação e o cenário LCZ 8 (sem vegetação) - Cenário climático atual. Fonte: Autor.

6.2.5 Saúde das plantas: Temperatura de Folha

Observa-se que, nos cenários com vegetação simulados, a temperatura das folhas, durante o período mais quente do dia, atinge um máximo de 29°C, um valor dentro do aceitável, levando-se em consideração que a temperatura crítica (T_{crit}) das folhas e a temperatura de tolerância ao calor (T_{50}) é, em média, 50°C, segundo Slot et al (2019). Nota-se uma ligeira diferença nos valores médios de temperatura foliar para cada LCZ, destacando-se que na LCZ 6, elas são um pouco menores.

Percebe-se que temperatura foliar para todos os casos LCZ encontram-se abaixo da temperatura do ar. Por meio da termorregulação, a planta busca alcançar a temperatura ideal para seu metabolismo. Dentro de vários mecanismos³⁰, a evapotranspiração tem papel fundamental para tornar a temperatura foliar mais baixa do que a do ar, como normalmente acontece.

Nesse sentido, a evapotranspiração na folha indica que a vegetação nesse cenário climático e nessas tipologias LCZs não se encontra sob uma situação de estresse térmico e hídrico. A Figura 101 trata da progressão horária de resistência estomática para a simulação. A redução da resistência estomática ao longo do dia indica a abertura dos estômatos e, portanto, o processo de evapotranspiração na folha.

Observa-se na Figura 100 que ocorre variações de temperatura da folha dependendo da altura da copa e da localização da árvore nas simulações. As regiões mais próximas ao solo, possuem valores de temperatura mais altas do que as folhas em regiões mais altas. Isso se deve a maior exposição da radiação longa emitida pelas superfícies abaixo do dossel. A variação de temperatura pode chegar próximo aos 3°C.

³⁰ A temperatura das folhas é influenciada pelo formato e tamanho das folhas (CAMPBELL; NORMAN, 1998). O tamanho e forma das folhas tem papel na condutância da camada limite da folha e também em seu tamanho; a perda de calor por convecção e velocidade do vento são fatores de grande efeito na redução da temperatura da folha. (BONAN, 2016).

03.04.2016 - Temperatura de Folha x Temperatura do Ar (°C)

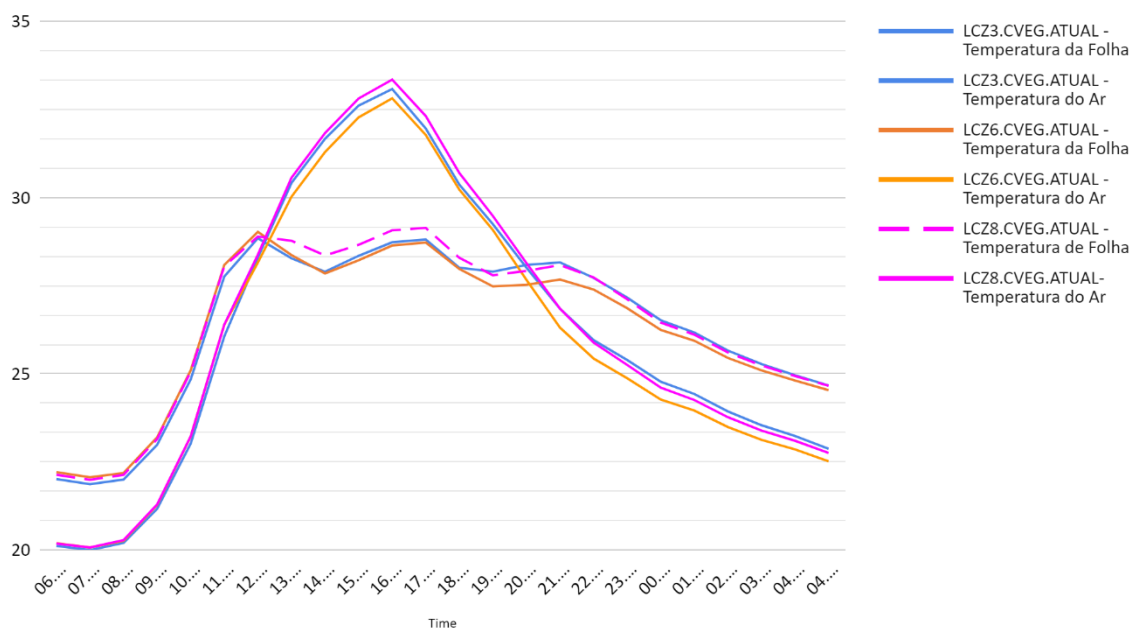


Figura 99: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).

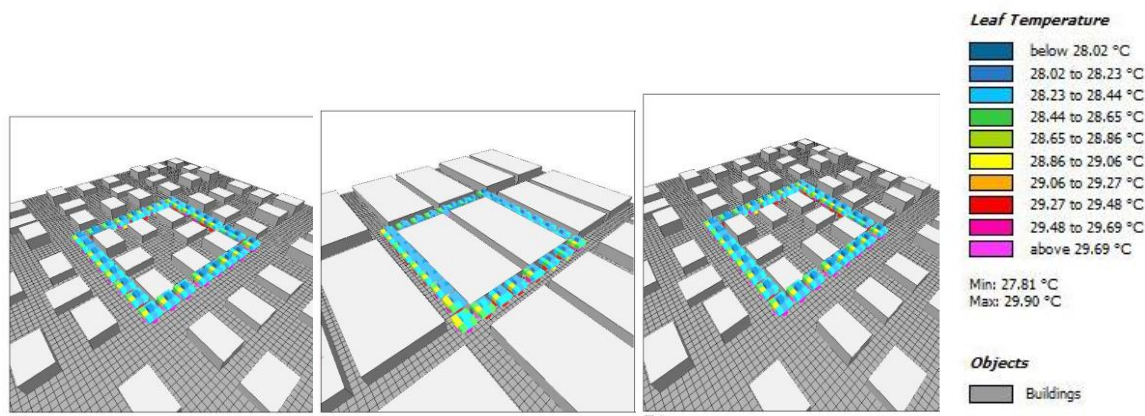


Figura 100: Modelos 3D da temperatura das folhas nos cenários LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8

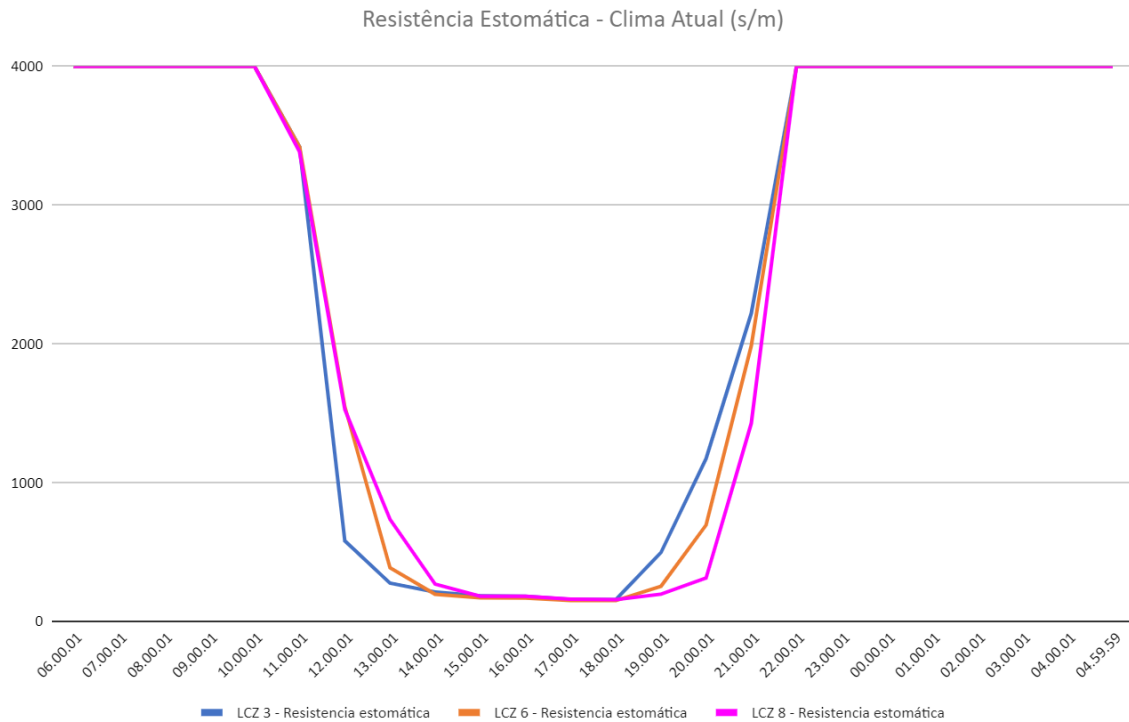


Figura 101: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.

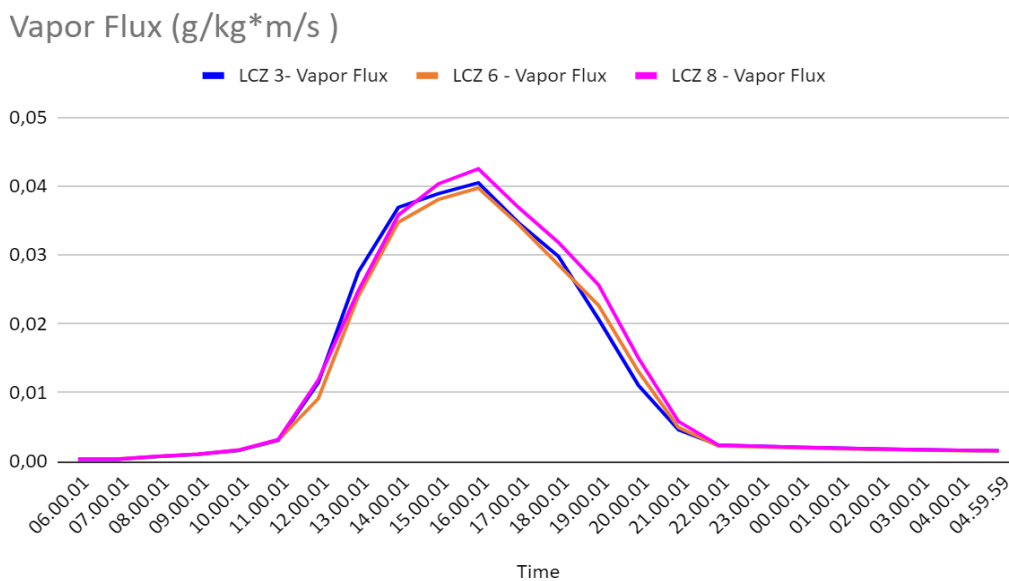


Figura 102: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de Shinzato et al (2019).

A Figura 102 trata do fluxo de vapor na folha, no ENVI-met, representa o fluxo de evaporação e transpiração na folha. Observa-se assim que o Vapor Flux é maior durante o período da tarde, se reduzindo com o anoitecer.

6.3 Projeção de clima futuro RCP 8.5 - dezembro (2079-2099)

6.3.1 Temperatura do Ar

Pelos resultados nota-se que a vegetação, mesmo nesse cenário de projeção climática futura, RCP 8.5, para o mês de dezembro 2079-2099, ainda é capaz de reduzir os valores médios de temperatura do ar (máximo de 0,6°C no horário mais quente da LCZ 8). Isso se deve ao fenômeno de evapotranspiração pelas folhas, que libera calor latente, moderando o aumento da temperatura do ar.

Durante parte do período da noite e início da manhã, os valores de temperatura do ar dos cenários com vegetação são muito próximos, sendo um pouco maiores do que nos cenários sem vegetação.

Observa-se também como a morfologia urbana é capaz de alterar os valores de temperatura do ar. Dentro das LCZs estudadas, predomina-se edificações baixas com uma altura máxima de 9 metros no caso da LCZ 3. O fato das LCZ 3 e LCZ 8 possuírem maiores valores de temperatura do ar, é devido principalmente a predominância de materiais não naturais como o concreto e o asfalto nessas tipologias que são materiais que absorvem mais calor. A LCZ 6, ainda que exista a presença do concreto e asfalto, predomina-se o solo natural que retém menos calor.

DEZ (2079-2099) - Temperatura do Ar (°C)

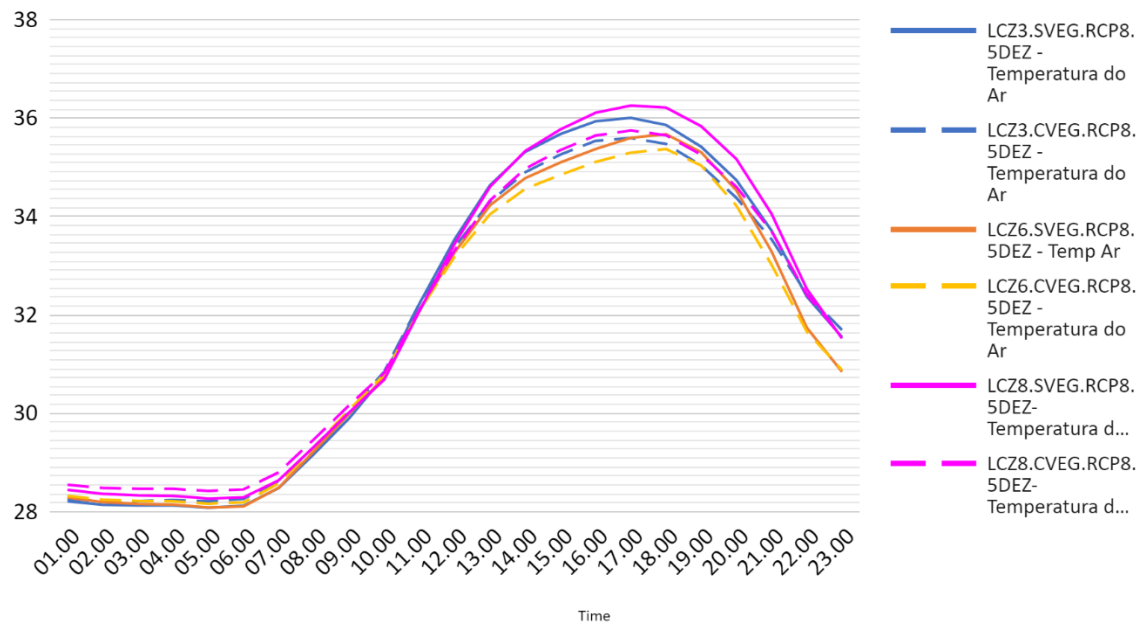


Figura 103: Temperatura do ar para cada LCZ com e sem vegetação na projeção de clima futuro, RCP 8.5, dezembro (2079-2099). Fonte Autor.

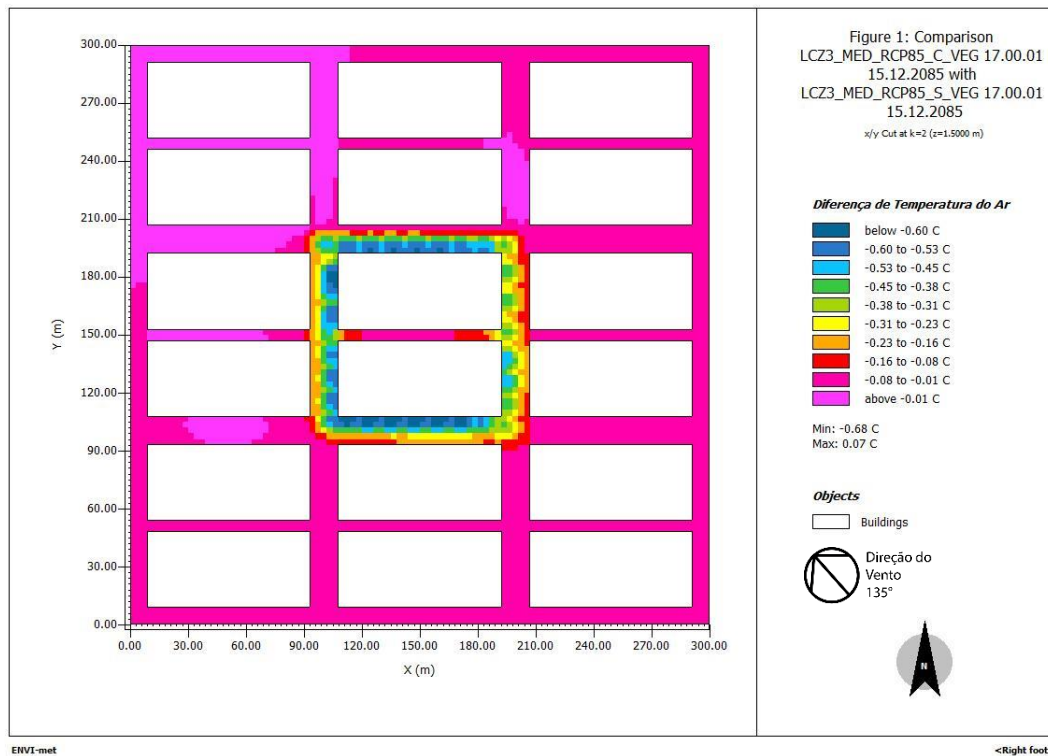


Figura 104: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.



Figura 105: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

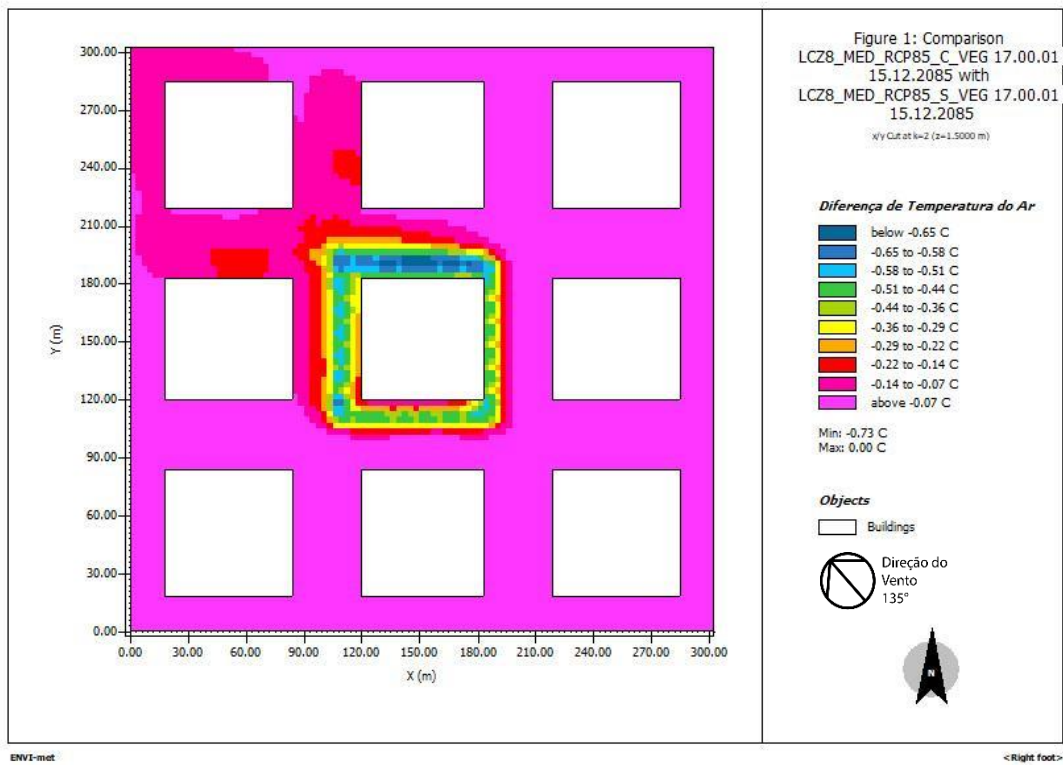


Figura 106: Diferença de Temperatura do ar entre o cenário LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

6.3.2 Temperatura Radiante Média

Observa-se nos gráficos de resultados que a presença da arborização reduz os valores de temperatura radiante média durante o período diurno. Isso ocorre devido à interceptação da radiação solar pela copa das árvores que reduz a radiação direta e difusa absorvida pelas superfícies abaixo do dossel.

Nota-se que os cenários com vegetação, durante a noite, apresentam temperatura radiante média maior do que os cenários sem vegetação. Esse fenômeno ocorre porque, abaixo do dossel, com menor fator de visão de céu, a copa das árvores dificulta a perda de radiação de onda longa, no período noturno.

Observa-se pouca redução nos valores de TRM na LCZ 6 com vegetação em relação ao mesmo cenário sem vegetação. Isso ocorre porque, neste estudo, foram implantadas árvores apenas nas vias, deixando os espaços existentes nos interiores dos lotes expostos à radiação.

Nota-se na visualização da TRM que os efeitos são mais localizados ainda, em relação à mesma visualização da temperatura do ar, com o desenho das copas das árvores em evidência.

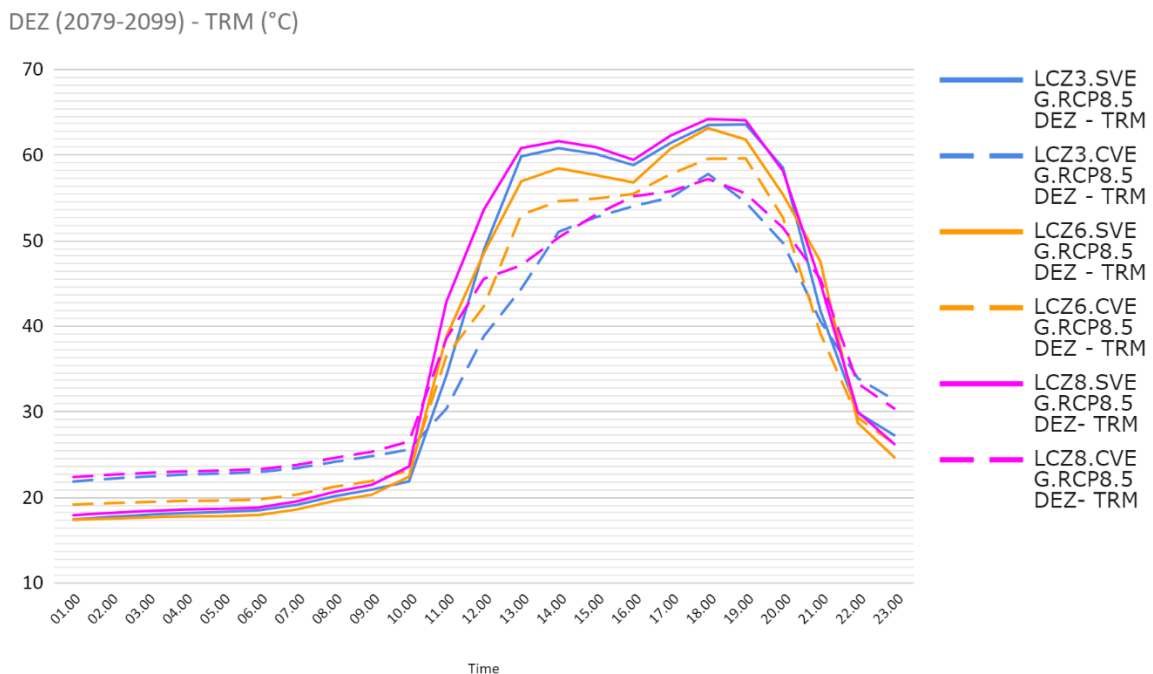


Figura 107: TRM para cada LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.

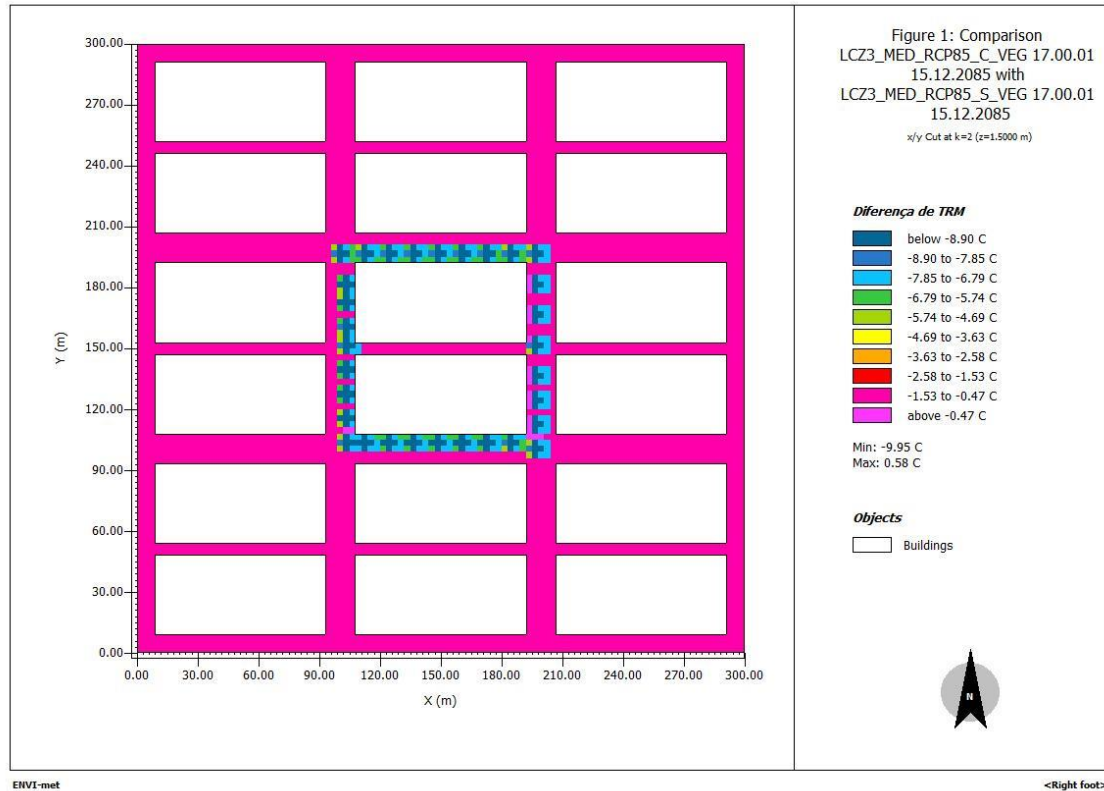


Figura 108: Diferença de TRM entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

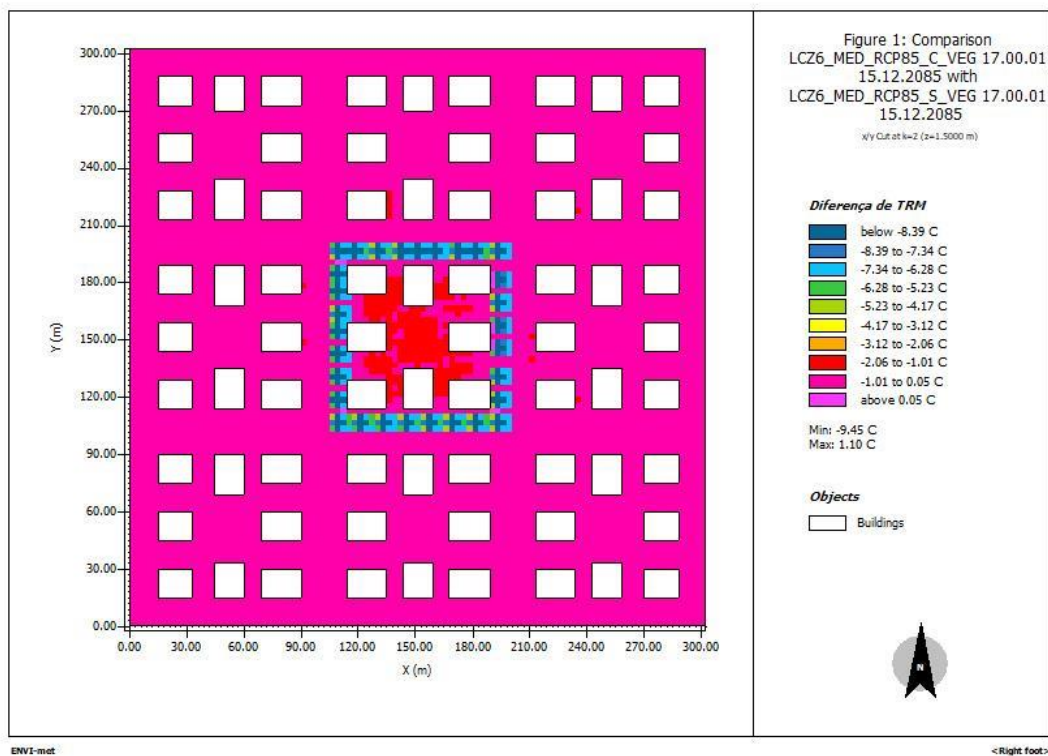


Figura 109: Diferença de TRM entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

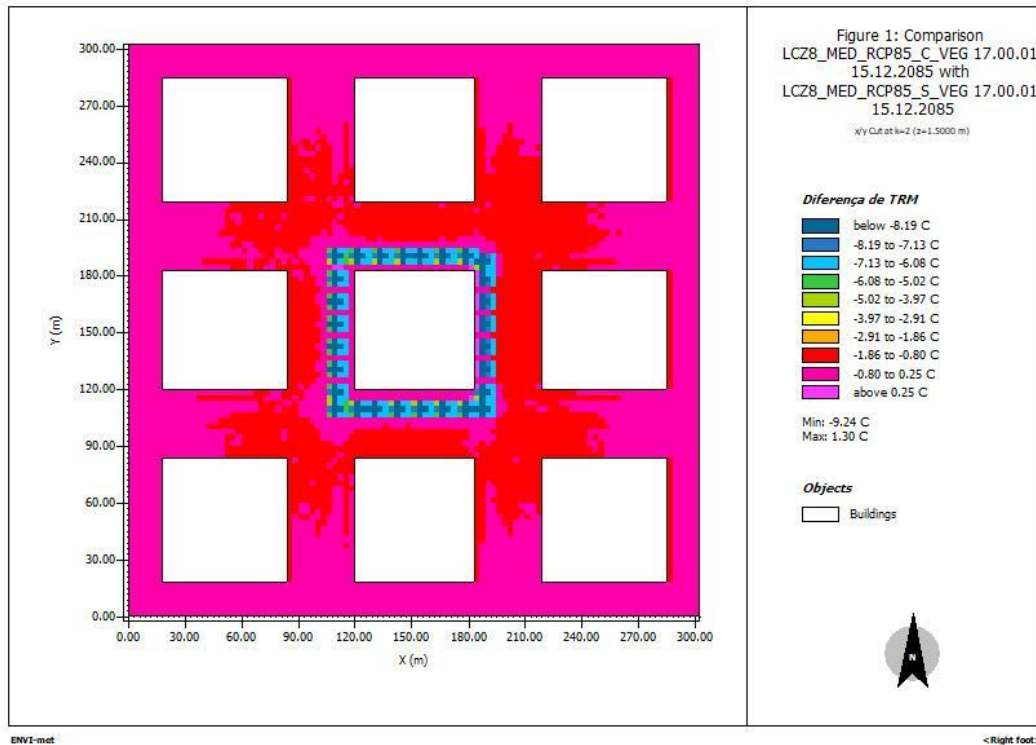


Figura 110: Diferença de TRM entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

6.3.3 Temperatura de Superfície

A vegetação reduz a temperatura média da superfície em todos os cenários LCZ simulados (redução máxima de 13°C na LCZ 3). Isso ocorre, assim como na TRM, devido à interceptação da radiação solar pela copa das árvores que, assim, diminui a quantidade de radiação absorvida pelas superfícies abaixo do dossel.

Nota-se, assim como na TRM, que os valores médios de temperatura de superfície durante o período noturno são levemente superiores nos cenários com vegetação do que nos cenários sem vegetação, pelos mesmos motivos.

DEZ (2079-2099) - Temperatura de Superfície (°C)

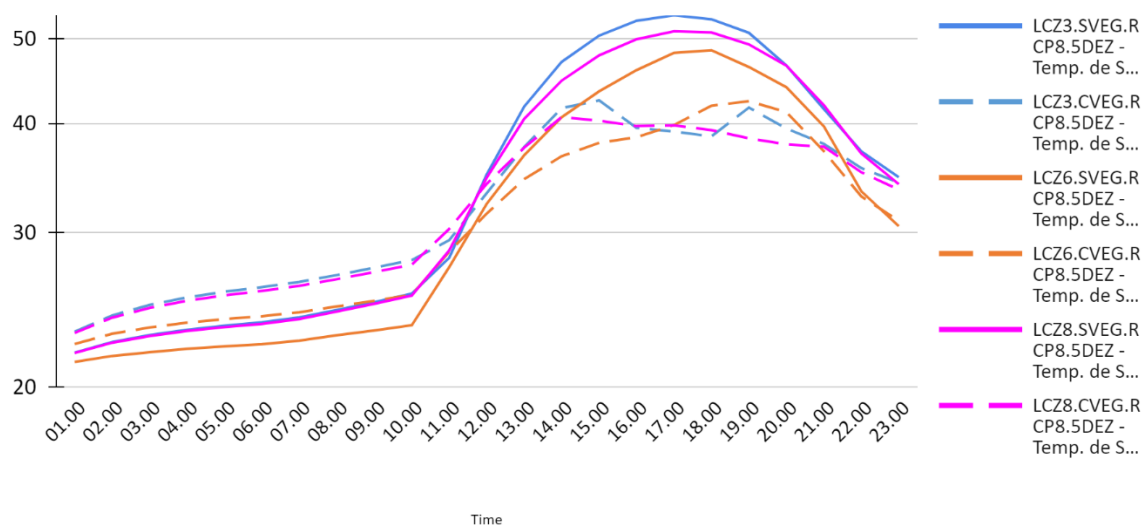


Figura 111: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.

Ao se observar a Figura 112, a Figura 113 e a Figura 114, destaca-se o desenho das copas das árvores na espacialização dos resultados com a diferença entre o cenário com vegetação e sem vegetação. Percebe-se que, pontualmente, a vegetação reduz a temperatura de superfície em até 25,3°C, no caso da LCZ 3. Assim como na TRM, estes resultados também sugerem a pertinência de um novo conjunto de simulações, com menor espaçamento entre os indivíduos arbóreos, que devem resultar numa redução ainda mais expressiva da temperatura de superfície que, por sua vez, também afeta a TRM e, em decorrência disso, índices de conforto mais favoráveis para os usuários.

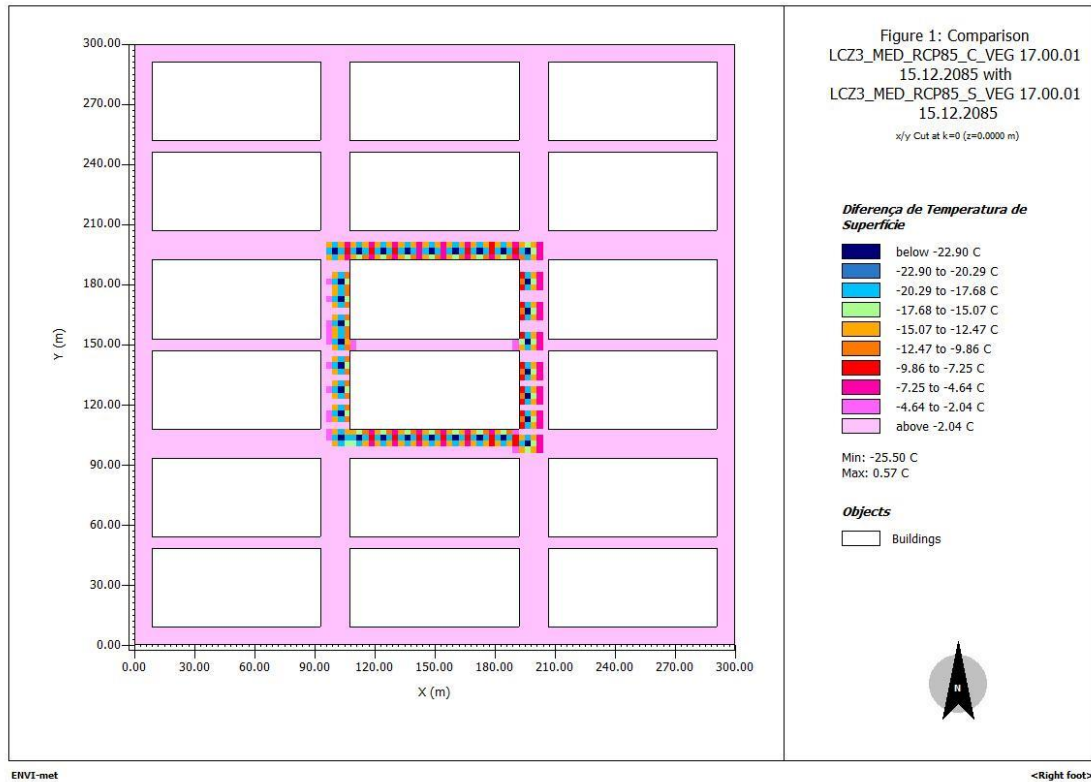


Figura 112: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor

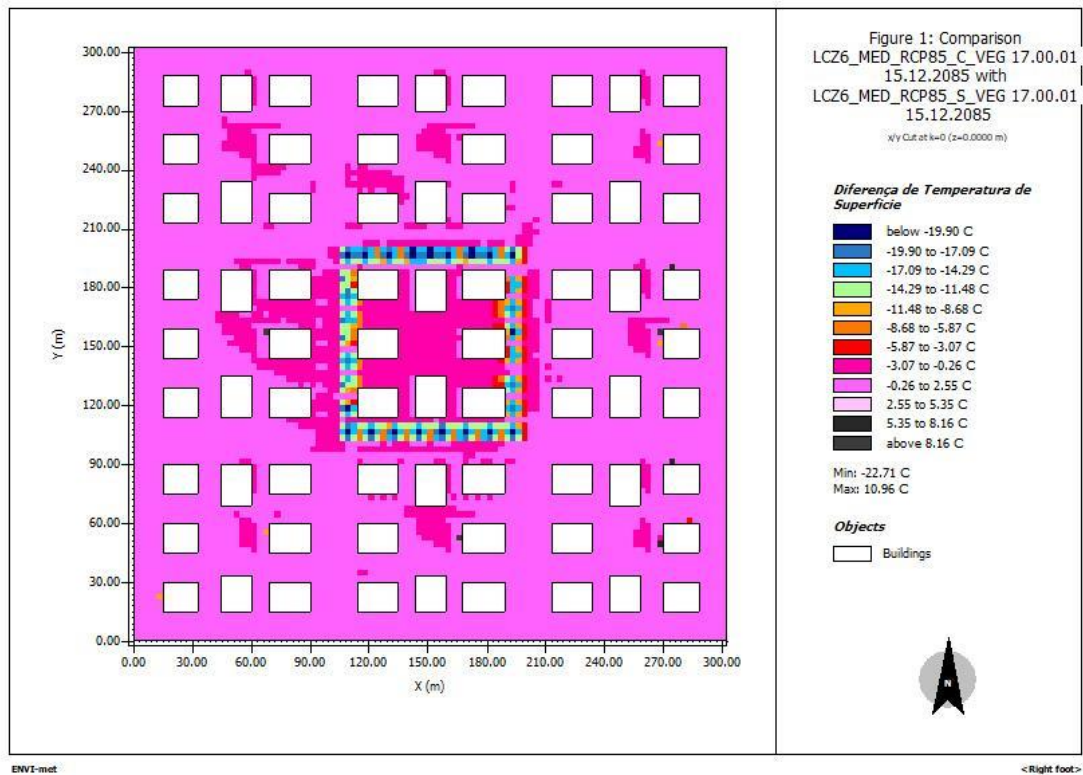


Figura 113: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 6 com vegetação e o cenário sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

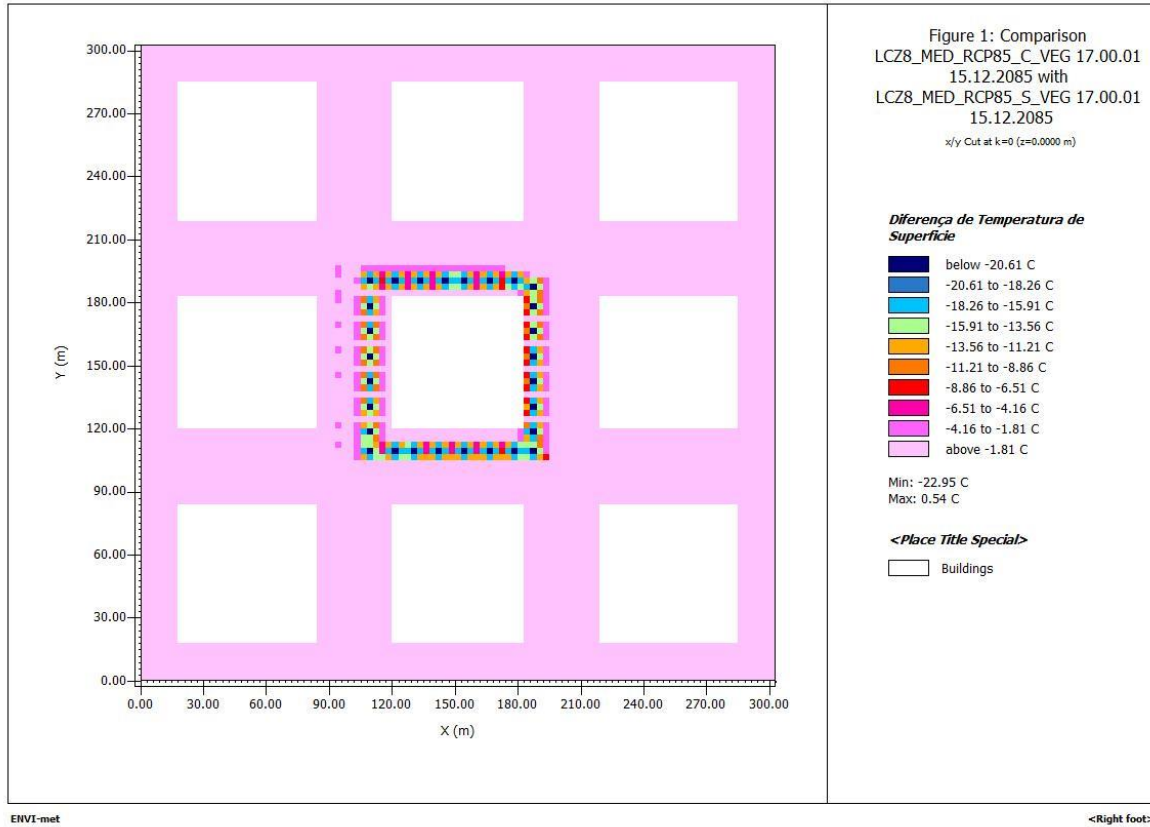


Figura 114: Diferença de temperatura de superfície entre LCZ 8 (com vegetação) e o cenário LCZ 8 (sem vegetação) -Projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

6.3.4 PET e TEP

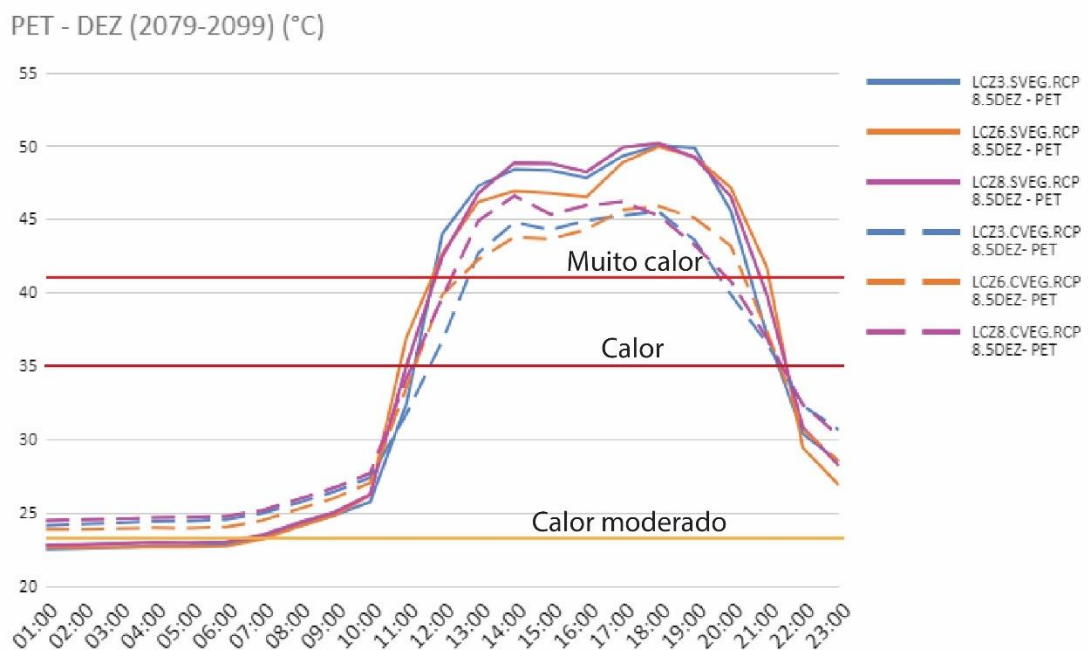


Figura 115: PET para as tipologias LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099). Fonte: Autor.

Observa-se que a vegetação reduz os valores de PET e TEP, principalmente durante o período da tarde. Isso acontece porque a vegetação reduz os valores de TRM, uma importante variável dentro do cálculo de PET.

Isso demonstra que a vegetação, em situações de calor, proporciona melhores condições de conforto térmico, especialmente para as pessoas que estão próximas da vegetação e, mais ainda, abaixo do dossel.

No entanto, observa-se que, mesmo com a presença da vegetação, os valores de PET encontram-se, neste caso, bastante elevados, de até 50°C, indicando desconforto térmico especialmente durante o período da tarde em todos os cenários.

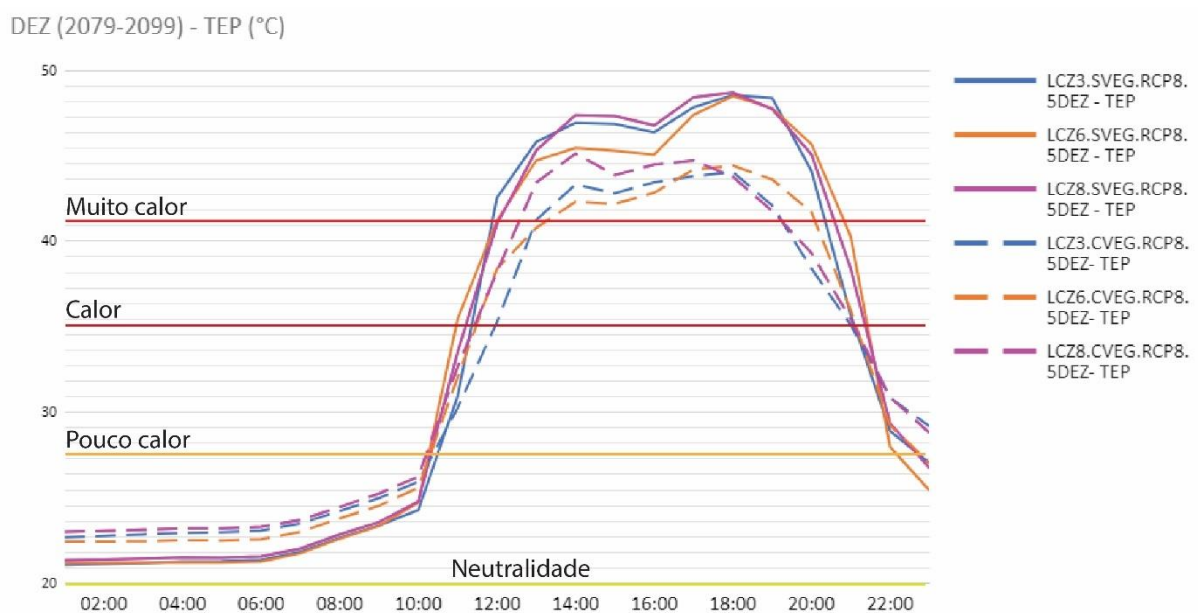


Figura 116: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.

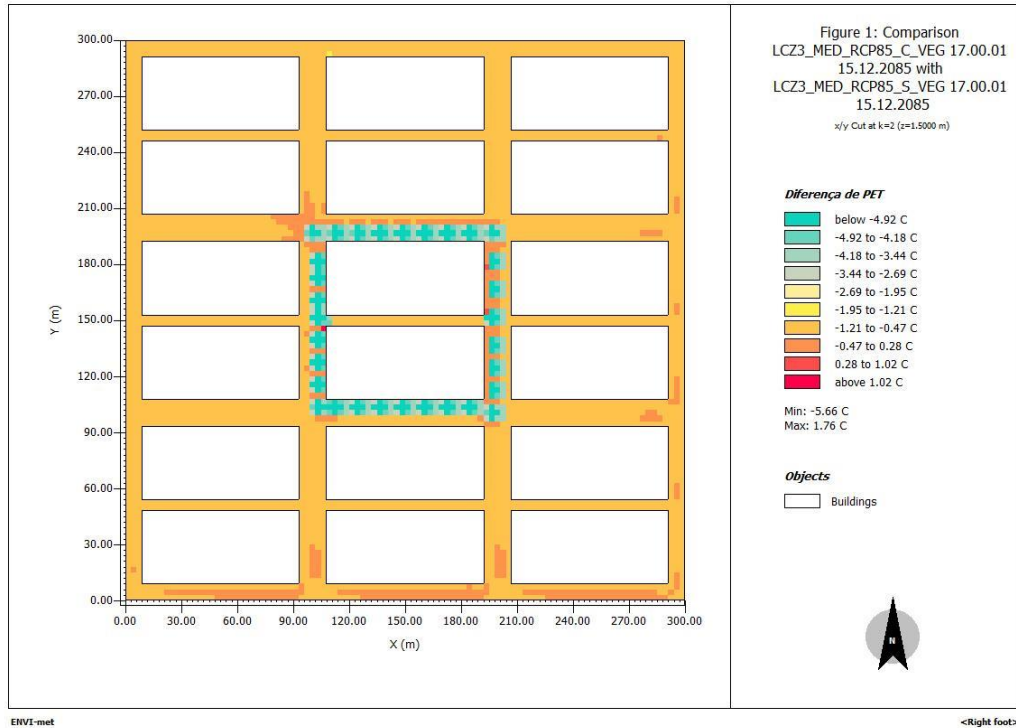


Figura 117: Diferença de PET entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

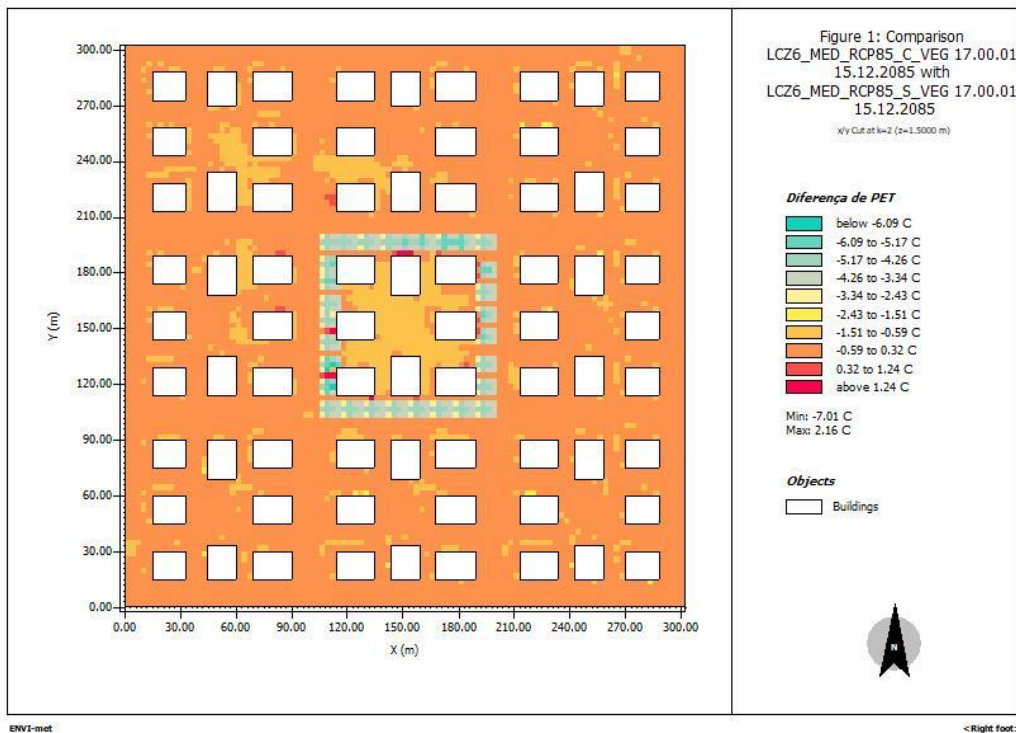


Figura 118: Diferença de PET entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

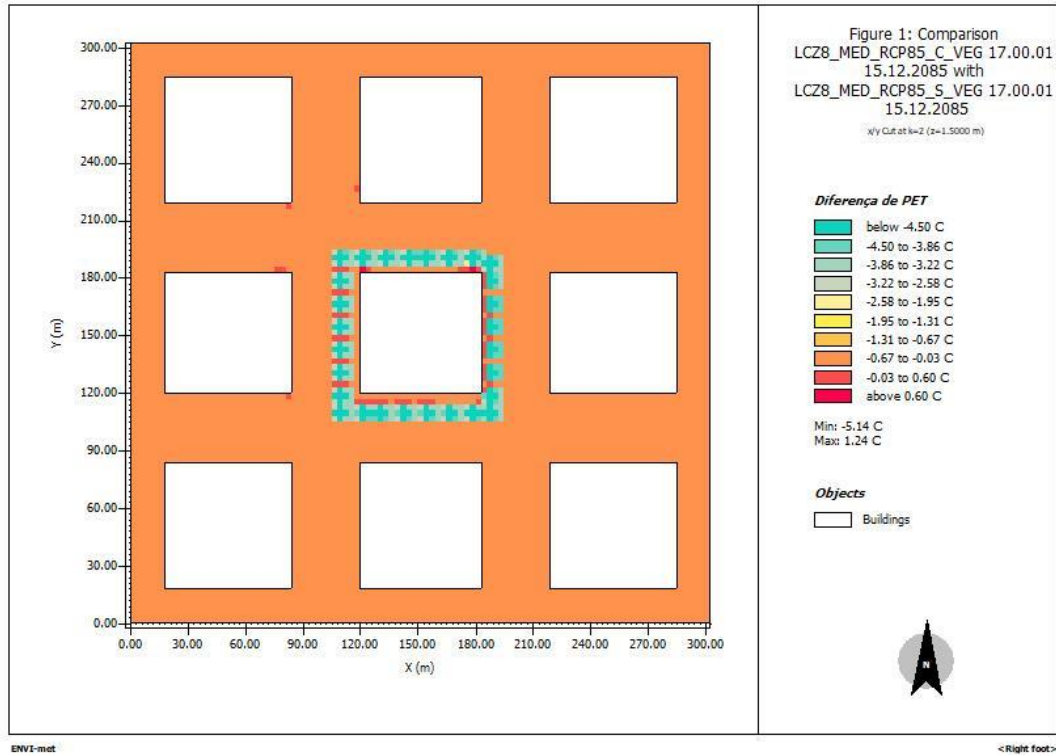


Figura 119: Diferença de PET entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte: Autor.

6.3.5 Saúde das plantas: Temperatura de Folha

As simulações apontam que a temperatura das folhas chega a valores próximos de 36°C nas LCZ 3 e LCZ 8; e 35,5 °C na LCZ 6. Observa-se que a temperatura da folha é menor do que a temperatura do ar durante o período mais quente do dia (Figura 119). Isso ocorre por causa da termorregulação da folha por meio da evapotranspiração. Na Figura 120, é possível observar baixos valores de resistência estomática durante o dia, significando maior condutância entre a folha e o ambiente.

DEZ (2079-2099) - Temperatura de Folha x Temperatura do Ar (°C)

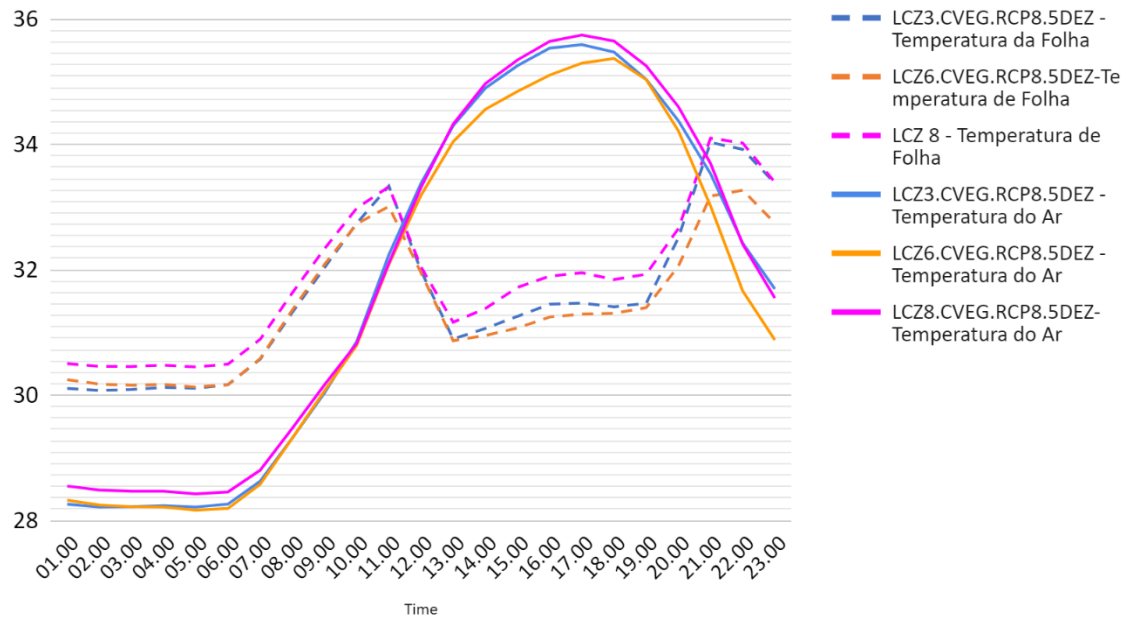


Figura 120: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas atuais de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.

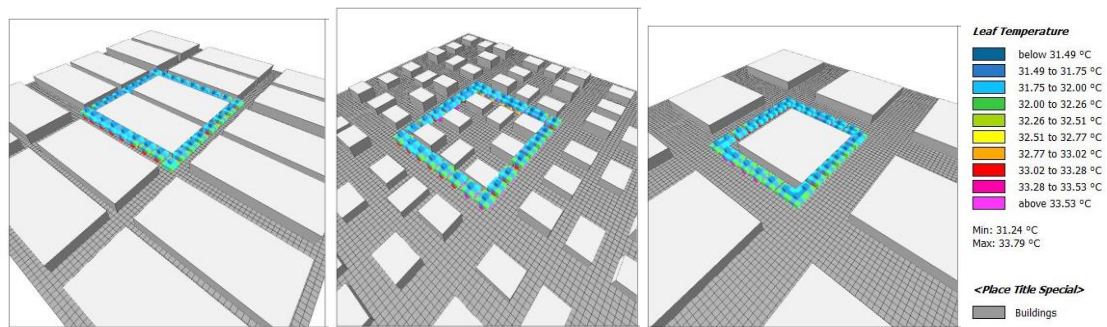


Figura 121: Temperatura das folhas dentro das LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 às 17 horas dentro do cenário climático de dezembro (2079-2099).

Na Figura 123, observa-se que o fluxo de vapor na folha vai se elevando durante o período da tarde e é reduzido conforme o anoitecer.

Observa-se na Figura 121 que ocorre variações de temperatura da folha dependendo da altura da copa e da localização da árvore nas simulações. As regiões mais próximas ao solo, possuem valores de temperatura mais altas do que as folhas em regiões mais altas. Isso se deve a maior exposição da radiação longa emitida pelas superfícies abaixo do dossel. A variação de temperatura pode chegar próximo aos 2,5 °C.

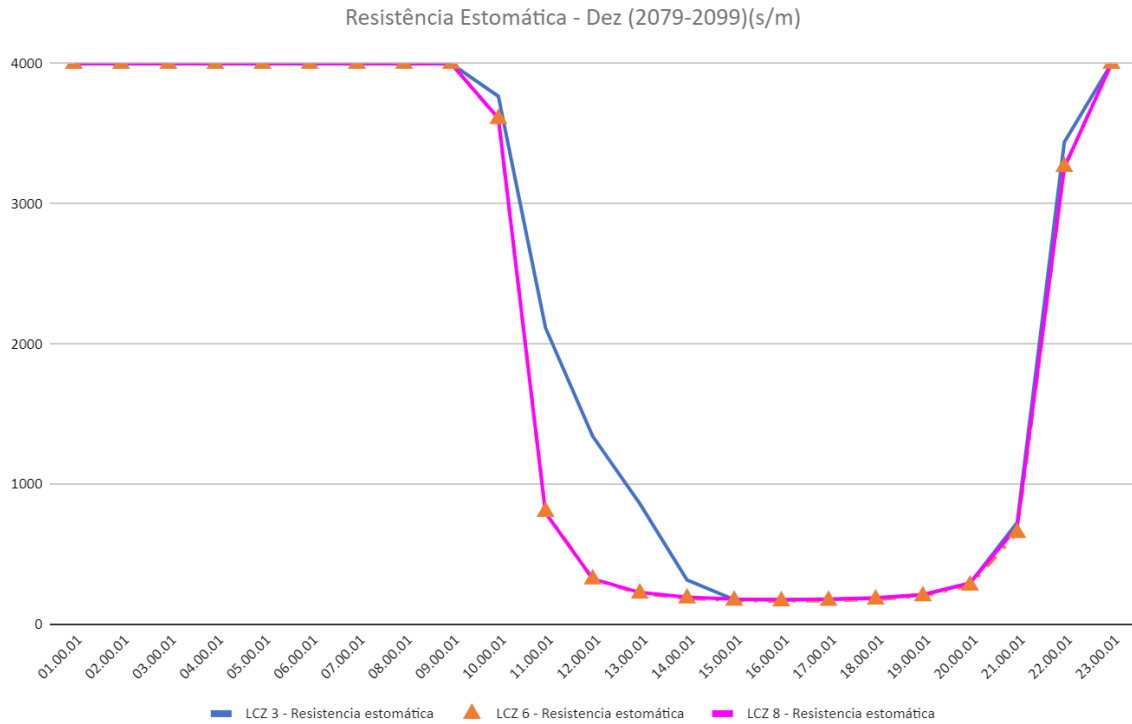


Figura 122: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.

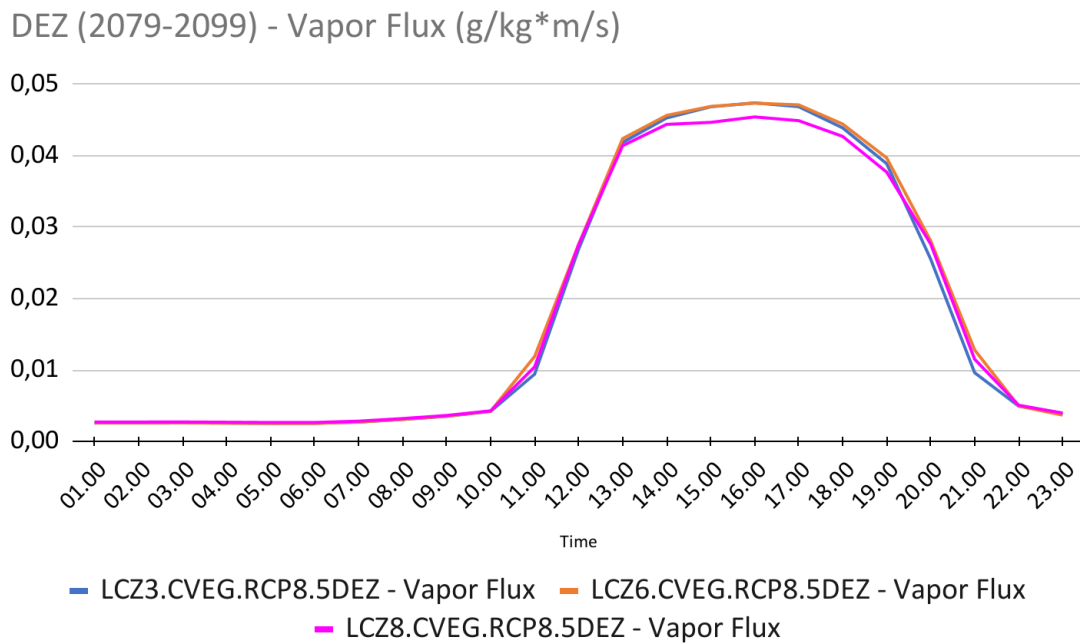


Figura 123: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com vegetação dentro de condições climáticas de dezembro (2079-2099) RCP 8.5. Fonte Autor.

6.4 Cenário Climático: (3) 23.11.2099 (RCP 8.5) - Dia mais quente

6.4.1 Temperatura do Ar

Todas as simulações LCZ no cenário climático RCP 8.5, no dia mais quente do período, em 23.11.2099, demonstram que a vegetação altera muito pouco (máximo de 0,10 °C) os valores médios de temperatura do ar. Isso ocorre porque, quando as plantas estão submetidas a temperaturas mais elevadas, os estômatos se fecham, tornando a evapotranspiração praticamente nula, reduzindo drasticamente o efeito de resfriamento da vegetação.

Apesar do impacto mínimo da vegetação nessa situação, é interessante observar o efeito da morfologia urbana nas diferenças de temperatura do ar. As LCZ 3 e LCZ 8 apresentam valores significativamente maiores do que a LCZ 6. As três morfologias apresentam edificações baixas e, nos modelos, a altura dos edifícios é de, no máximo, 12 metros de altura com a diferença, no caso da LCZ 6, da predominância de solo natural, ao contrário da LCZ 3 e LCZ 8. Esse é um dos principais fatores da diferença de temperatura entre a LCZ 6 e as demais.

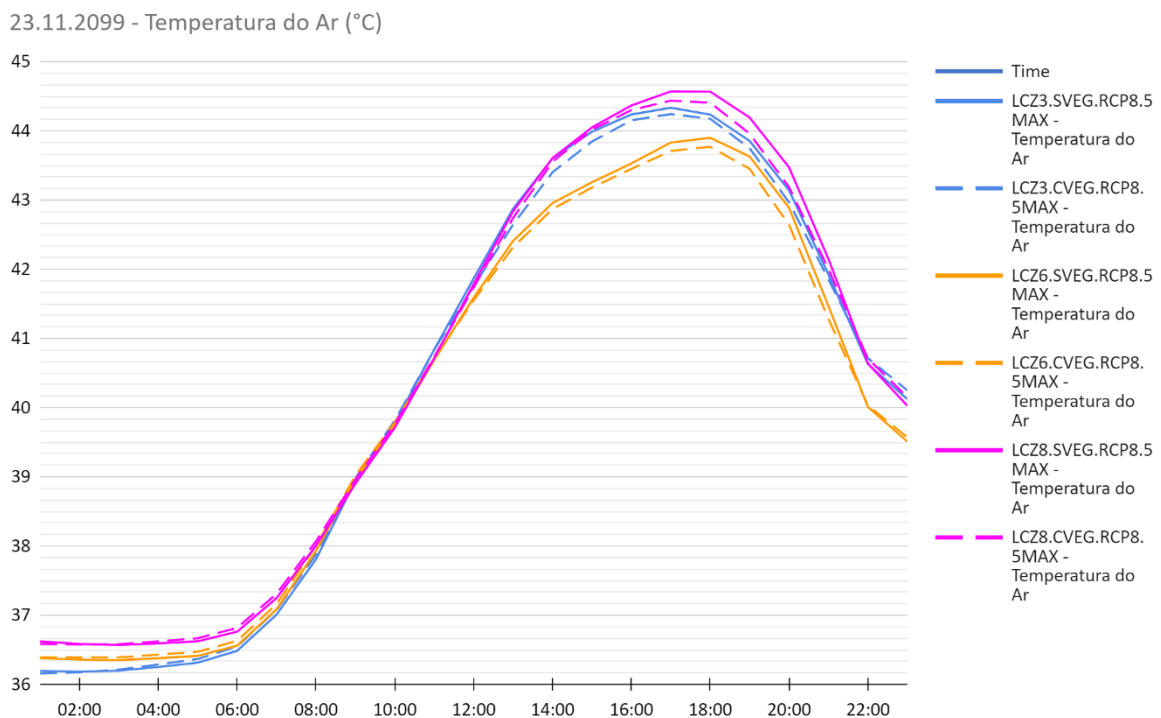


Figura 124: Temperatura do ar para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

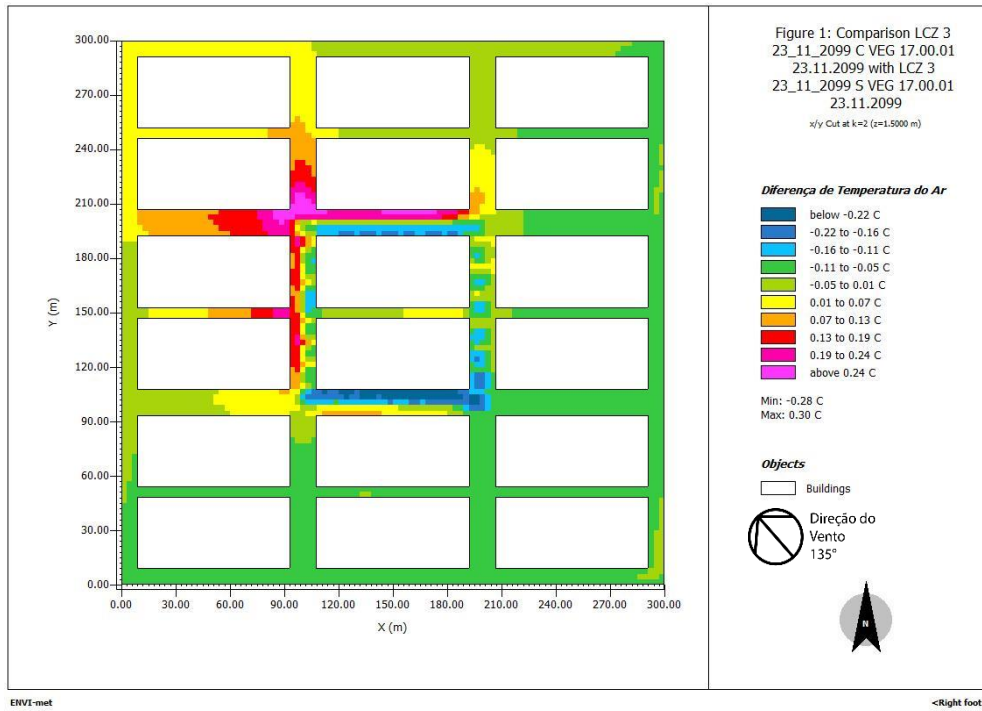


Figura 125: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.



Figura 126: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

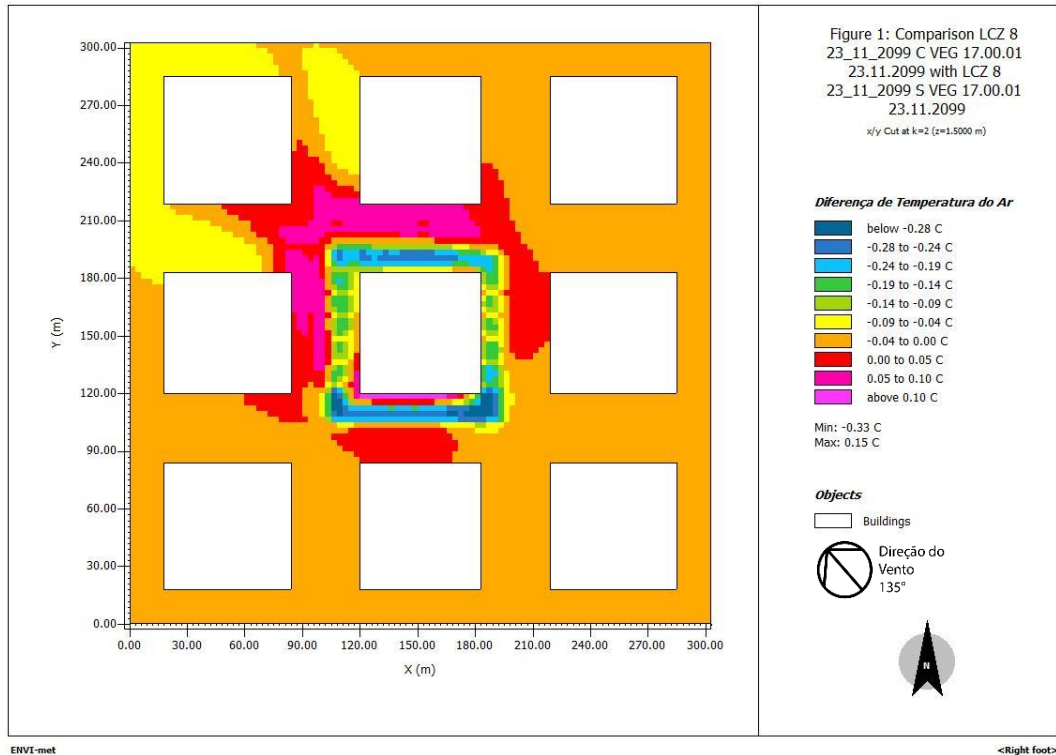


Figura 127: Diferença de temperatura média do ar entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

6.4.2 Temperatura Radiante Média

Apesar da redução nas temperaturas do ar praticamente não existir nesse cenário climático, a vegetação ainda é capaz de reduzir os valores de TRM, conforme apontam os resultados de TRM das LCZs simuladas (Figura 128). A presença da arborização reduz os valores de temperatura radiante média durante o período diurno. Isso ocorre devido à interceptação da radiação solar pela copa das árvores que reduz a radiação direta e difusa absorvida pelas superfícies abaixo do dossel.

Durante a noite, os cenários com vegetação apresentam temperatura radiante média maior do que os cenários sem vegetação. Esse fenômeno ocorre porque, abaixo do dossel, com menor fator de visão de céu, a copa das árvores dificulta a perda de radiação de onda longa, no período noturno.

A vegetação arbórea intercepta parte da radiação solar através da copa, reduz a quantidade total de radiação que chega às superfícies abaixo do dossel. Durante a noite, percebe-se que as simulações com vegetação apresentam valores de TRM ligeiramente superiores às simulações sem vegetação.

Observa-se que na LCZ 6 (Figura 128), as diferenças dos valores de TRM entre o cenário com vegetação e sem vegetação são menores do que nas outras LCZs. Isso ocorre porque o interior das quadras na LCZ 6 não foi arborizado. Com vegetação apenas nas vias, observa-se uma diferença significativa de valores de TRM, até 1,5 °C, entre as LCZ 6 simuladas.

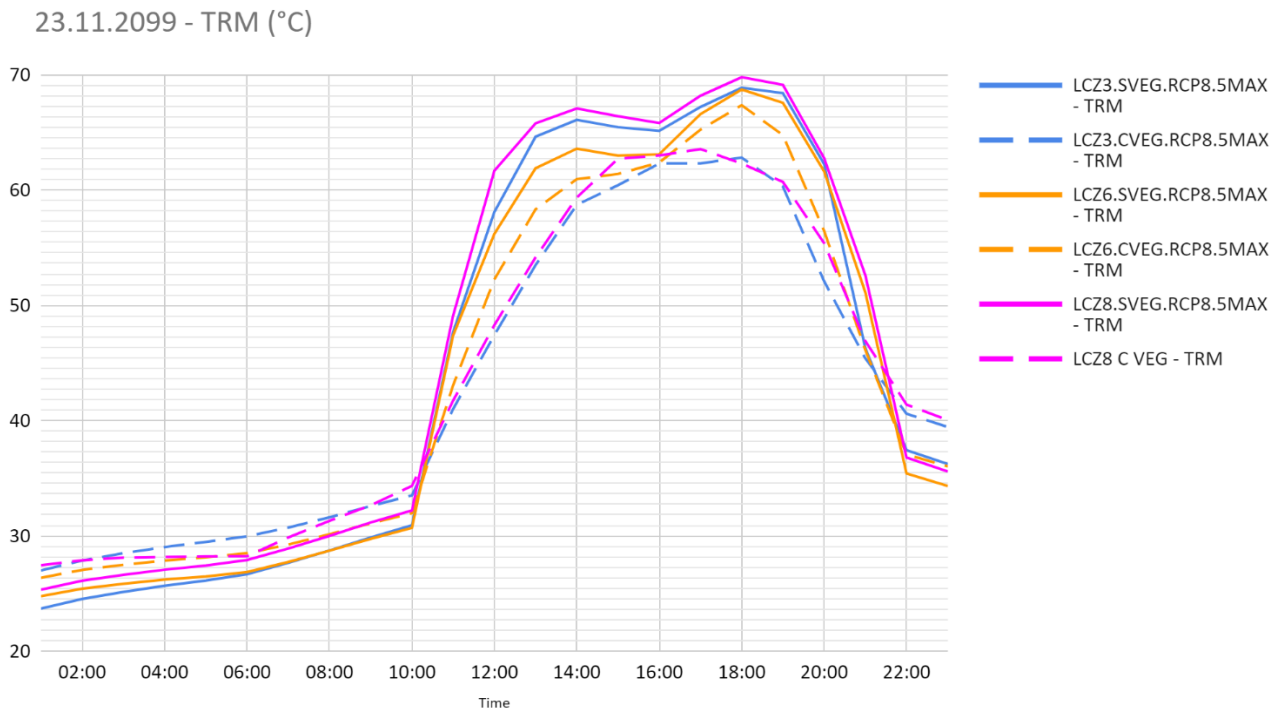


Figura 128: TRM para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

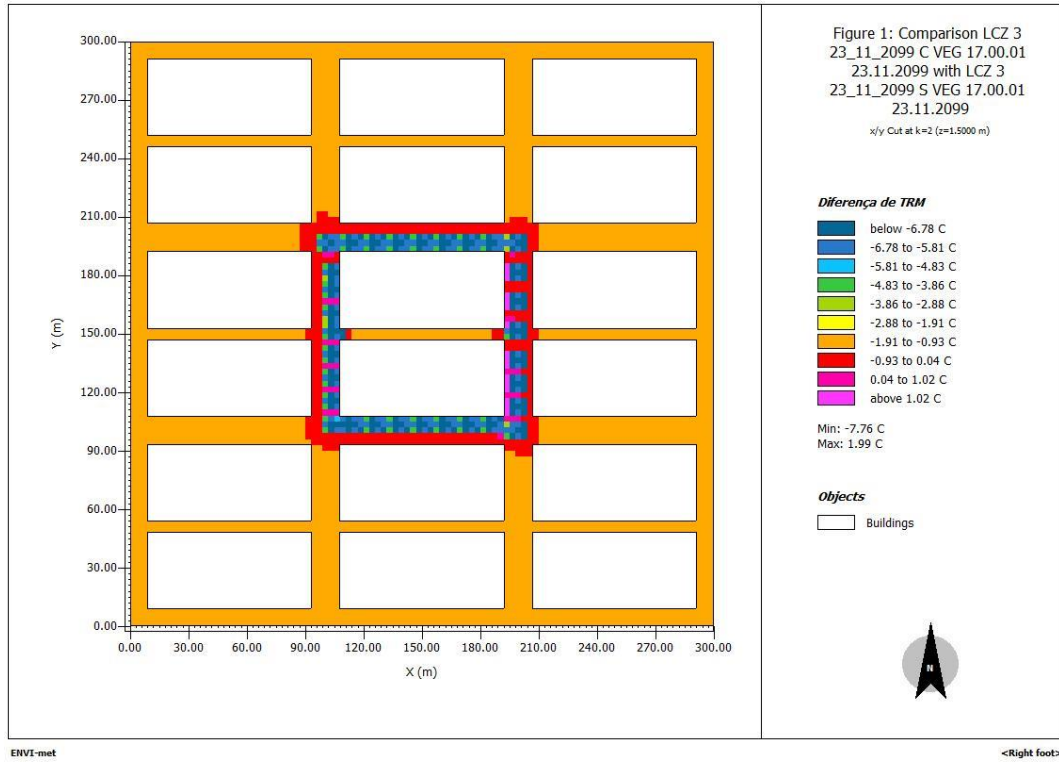


Figura 129: Diferença de TRM entre LCZ 3 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

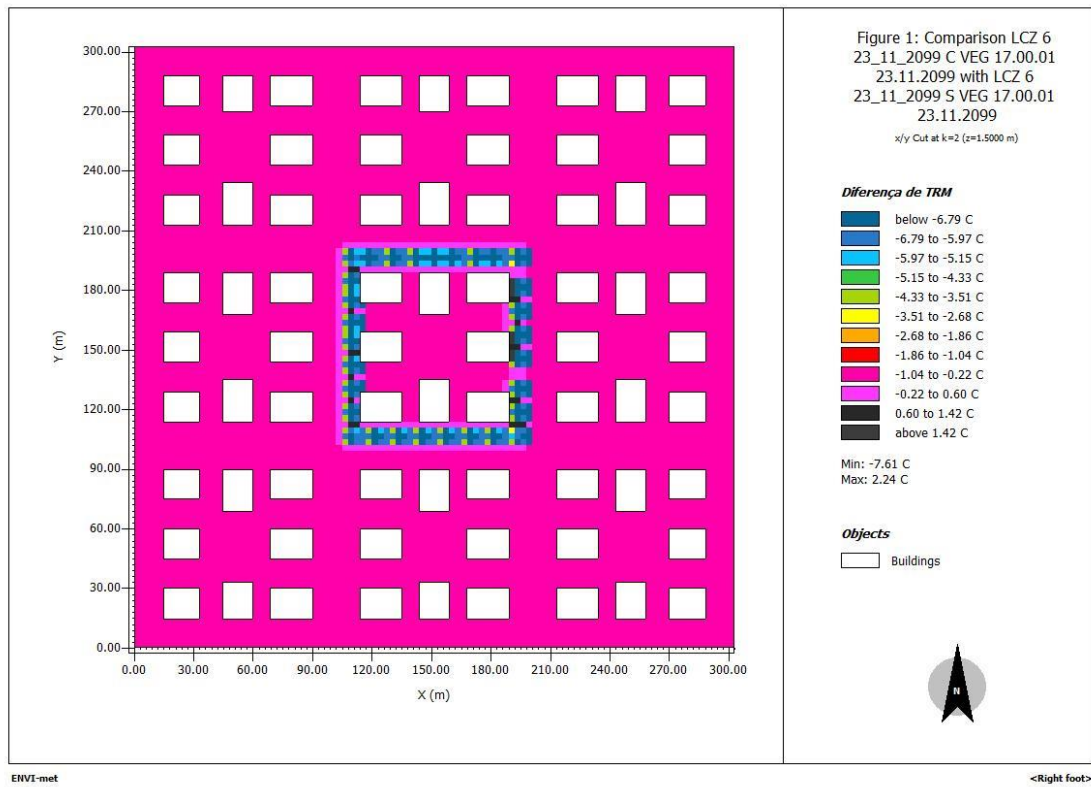


Figura 130: Diferença de TRM entre LCZ 6 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

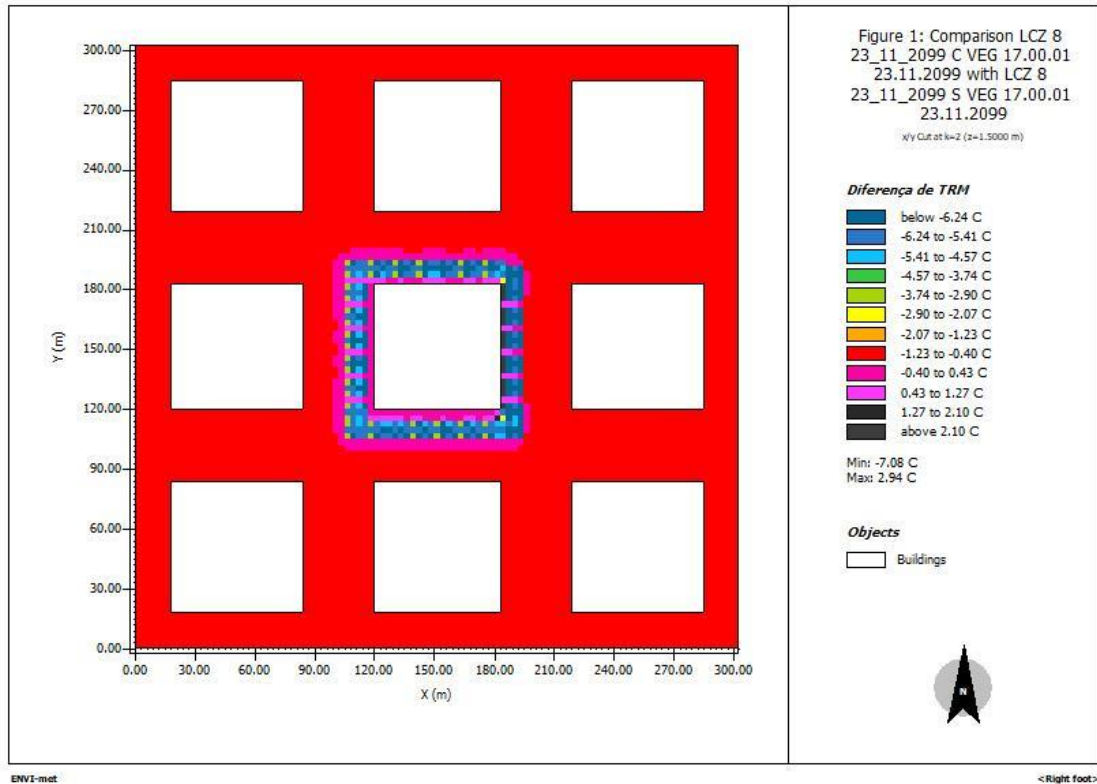


Figura 131: Diferença de TRM entre LCZ 8 com vegetação e sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

6.4.3 Temperatura de Superfície

Na Figura 132, é possível observar que a vegetação reduz de forma significativa a temperatura média de superfície das simulações, em até 14 °C como no caso da LCZ 3. Isso ocorre porque a copa das árvores intercepta parte de radiação solar que atinge a superfície abaixo do dossel.

Observa-se que o cenário LCZ 6 com vegetação possui valores de temperatura de superfície maiores do que as LCZ 3 e LCZ 8 com vegetação. Isso acontece porque a LCZ 6 tem espaços livres no interior da quadra e, neste estudo, não há vegetação nesse caso. Já nas LCZ 3 e LCZ 8 praticamente não há espaços livres no interior as quadras

23.11.2099 - Temperatura de Superfície (°C)

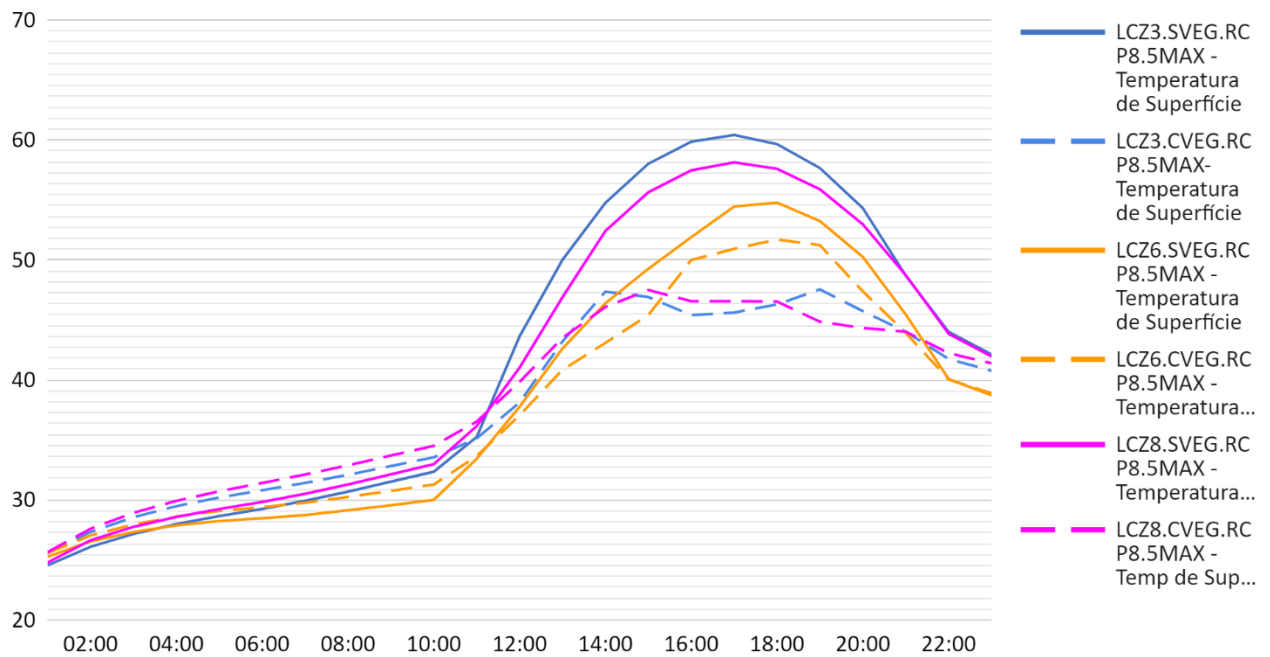


Figura 132: Temperatura de superfície para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

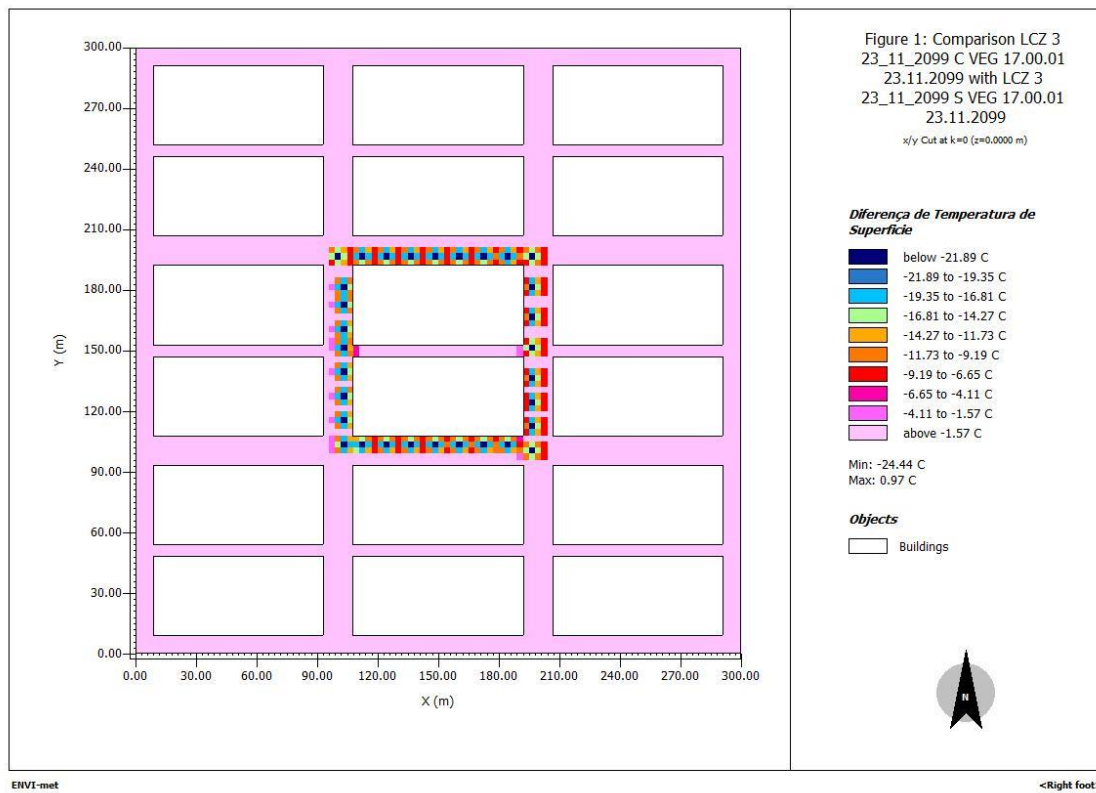


Figura 133: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 3 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

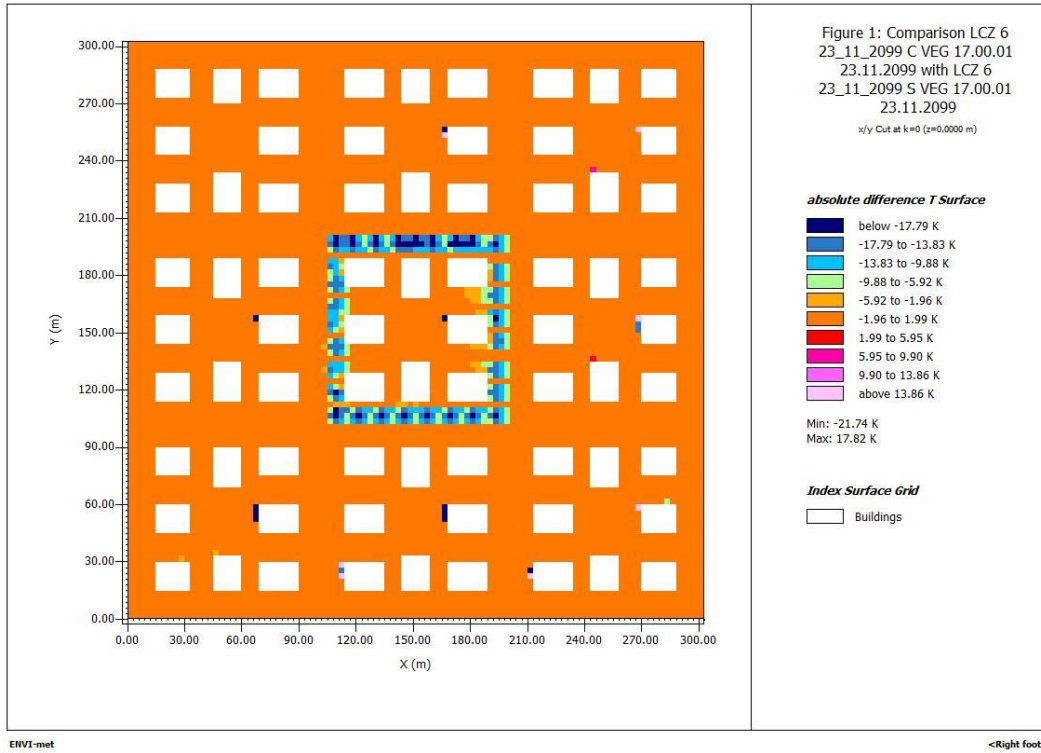


Figura 134: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 6 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

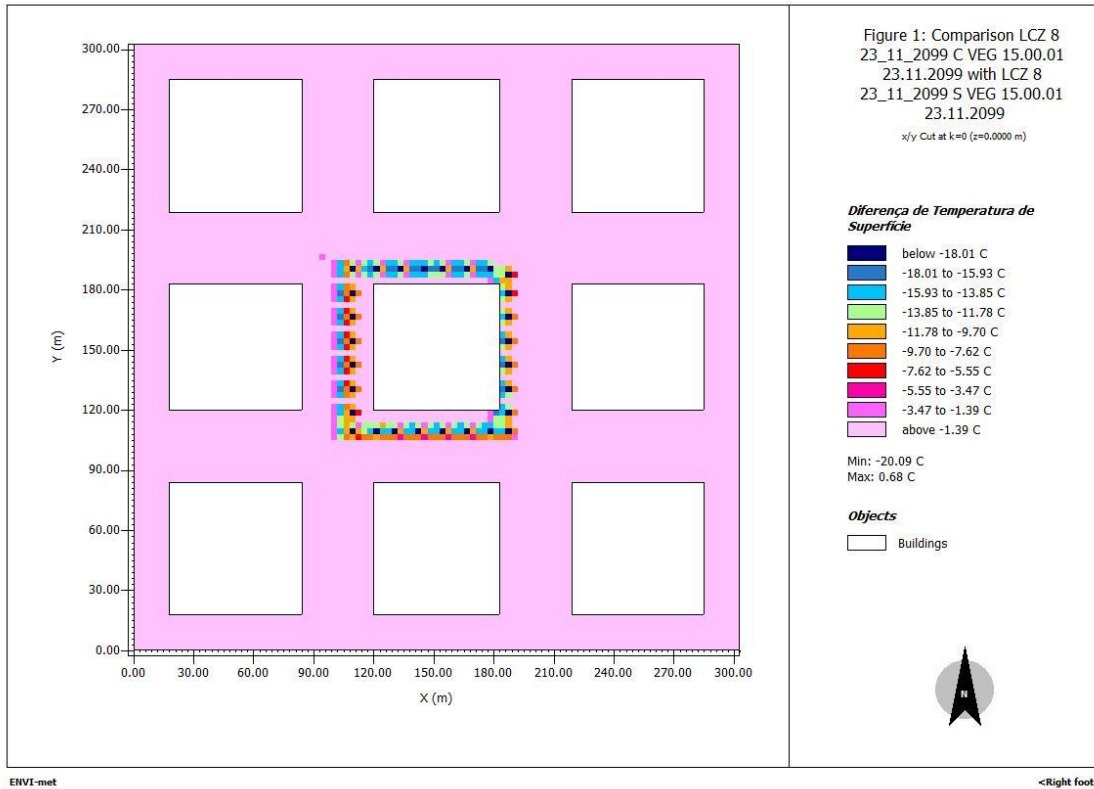


Figura 135: Diferença de Temperatura de Superfície entre LCZ 8 com vegetação sem vegetação na projeção climática 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

6.4.4 PET e TEP

Ao se observar os resultados (Figura 136 e Figura 137) verifica-se que todas as simulações para o dia mais quente no RCP 8.5 atingem valores de PET e TEP muito altos, indicando sensação de extremo calor, especialmente durante o período da tarde. Ainda que os cenários com vegetação apresentem alguma redução nos valores de PET e TEP, observa-se que, em todos os cenários, os valores superam os 60 °C dentro do PET e muito próximo disso na LCZ 8 sem vegetação. Esse cenário climático de extremo calor indica que a vegetação, apesar de reduzir os valores PET, não é capaz de garantir valores abaixo da faixa de “extremo calor”.

A redução nos valores de PET e TEP nos cenários com vegetação se dá, principalmente, pelo efeito de sombreamento gerado pela copa das árvores e praticamente não há evapotranspiração, principalmente durante as horas mais quentes do dia.

É interessante observar as diferenças de valores de PET entre as tipologias LCZs, indicando como a morfologia urbana é capaz de resultar em diferentes valores de PET. Ainda que todas as tipologias LCZ apresentadas nessa pesquisa sejam de edificações baixas, a diferença de superfícies, como é o caso da LCZ 6, com predominância de solo exposto em relação às LCZ 3 e LCZ 8, onde predominam o concreto, as diferenças de volume construído e proporção de espaços livres são fatores que trazem mudanças nos valores PET.

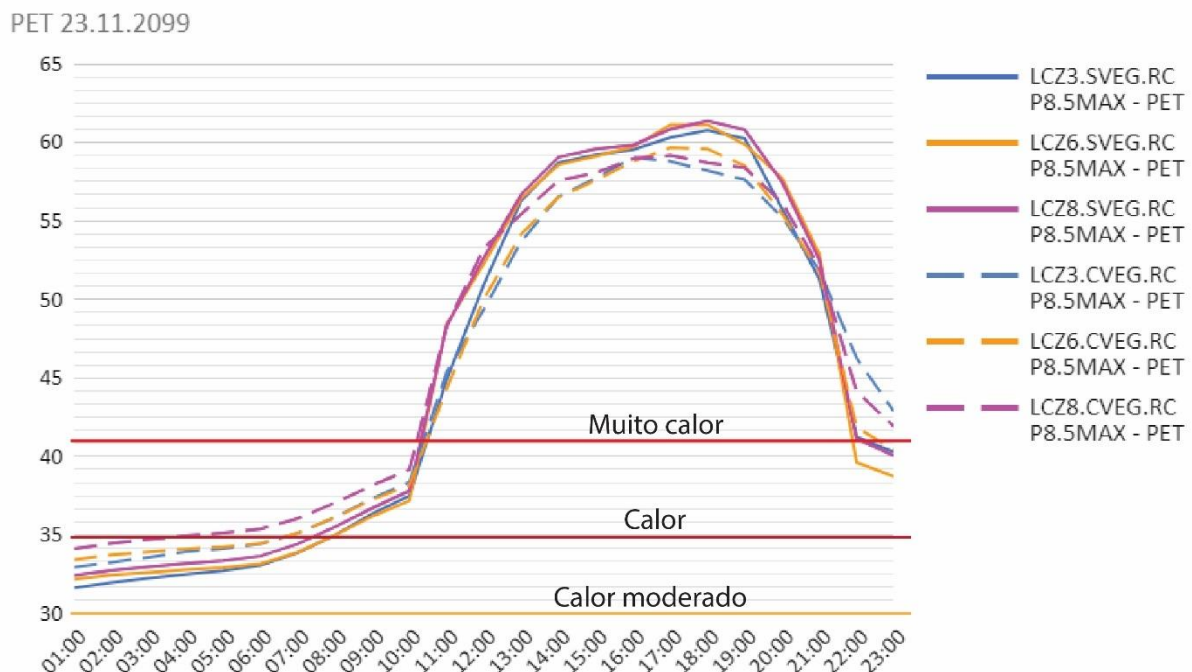


Figura 136: PET para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor

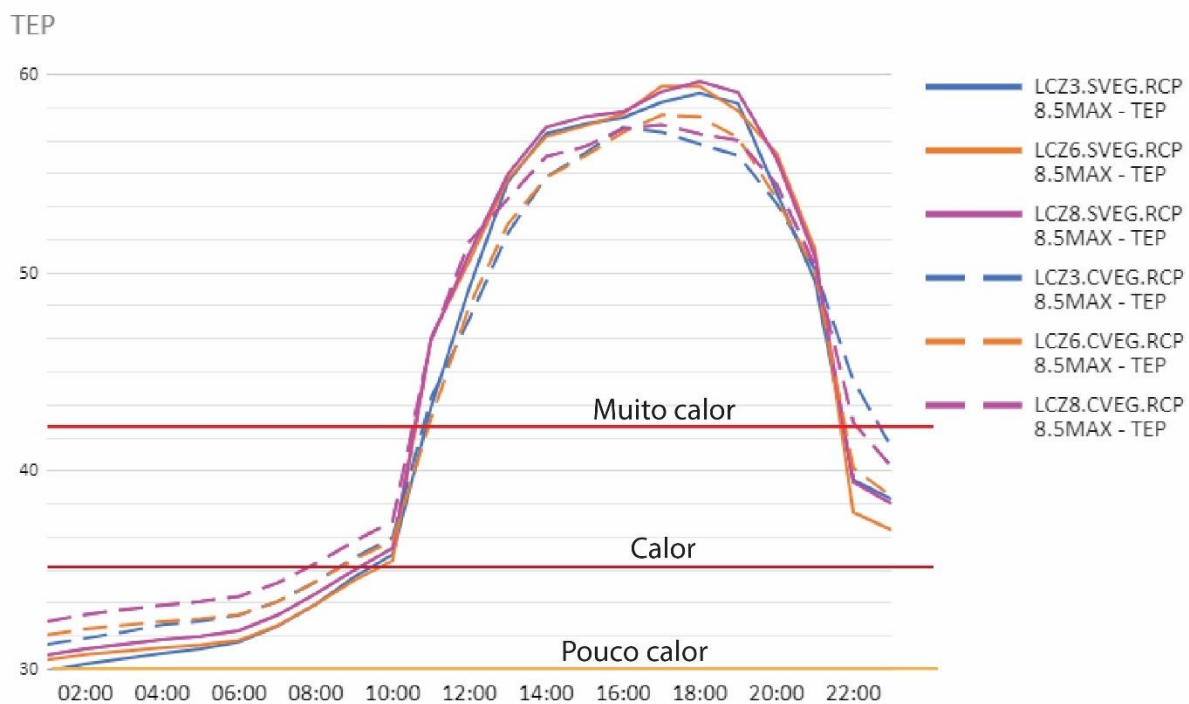


Figura 137: TEP para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

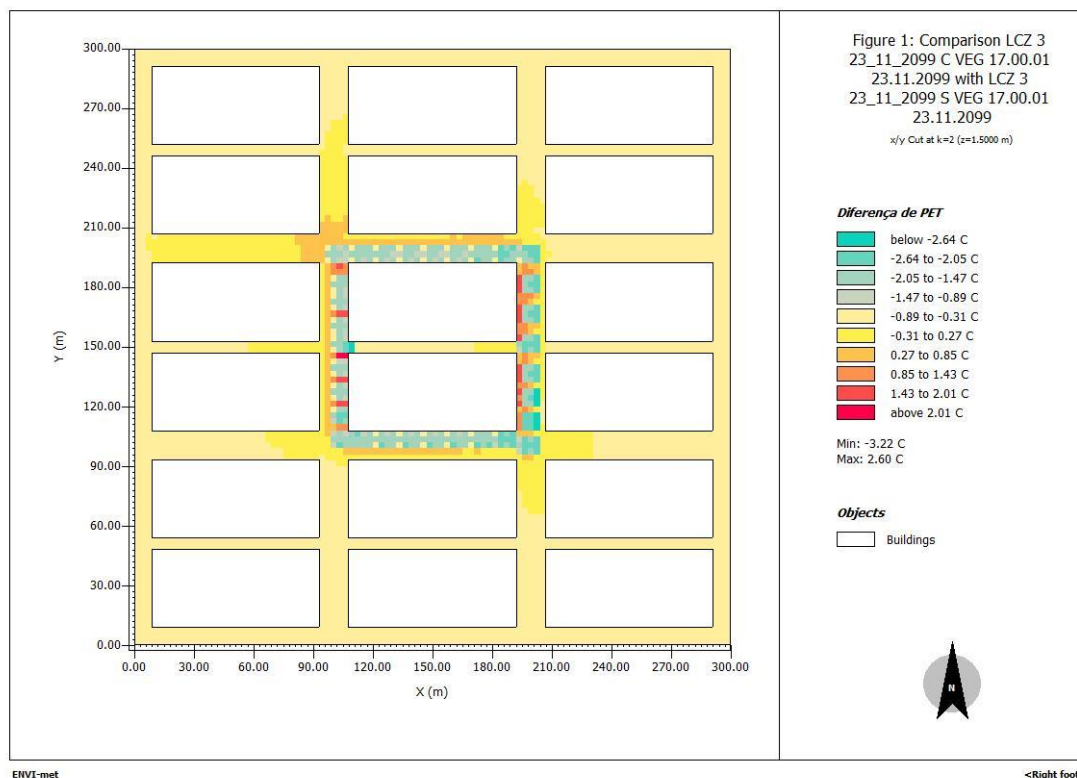


Figura 138: Diferença de PET entre LCZ 3 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

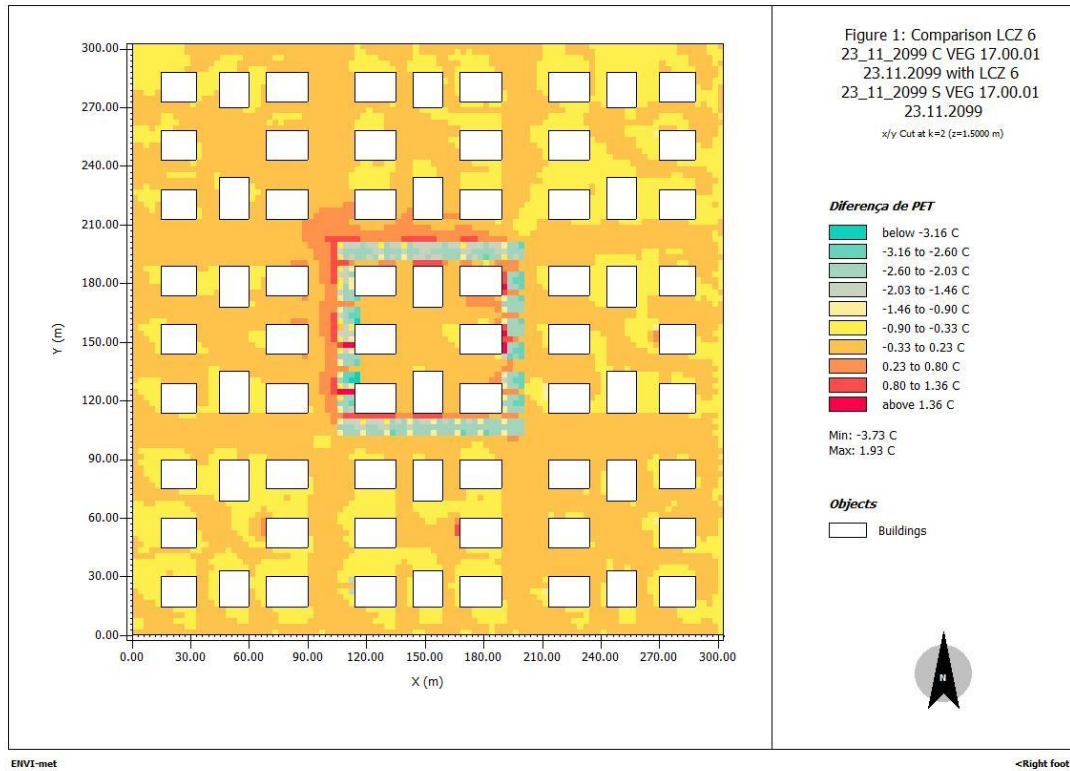


Figura 139: Diferença de PET entre LCZ 6 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

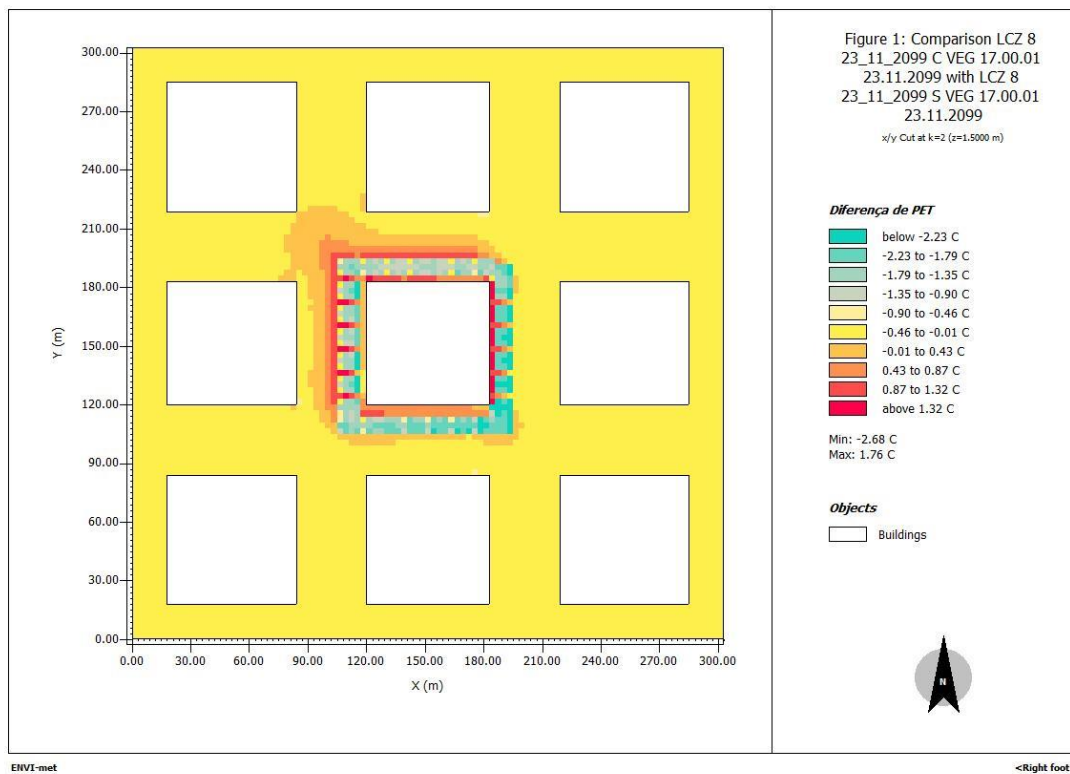


Figura 140: Diferença de PET entre LCZ 8 com vegetação sem vegetação na projeção climática para 23.11.2099 RCP 8.5 - 17 horas. Fonte: Autor.

6.4.5 Saúde das Plantas: Temperatura da Folha

Os valores de temperatura de folha, resistência estomática e fluxo de vapor na folha apresentados nos gráficos a seguir correspondem a resultados das simulações dentro da altura de 10 metros, correspondendo aproximadamente a metade da altura da copa das árvores utilizadas nas simulações. Para dia mais quente do cenário climático futuro RCP 8.5, com temperaturas do ar elevadas, observa-se que os valores médios de temperatura da folha nos cenários com vegetação se encontram mais altos do que a temperatura do ar, indicando que a vegetação não está sendo capaz de realizar a termorregulação por meio da evapotranspiração (Figura 136).

Nesse cenário, observa-se que os valores médios durante o período mais quente do dia atingem valores superiores a 45 °C em todos os casos LCZ, se aproximando dos 50 °C, no caso da LCZ 8.

Tendo como base estudos de Slot e al (2018), que analisou a temperatura das folhas de espécies tropicais, nota-se que as temperaturas das simulações LCZ 8 e LCZ 3, ultrapassam a temperatura crítica (T_{crit}) das plantas de 46.7°C, alcançando valores de 48°C (LCZ 8) e 47°C (LCZ 3). Esses valores indicam que parte da clorofila das folhas pode já estar sofrendo com danos iniciais. A LCZ 6 alcança um valor de 46°C, muito próximo a T_{crit} de Slot et al (2018). Sabendo o valor de temperatura de tolerância (T_{50}) da folha dada por Slot et al (2018), de 49.9°C. Nota-se que a vegetação das estão muito próximas de encontrar em situação de estresse térmico e perigo a saúde com danos que podem ser irreversíveis.

A Figura 142 de resistência estomática demonstra altos valores (baixa condutividade), especialmente para a LCZ 6 e LCZ 8, indicando o fechamento dos estômatos no período da tarde, ao contrário do que ocorreu nos outros cenários climáticos. Ao se observar a Figura 138, nota-se que o fluxo de vapor na folha possui uma queda de valor logo após as 13 horas, situação bastante diferente do que ocorreu dentro dos outros cenários climáticos simulados onde há um aumento nos valores de fluxo de vapor que vão se reduzindo durante o final da tarde.

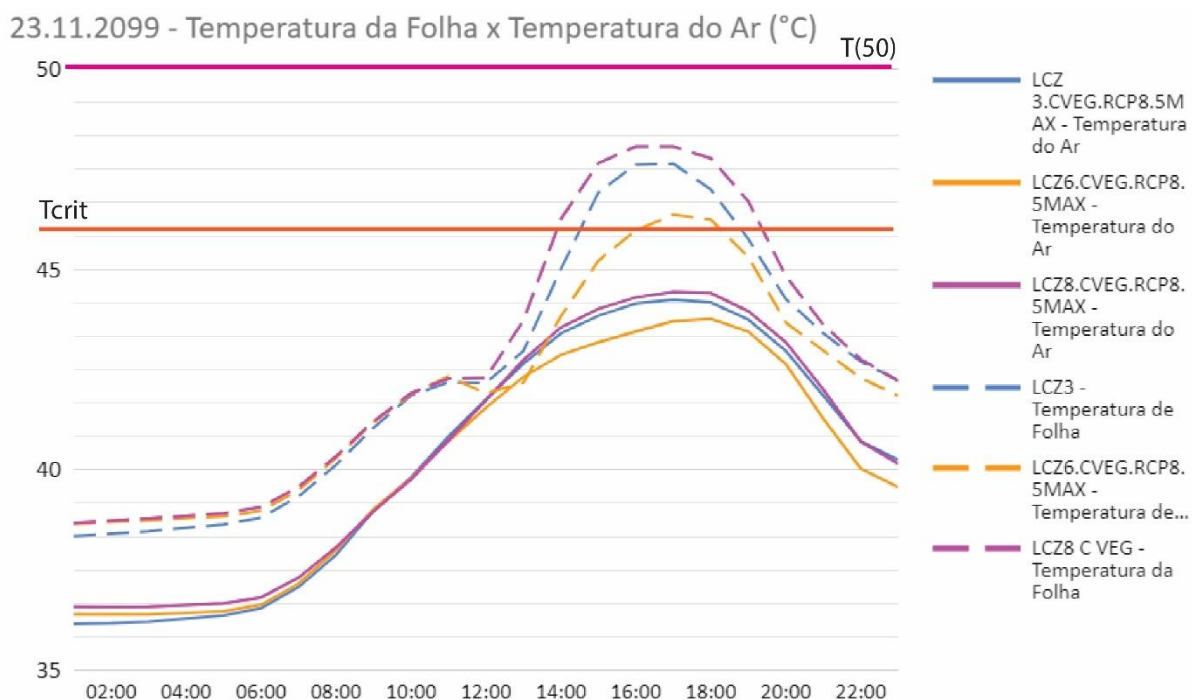


Figura 141: Temperatura do ar e temperatura de folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

É interessante observar as diferenças de temperatura foliar para cada tipologia LCZ, onde os valores mais altos se encontram na LCZ 8, seguida pela LCZ 3 e LCZ 6. Isso demonstra que a morfologia urbana é capaz de impactar também na temperatura das folhas e, portanto, na saúde vegetal. A diferença de valores se deve aos valores mais baixos de TRM e temperatura do ar nas simulações da tipologia LCZ 6.

Observa-se na Figura 144 que ocorre variações de temperatura da folha dependendo da altura da copa e da localização da árvore nas simulações. As regiões mais próximas ao solo, possuem valores de temperatura mais altas do que as folhas em regiões mais altas. Isso se deve a maior exposição da radiação longa emitida pelas superfícies abaixo do dossel. A variação de temperatura pode chegar próximo aos 2 °C.

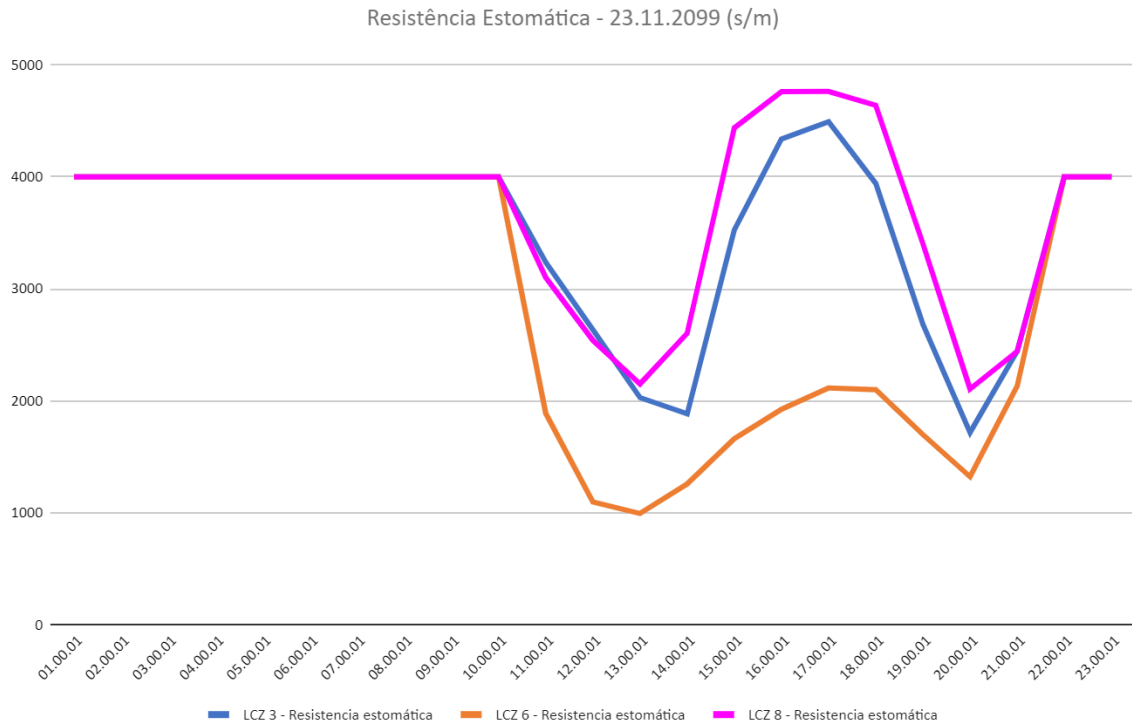


Figura 142: Resistência estomática horária para cada simulação LCZ com vegetação. Fonte Autor.

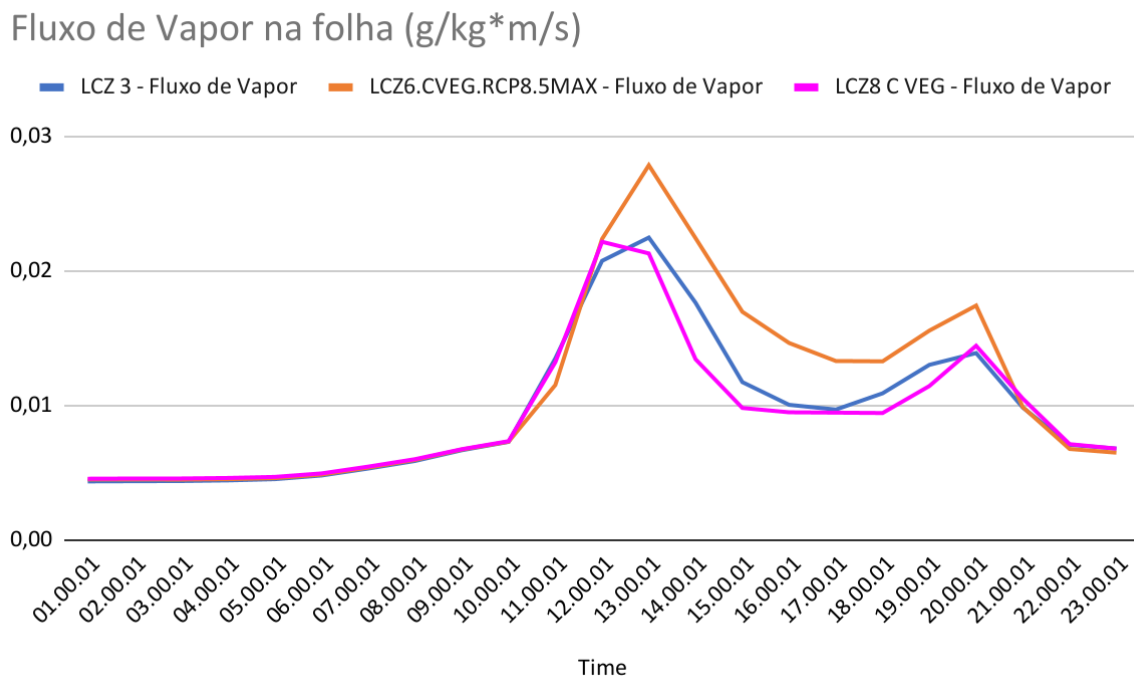


Figura 143: Fluxo de vapor na folha para cada tipo de LCZ com e sem vegetação dentro de condições climáticas do dia 23.11.2099 (RCP 8.5). Fonte: Autor.

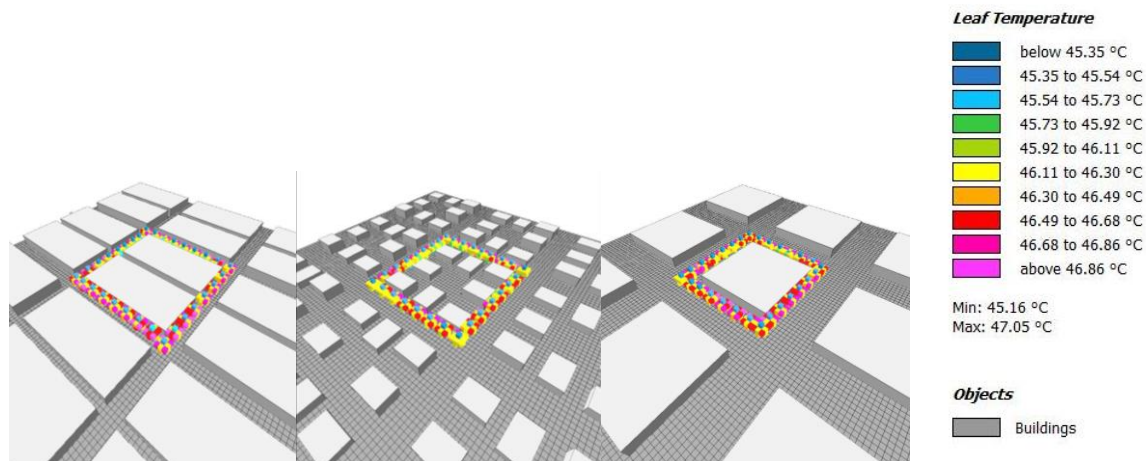


Figura 144: Temperatura da folha dentro das tipologias LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8 dentro do período das 17 horas dentro do cenário climático de 23.11.2099.

6.5 Comparações entre simulações com diferentes valores de LAD

Duas situações de copa foram modeladas e simuladas dentro de condições climáticas atuais (Figura 145). A primeira copa modelada possui um valor médio de $LAD=0,67m^3/m^3$ (células com folhas com $LAD=1m^3/m^3$)³¹, a segunda copa se refere aos valor LAD medido e calculado em campo ($LAD=0,3m^2/m^3$)³², onde a célula de folhas da copa é igual a $LAD=0,44m^2/m^3$ Para esse estudo, foi escolhido a LCZ 6 e condições climáticas de clima atual. Foi escolhido a LCZ 6 (segundo cenário) por se tratar de uma tipologia onde há maior presença da vegetação em relação as demais LCZs estudas nessa pesquisa. Foi escolhido o cenário de condições climáticas atuais pois trata-se do cenário climático que utiliza o *full forcing* no ENVI-met, pelo fato de usar dados coletados em campo com maiores detalhes.

³¹ Valor sugerido pela pesquisadora Dra. Paula Shinzato.

³² Valor medido em campo baseado no valor LAI medido através do Can-eye e calculado segundo estudos de Zucchi (2018).

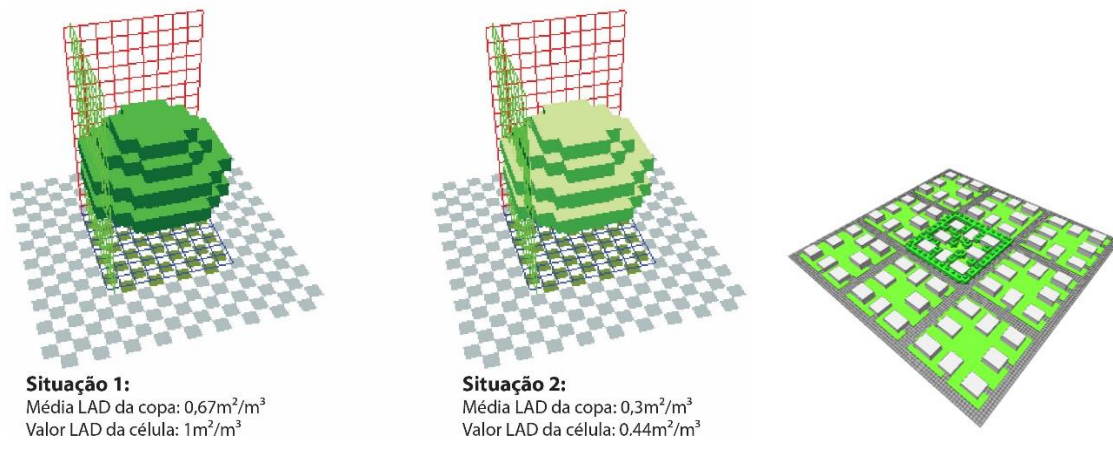


Figura 145: Situações de copa e isométrica das quadras 3x3 LCZ 6 (segundo cenário). Fonte: Autor.

6.5.1 Temperatura do Ar

Observa-se que praticamente não há alteração na temperatura do ar durante o período mais quente do dia, face à variação do LAD. Durante a noite, o cenário com maior LAD apresenta uma temperatura do ar ligeiramente mais alta, pela maior dificuldade de perda de radiação de onda longa, abaixo do dossel.

Durante a noite, os cenários com maior LAD apresenta temperatura radiante média maior do que o cenário com LAD menor. Esse fenômeno ocorre porque, abaixo do dossel, com menor fator de visão de céu, a copa das árvores dificulta a perda de radiação de onda longa, no período noturno.

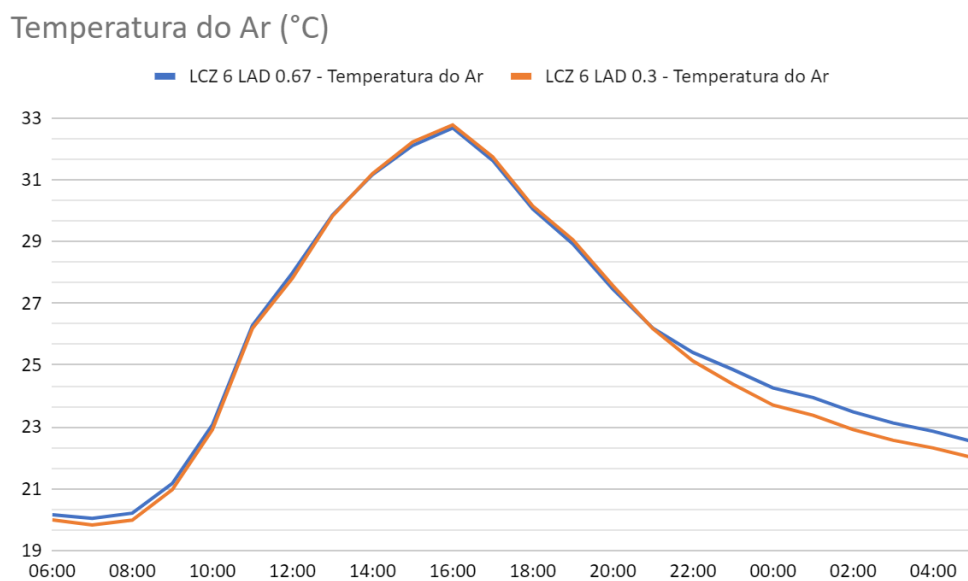


Figura 146: Temperatura do ar para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

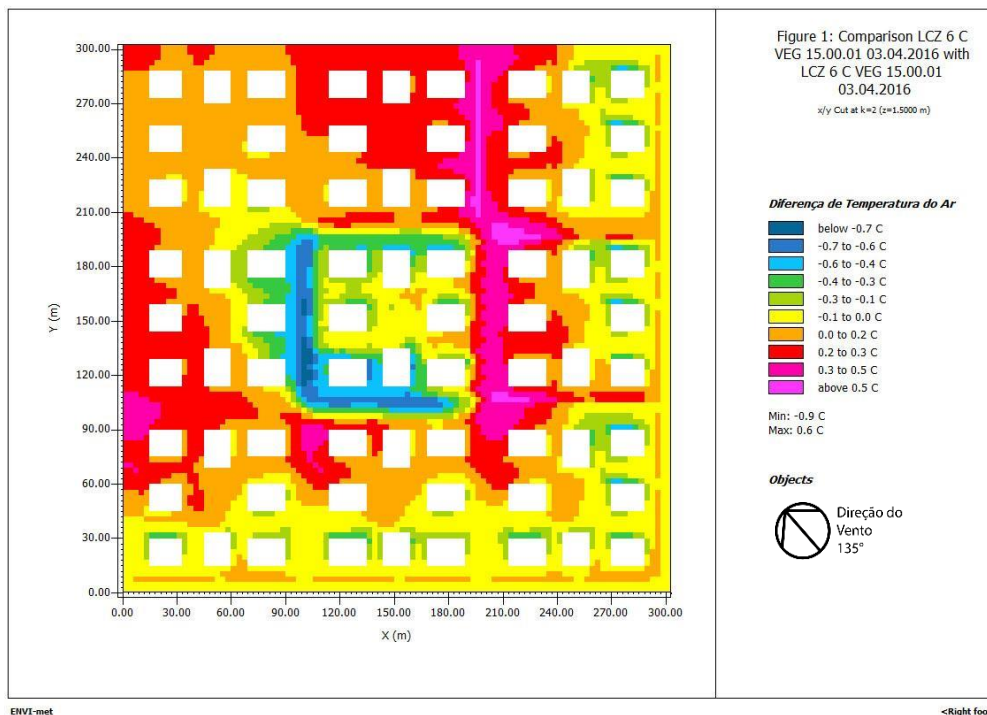


Figura 147: Diferença de temperatura do ar para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

6.5.2 Temperatura Radiante Média

Observa-se que no cenário no qual a vegetação possui maior LAD, os valores de TRM são menores. Isso ocorre, pois, a vegetação com menor LAD permite maior passagem de radiação pela copa do que a vegetação com maior LAD. Dentro do cenário com menor LAD a diferença de TRM em relação ao cenário com maior LAD é de 6°C.

Durante a noite, os cenários com maior LAD apresenta temperatura radiante média maior do que o cenários com menor LAD. Esse fenômeno ocorre porque, abaixo do dossel, com menor fator de visão de céu, a copa das árvores dificulta a perda de radiação de onda longa, no período noturno.

A vegetação arbórea intercepta parte da radiação solar através da copa, reduz a quantidade total de radiação que chega às superfícies abaixo do dossel. Durante a noite, percebe-se que as simulações com vegetação apresentam valores de TRM ligeiramente superiores às simulações sem vegetação.

Temperatura Radiante Média (°C)

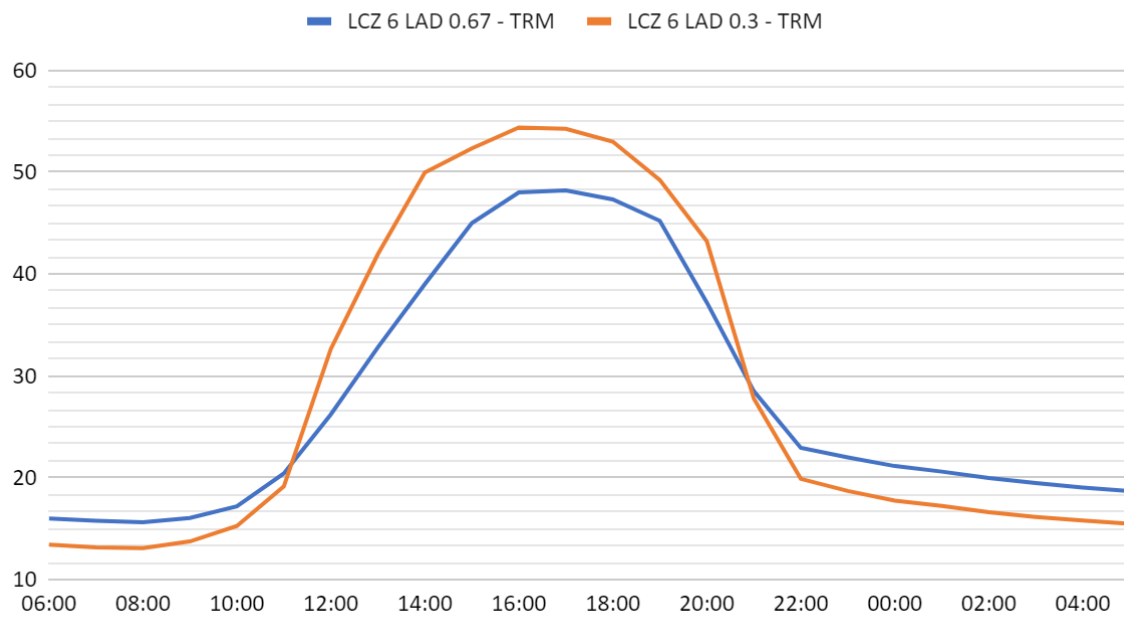


Figura 148: Diferença de TRM para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

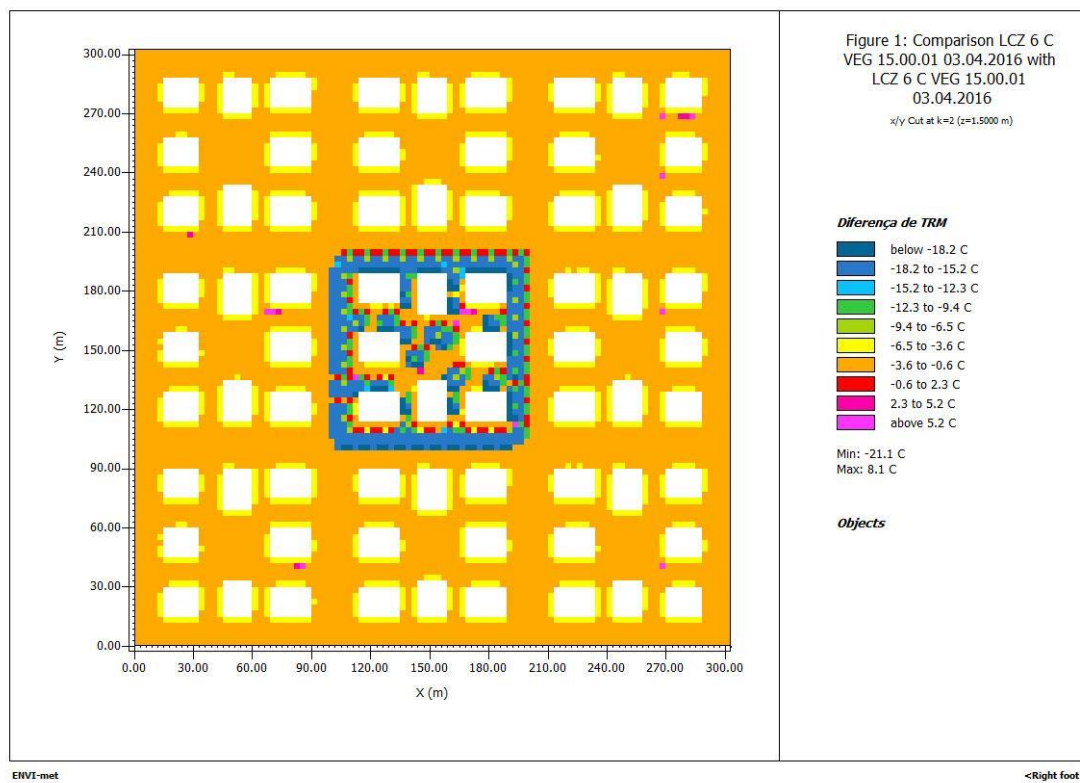


Figura 149: Diferença de TRM para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

6.5.3 Temperatura de Superfície

A diferença de LAD altera os valores de temperatura de superfície de maneira expressiva, com diferenças de até 2,5°C. Uma menor densidade de área foliar permite maior passagem de radiação solar através da copa, aumentando a temperatura de superfície em relação ao cenário com maior densidade foliar.

Temperatura de Superfície

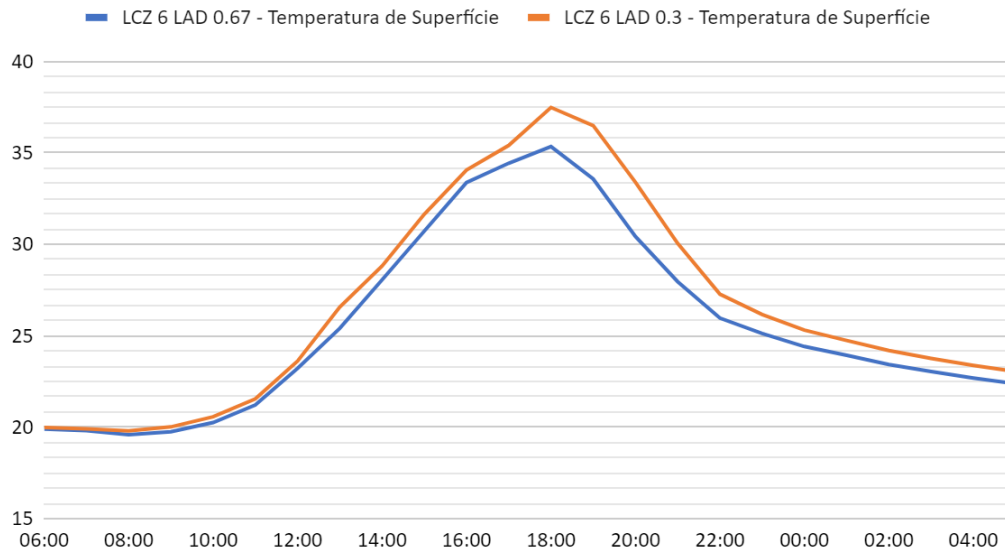


Figura 150: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

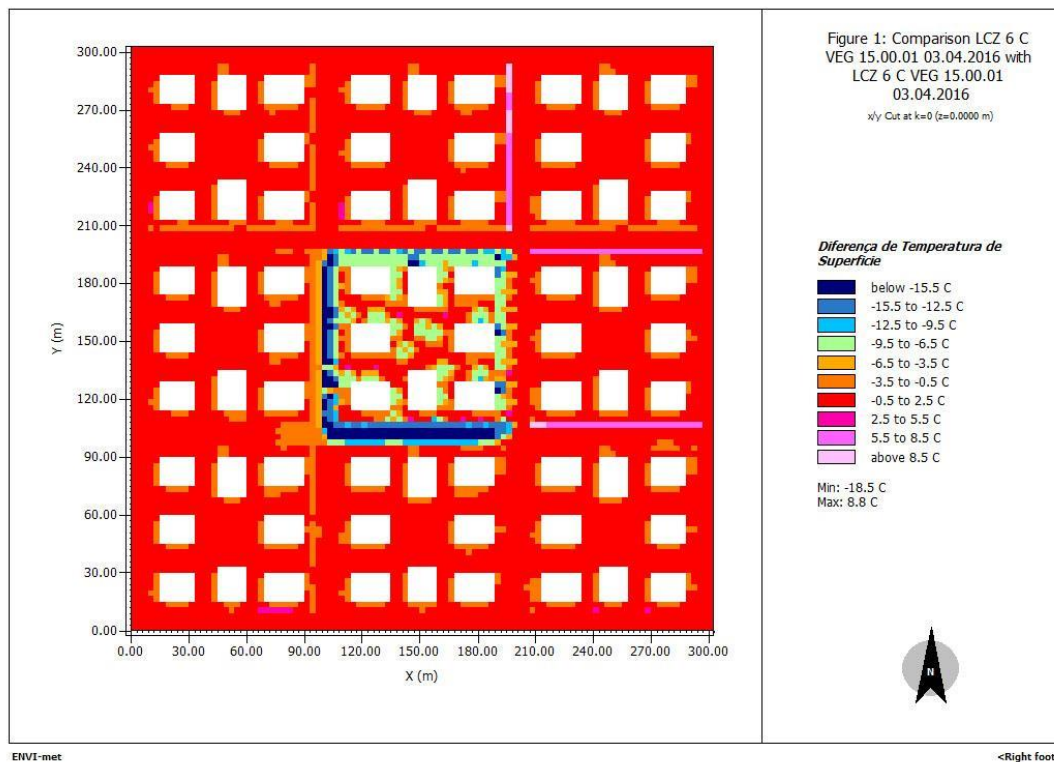


Figura 151: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

6.5.4 PET e TEP

No cenário com menor LAD apresenta valores médios de PET e TEP mais elevados em relação ao cenário com maior LAD, com diferenças de até 5°C. Isso ocorre principalmente devido à maior quantidade de radiação solar que atravessa a copa das árvores. Com o aumento da TRM, variável importante para o PET, maiores serão seus valores.

PET (°C)

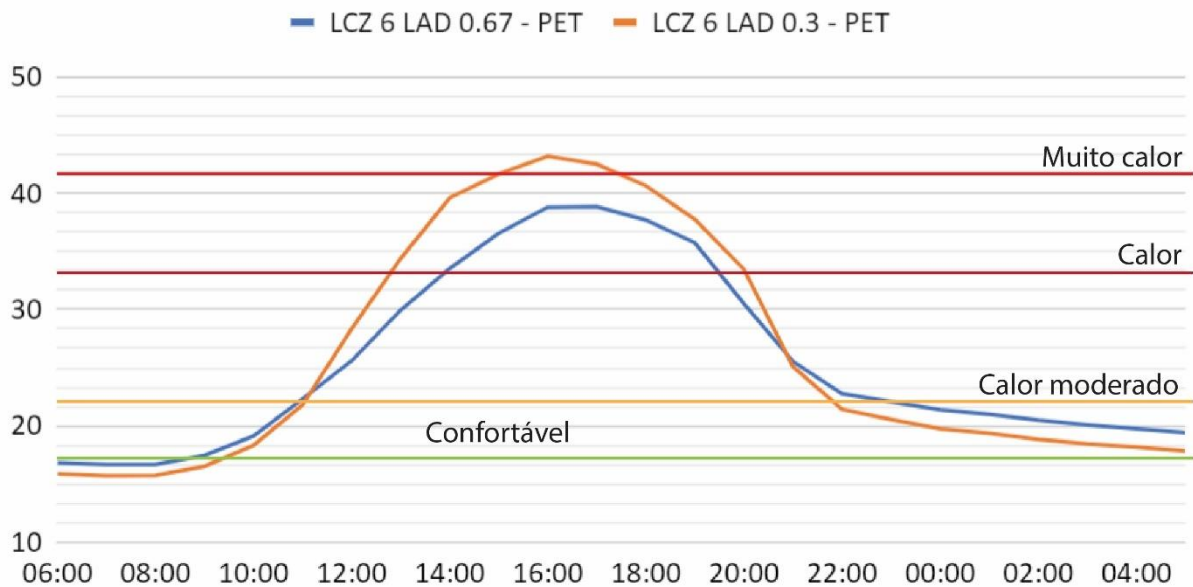


Figura 152: PET para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

TEP

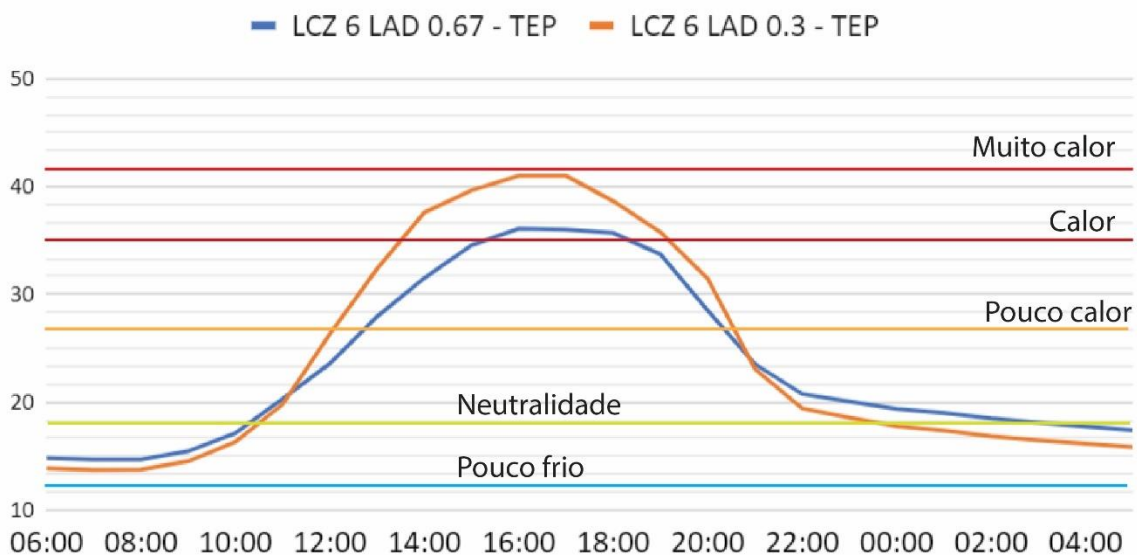


Figura 153: TEP para LCZ 6 com LAD 1 e LAD 0,3

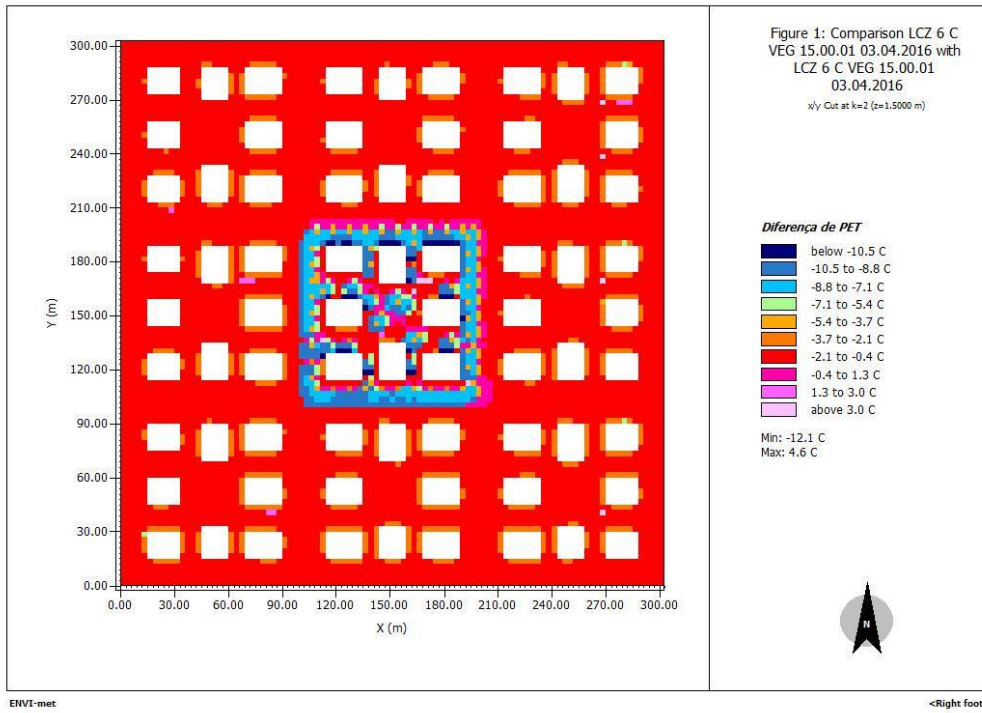


Figura 154: Diferença de temperatura de superfície para LCZ6 com LAD 1 e LAD 0.3. Fonte: Autor.

7. Considerações finais e conclusões

Este trabalho retrata o efeito microclimático da vegetação, na cidade de São Paulo, sob diferentes cenários climáticos, atuais e futuros, e diferentes morfologias urbanas mais comumente encontradas na cidade, sendo estas as LCZ 3, 6 e 8. Além disso, investiga também alguns parâmetros relacionados à saúde das plantas, frente ao aquecimento urbano.

Assim, observa-se nos resultados das simulações no ENVI-met V5 que a vegetação se mostra uma estratégia importante para a redução dos efeitos do aquecimento urbano, e, dentro de certas condições, capaz de reduzir não apenas a temperatura do ar mas, de forma mais expressiva, outras variáveis relevantes para o conforto térmico em espaços abertos. Além da temperatura do ar, a temperatura de superfície e a temperatura radiante média afetam sobremaneira os índices de conforto térmico adotados nesta pesquisa, PET e TEP, o que fica evidente em todos os cenários comparativos simulados, com e sem vegetação.

Resumidamente, para as LCZ 3, 6 e 8, nos horários mais quentes do dia, a vegetação reduziu a temperatura do ar, em média, até 0,72°C nas condições climáticas atuais, em 0,5°C para o clima futuro de dezembro 2079-2099, e praticamente não ocorreu nenhuma redução de temperatura do ar no dia de calor mais extremo, em novembro de 2099. Ao mesmo tempo, a vegetação reduziu a temperatura radiante média em até 14°C no clima atual e até 8°C nas projeções climáticas futuras; a temperatura de superfície também foi reduzida em até 14°C no clima atual e até 13°C nas projeções climáticas futuras. Em todas as simulações os índices de conforto PET e TEP alcançam níveis de sensação térmica de muito calor e extremo calor. No entanto a presença da vegetação foi capaz de reduzir, em média, em 5 °C no clima atual, em 4,5°C no clima futuro 2079-2099 e em 2,5°C no dia de calor mais extremo, em novembro de 2099. Dentro do cenário climático atual, a vegetação foi capaz de reduzir o nível de sensação térmica de muito calor para calor em PET e TEP. Como um indicador da saúde das plantas frente ao aquecimento urbano, a temperatura da folha, em média, atingiu 28°C no clima atual, 31°C no clima futuro 2079-2099 e até 48°C no dia de calor mais extremo, sugerindo, neste último caso, a cessação da evapotranspiração e o risco de danos irreversíveis à vegetação.

Frente aos resultados, fica evidente que a vegetação reduz o aquecimento e melhora a sensação de conforto térmico urbano, principalmente diurno; no entanto, há limitações nos efeitos microclimáticos da vegetação, principalmente quando esta é submetida a altas temperaturas, como demonstrado nas simulações para o dia de calor mais extremo, em novembro de 2099.

As projeções climáticas futuras, no RCP 8.5, do IPCC AR5, retratam as condições médias de temperatura do ar para dezembro de 2079-2099. Mesmo com valores médios de temperatura do ar mais elevados do que no clima atual, os resultados indicam que, ainda assim, a vegetação reduz os valores médios de temperatura do ar em até 0,6°C na LCZ 3, durante as horas mais quentes do dia, a TRM em até 7,5°C e a temperatura de superfície em até 14°C, resultando em índices de conforto PET 50°C (muito calor) e TEP 48°C (muito calor).

Porém, o efeito microclimático da vegetação se altera de forma mais expressiva quando ela está submetida a temperaturas ainda mais elevadas, o que foi constatado na simulação para o dia de calor mais extremo nesse período. Os resultados para novembro de 2099 demonstram que o efeito microclimático da vegetação é bastante reduzido, com praticamente nenhuma redução na temperatura do ar. Sob altas temperaturas, o potencial da vegetação em reduzir a temperatura do ar é praticamente nulo, pois pode ocorrer o fechamento dos estômatos nas folhas, cessando, assim, o processo de evapotranspiração da planta, para evitar a perda excessiva de água. Observa-se nos resultados, pelos altos valores de resistência estomática, que os estômatos se encontram praticamente fechados (alta resistência estomática), reduzindo o efeito da evapotranspiração. Porém, ainda que com o potencial reduzido, as simulações apontam que a vegetação ainda é capaz de impactar positivamente outras variáveis importantes, tais como a temperatura de superfície e a temperatura radiante média que, por sua vez, afetam os índices de conforto térmico em espaços abertos.

Na projeção para o dia de calor mais extremo, em novembro de 2099, os resultados demonstram que a temperatura média das folhas das árvores pode atingir valores muito próximos aos 50°C, o que pode danificar a estrutura das folhas, considerando-se a temperatura crítica e a temperatura de tolerância da folha para muitas espécies de plantas tropicais. Isso mostra que a vegetação poderá sofrer danos, até mesmo irreversíveis, devido ao estresse térmico da planta. Dentro desse contexto, é importante lembrar que a temperatura da folha se altera dependendo da posição e altura das folhas nas simulações.

Normalmente, a temperatura da folha é menor do que a temperatura do ar em seu entorno imediato. Isso ocorre porque o resultado do balanço de energia da folha, face à evapotranspiração, faz com que a superfície da folha fique mais fria do que o ar. Porém, como os resultados apontam, temperaturas do ar muito elevadas, acima de 45°C, ainda que com disponibilidade de água no solo, fazem cessar o processo de evapotranspiração. Sem a evapotranspiração no balanço de energia, a temperatura da folha aumenta, podendo atingir valores consideravelmente mais altos, com danos, até mesmo, irreversíveis.

Observando-se os resultados das simulações e tendo em vista que o incremento da vegetação é uma estratégia relevante para reduzir os efeitos do aquecimento urbano e para adaptação às mudanças climáticas, esta pesquisa demonstra certa preocupação a respeito da saúde da vegetação urbana, nem sempre considerada nos planos de arborização e de adaptação à mudança do clima vigentes em muitas cidades, incluindo São Paulo. O estresse térmico vegetal é um fator preocupante e que pode ser acompanhado pelo estresse hídrico da planta. Diversos autores apontam que é necessária uma escolha cuidadosa de espécies vegetais adequadas ao ambiente urbano, resistentes ao calor e a uma possível falta de água prolongada.

Para além do foco desta pesquisa nos efeitos microclimáticos da vegetação, alguns resultados sugerem diferentes impactos da morfologia urbana no microclima, tendo em vista as diferenças nos resultados entre as LCZ simuladas, sugerindo caminhos para novos estudos. Ainda que as morfologias mais comumente encontradas na cidade de São Paulo, sendo estas as LCZ 3, LCZ 6 e LCZ 8, apresentem edificações baixas, uma diferença importante entre elas, para além na morfologia, está na cobertura do solo. Nas LCZ 3 e LCZ 8 predominam superfícies que armazenam muito calor, como asfalto e concreto. Já na LCZ 6, predomina o solo exposto, com e sem vegetação, que armazena menos calor. Esses resultados apontam que, além da vegetação para reduzir os efeitos do aquecimento urbano, a morfologia urbana e a cobertura do solo também influenciam os resultados e que os benefícios podem ser potencializados com a vegetação.

Com relação ao modelo, o ENVI-met V5 demonstra ser uma ferramenta de grande utilidade e com recursos potenciais de modelagem, parametrização de solo, superfície e atmosfera, para a quantificação dos efeitos microclimáticos da vegetação e da morfologia urbana, além de avaliar alguns parâmetros relacionados à saúde das plantas.

Como esperado, menores valores de LAD trazem menores efeitos da vegetação no seu entorno imediato. Ainda que praticamente não houve alterações no valor de temperatura do ar, no cenário com menor LAD possui, durante o dia, valores maiores de temperatura radiante média de até 6°C, de temperatura de superfície em até 2°C e de índices de conforto térmico PET e TEP em até 5°C. Por fim, as simulações que comparam diferentes cenários LAD demonstram o papel expressivo dessa variável no microclima, abaixo do dossel.

Por fim, deve-se levantar certas limitações das simulações nessa pesquisa onde as árvores inseridas no modelo representam indivíduos arbóreos que nem sempre representam a realidade das árvores urbanas, a copa cheia, bem desenvolvida e grande espaço para as raízes e acesso a água destas árvores.

Referências bibliográficas

1. AHMEDABAD MUNICIPAL CORPORATION. Ahmedabad Heat Action Plan 2016 - Guide to extreme heat planning in Ahmedabad, India. 2016.
2. AHERN [1] , J. Green infrastructure for cities: The spatial dimension J. Water Intelligence Online, v. 13, 2014.
3. AJUNTAMENT DE BARCELONA. Árboles Para Vivir. 2017. Disponível em: <<https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/sites/default/files/Pla-director-arbrat-barcelona-CAST.pdf>>.
4. AJUNTAMENT DE BARCELONA. ECOLOGIA URBANA. Plan Clima 2018-2030. 2018.
5. AKBARI, H.; POMERANTZ, M.; TAHA, H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Solar Energy, v. 70, n. 3, p. 295–310, 2001.
6. ARAM, F.; HIGUERAS GARCÍA, E.; SOLGI, E.; MANSOURNIA, S. Urban green space cooling effect in cities. Heliyon, v. 5, n. 4, p. e01339, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>>.
7. ASSIS, E. S. DE. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. RUA. Revista de Arquitetura e Urbanismo, v. 9, p. 20–25, 2007.
8. BARCELONA. Barcelona green infrastructure and biodiversity plan 2020. p. 63-66 BASTIN, Jean-François et al. The global tree restoration potential. Science Magazine, New York, v. 365, n. 6448, p. 76-79, 05 jul. 2019. Disponível em: <https://science.sciencemag.org/content/365/6448/76>. Acesso em: jul. de 2019.
9. BENEDICT, M. A.; MCMAHON, E. T. Green Infrastructure: Linking Landscapes and Communities. Urban Land, v. June, n. 3, p. 299, 2006. Disponível em: <<http://www.conservationfund.org/>>.
10. BODNARUK, E. W.; KROLL, C. N.; YANG, Y.; et al. Where to plant urban trees? A spatially explicit methodology to explore ecosystem service tradeoffs. Landscape and Urban Planning, v. 157, p. 457–467, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.016>>.
11. BONAN, G. Ecological climatology - Concepts and Applications. Cambridge: Cambridge University Press 2016.
12. BORDEN, K. A.; CUTTER, S. L. Spatial patterns of natural hazards mortality in the United States. International Journal of Health Geographics, v. 7, p. 1–13, 2008.
13. BORELLI, S.; CHEN, Y.; CONIGLIARO, M.; SALBITANO, F. Green infrastructure: a new paradigm for developing cities. World Forestry Congress Conference Paper, , n. September, p. 7–11, 2015.
14. BROWN, Robert D.; GILLESPIE, Terry J. Microclimatic Landscape Design: creating thermal comfort and energy efficiency. New York: John Wiley & Sons, 1995.

15. BRUNE, M. Urban trees under climate change. Climate Service Center Germany, p. 123, 2016.
16. BRUSE, M. ENVI-met 3.0: Updated Model Overview. 1. March, p. 1–12, 2004.
17. BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environmental Modelling and Software*, v. 13, n. 3–4, p. 373–384, 1998.
18. BUENOS AIRES CIUDAD: Una mirada prospectiva al paisaje urbano. 2014.
19. C40 CITIES. Good Practice Guide: Cool Cities. C40 Cities Climate Leadership Group, p. 1–17, 2016.
20. C40 CITIES. Heat Resilient Cities: Measuring benefits of urban heat adaptation. p. 41, 2020. Disponível em: <https://www.c40knowledgehub.org/s/article/Heat-Resilient-Cities-Measuring-benefits-of-urban-heat-adaptation?language=en_US>. Acesso em novembro de 2020.
21. C40 CITIES; ARUP; UNIVERSITY OF LEEDS. The Future of Urban Consumption in a 1.5°C World. , p. 68, 2019. Disponível em: <<https://www.c40.org/consumption>>. Acesso em junho de 2020.
22. C40 CITIES; UCCRN. The future we don't want: how climate change could impact the World's Greatest Cities. February, p. 59, 2018. Disponível em: <https://c40-production-images.s3.amazonaws.com/other_uploads/images/1789_Future_We_Don't_Want_Report_1.4_hi-res_120618.original.pdf>. Acesso em novembro de 2020.
23. C40CITIES. Climate Action in Megacities 3.0 . December, p. 1–128, 2015.
24. CAMERON, R. W. F.; BLANUŠA, T.; TAYLOR, J. E.; et al. The domestic garden - Its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 11, n. 2, p. 129–137, 2012.
25. CAMPBELL, G. S.; NORMAN, J. M. An Introduction to Environmental Biophysics. 1998.
26. CARTER, J. G.; CAVAN, G.; CONNELLY, A.;. Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in Planning*, v. 95, p. 1–66, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.progress.2013.08.001>>. Acesso em setembro de 2021.
27. CARVALHO, P. E. Espécies Arbóreas. Embrapa Informação Tecnológica; Colombo, PR: Embrapa Florestas, 2003.
28. COMMISSION, E. Nature-Based Solutions: State of the Art in EU-funded projects. 2020.
29. CORMIER, N. S.; PELLEGRINO, P. R. M. Infra-estrutura verde: uma estratégia paisagística para a água urbana. *Paisagem e Ambiente*, , n. 25, p. 127, 2008.
30. COSTANZA, R.; D'ARGE, R.; DE GROOT, R.; et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics*, v. 25, n. 1, p. 3–15, 1997.

31. COSTANZA, R.; DE GROOT, R.; BRAAT, L.; et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go? *Ecosystem Services*, v. 28, p. 1–16, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.09.008>>. Acesso em junho de 2019.
32. COUTTS, A. M.; WHITE, E. °C.; TAPPER, N. J.; BERINGER, J.; LIVESLEY, S. J. Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 124, n. 1–2, p. 55–68, 2016.
33. CZAJA, M.; KOŁTON, A.; MURAS, P. The complex issue of urban trees-stress factor accumulation and ecological service possibilities. *Forests*, v. 11, n. 9, p. 1–24, 2020.
34. DE ABREU, R. C.; TETT, S. F. B.; SCHURER, A.; ROCHA, H. R. Attribution of Detected Temperature Trends in Southeast Brazil. *Geophysical Research Letters*, v. 46, n. 14, p. 8407–8414, 2019.
35. DE BONO, A. Impacts of summer 2003 heat wave in Europe. *UNEP/DEWA/GRID Eur. Environment Alert Bulletin*, n. 2, p. 1-4, 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313059632_Impacts_of_summer_2003_heat_wave_in_Europe. Acesso em: jul. de 2019.
36. DE GROOT, R. S.; WILSON, M. A.; BOUMANS, R. M. J. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, v. 41, n. 3, p. 393–408, 2002.
37. DEMUZERE, M.; ORRU, K.; HEIDRICH, O.; et al. Mitigating and adapting to climate change: multi-functional and multi-scale assessment of green urban infrastructure. *Journal of Environmental Management*, v. 146, n. March 2018, p. 107–115, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.07.025>>. Acesso em julho de 2021.
38. DUARTE, D. H. S. O clima urbano e o ambiente construído. In: J. C. S. Gonçalves; K. Bode (Orgs.) *Edifício Ambiental*. 1o ed, p.155–179, 2015. Oficina de Textos.
39. DUARTE, Denise H. S. Envisioning a climate adaptation plan for the city of São Paulo: a starting-point framework. April 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/332411159_Envisioning_a_climate_adaptation_plan_for_the_city_of_Sao_Paulo_a_starting-point_framework. Acesso em: junho de 2019.
40. DUARTE, Denise H. S. O Impacto da Vegetação no Microclima em cidades adensadas e seu papel na adaptação aos fenômenos de Aquecimento Urbano: Contribuições a uma abordagem interdisciplinar. 2015. Tese (Livre-docência em arquitetura e urbanismo), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

41. EGGERMONT, H.; BALIAN, E.; AZEVEDO, J. M. N.; et al. Nature-based solutions: New influence for environmental management and research in Europe. *Gaia*, v. 24, n. 4, p. 243–248, 2015.
42. ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; BONEH, D.; KUTIEL, P. B. Effect of high-albedo materials on pedestrian heat stress in urban street canyons. *Urban Climate*, v. 10, n. P2, p. 367–386, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2013.10.005>>. Acesso em junho de 2021.
43. ESPÍNDOLA, I. B.; RIBEIRO, W. C. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. *Cadernos MetrÓpole*, v. 22, n. 48, p. 365–396, 2020.
44. FAIVRE, N.; FRITZ, M.; FREITAS, T.; DE BOISSEZON, B.; VANDEWOESTIJNE, S. Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges. *Environmental Research*, v. 159, n. August 2017, p. 509–518, 2017.
45. FARRUGIA, S.; HUDSON, M. D.; MCCULLOCH, L. An evaluation of flood control and urban cooling ecosystem services delivered by urban green infrastructure. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, v. 9, n. 2, p. 136–145, 2013.
46. FENNER, D.; MEIER, F.; BECHTEL, B.; OTTO, M.; SCHERER, D. Intra and inter “local climate zone” variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 26, n. 5, p. 525–547, 2017.
47. FIALHO, E. S.; FERNANDES, L. A.; CORREA, W. D. S. C. Climatologia Urbana: Conceitos, Metodologias e Técnicas. *Revista Brasileira de Climatologia*, , n. June, 2019.
48. FISCHETTI, M. Drowning New Orleans. *Scientific American*, v. 285, n. 4, p. 68, 2001.
49. GEIRINHAS, J. L.; TRIGO, R. M.; LIBONATI, R.; COELHO, C. A. S.; PALMEIRA, A. C. Climatic and synoptic characterization of heat waves in Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 38, n. 4, p. 1760–1776, 2018.
50. GILLNER, S.; BRÄUNING, A.; ROLOFF, A. Dendrochronological analysis of urban trees: Climatic response and impact of drought on frequently used tree species. *Trees - Structure and Function*, v. 28, n. 4, p. 1079–1093, 2014.
51. GIVONI, B. Impact of planted areas on urban environmental quality: A review. *Atmospheric Environment. Part B, Urban Atmosphere*, v. 25, n. 3, p. 289–299, 1991.
52. GUERREIRO, S. B.; DAWSON, R. J.; KILSBY, °C.; LEWIS, E.; FORD, A. Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. *Environmental Research Letters*, v. 13, n. 3, 2018.
53. GUO, Z.; YAN, Z.; MAJCHER, B. M.; et al. Dynamic biotic controls of leaf thermoregulation across the diel timescale. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 315, n. June 2021, p.

- 108827, 2022. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.108827>>. .
54. HAN, S. G.; MUN, S. H.; HUH, J. H. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. *IBPSA 2007 - International Building Performance Simulation Association 2007*, , n. October 2014, p. 1131–1138, 2007.
 55. HARDIN, P. J.; JENSEN, R. R. The effect of urban leaf area on summertime urban surface kinetic temperatures: A Terre Haute case study. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 6, n. 2, p. 63–72, 2007.
 56. HEALTH, Q. Heatwave Response Plan: an annex of the Queensland Helath Disaster Plan., p. 1–27, 2015. Disponível em: <https://www.health.qld.gov.au/__data/assets/pdf_file/0032/628268/heatwave-response-plan.pdf>. Acesso em janeiro de 2021. .
 57. HERZOG, C. P.; ANTU, C.; SEPTEMBER, R. The EU – Brazil Sector Dialogue on nature-based solutions. 2019.
 58. HERZOG, C. P.; ROZADO, C. A. Diálogo setorial UE-Brasil sobre soluções baseadas na natureza. 2019.
 59. HOPPE, P. The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International journal of biometeorology**, v. 43, n. 2, p. 71–75, 1999. Disponível em: <<http://www.embase.com/search/results?subaction=viewrecord&from=export&id=L129347950>>. .
 60. IAG-USP. BOLETIM CLIMATOLÓGICO ANUAL DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO IAG-USP, v. 12, p. 59, 2008.
 61. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. 2014.
 62. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers of IPCC Special Report on Global Warming of 1.5oC approved by governments. IPCC, , n. October, p. 13–16, 2018b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/11/pr_181008_P48_spm_en.pdf>. Acesso em junho de 2020.
 63. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Summary for Policymakers. In: R. Y. and B. Z. (eds.). *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, (Org.); *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution*

- of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1o ed, v. 1, p.1–41, 2021. Cambridge University Press.
64. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. What the IPCC special report on global warming of 1.5°C means for cities urban policy makers. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, , n. December, 2018a.
 65. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). “The Future of Cooling Opportunities for energy- efficient air conditioning”. International Energy Agency Website: www.iea.org, 2018. , 2018. Disponível em: <www.iea.org>. Acesso em janeiro de 2021.
 66. janeiro/março 2012.
 67. JANSSON, C. Urban microclimate and surface hydrometeorological processes. 2006.
 68. JIM, C. Y. Soil volume restrictions and urban soil design for trees in confined planting sites. *Journal of Landscape Architecture*, v. 14, n. 1, p. 84–91, 2019.
 69. JOHANSSON, E. Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, v. 41, n. 10, p. 1326–1338, 2006.
 70. KALKSTEIN, L. S.; JAMASON, P. F.; GREENE, J. S.; LIBBY, J.; ROBINSON, L. The Philadelphia hot weather-health watch/warning system: Development and application, summer 1995. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 77, n. 7, p. 1519–1528, 1996.
 71. KENNEDY, C.; CUDDIHY, J.; ENGEL-YAN, J. The Changing Metabolism of Cities. , v. 11, n. 2, 2007.
 72. KOVATS, R. S.; HAJAT, S. Heat stress and public health: A critical review. *Annual Review of Public Health*, v. 29, n. November 2019, p. 41–55, 2008.
 73. KRASNY, M. E.; TIDBALL, K. G. Applying a resilience systems framework to urban environmental education. *Environmental Education Research*, v. 15, n. 4, p. 465–482, 2009.
 74. KROPP, T. Development of a tool generating worldwide standardized urban topologies for microclimate simulations, 2018. Johannes Gutenberg-Universit“at Mainz.
 75. KROPP, T.; SIMON, H.; SHINZATO, P.; FERREIRA, L. S; GUSSON, C. S.; DUARTE, D. H. S; BRUSE, M. Enhancement of the WUDAPT portal tool WUDAPT2Envi-MET: Introducing site-specific local climate zones to WUDAPT2Envi-MET. PLEA 2018 - Smart and Healthy within the Two-Degree Limit: Proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, v. 1, n. December, p. 256–261, 2018.

76. LEMONSU, A.; KOUNKOU-ARNAUD, R.; DESPLAT, J.; SALAGNAC, J. L.; MASSON, V. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic Change*, v. 116, n. 3–4, p. 679–692, 2013.
77. LEMONSU, A.; VIGUIÉ, V.; DANIEL, M.; MASSON, V. Vulnerability to heat waves: Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Climate*, v. 14, p. 586–605, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.007>>. Acesso em maio de 2021. .
78. LIU, Z.; CHENG, W.; JIM, C. et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. *Building and Environment*, p. 103307, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jfca.2019.103307>>. Acesso em janeiro de 2022. .
79. LOBACCARO, G.; ACERO, J. A. Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons. *Urban Climate*, v. 14, p. 251–267, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2015.10.002>>. Acesso em janeiro de 2020. .
80. LOCOSSELLI, G. M.; CAMARGO, E. P. DE; MOREIRA, T. C. L.; et al. The role of air pollution and climate on the growth of urban trees. *Science of the Total Environment*, v. 666, p. 652–661, 2019. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.291>>. Acesso em maio de 2021..
81. MAIRIE DE PARIS. Paris's Adaptation Strategy. p. 64, 2015.
82. MANTEY, P.; CAETANO, D.; MARIA, H.; BÁRBARA, S. The City of São Paulo' s Environmental Quota: A Policy to Embrace Urban Environmental Services and Green Infrastructure Inequalities in the Global South. , v. 3, n. June, p. 1–16, 2021.
83. MARCHIN, R. M.; BACKES, D.; OSSOLA, A.; et al. Extreme heat increases stomatal conductance and drought-induced mortality risk in vulnerable plant species. *Global Change Biology*, v. 28, n. 3, p. 1133–1146, 2022.
84. MARCHIN, R. M.; OSSOLA, A.; LEISHMAN, M. R.; ELLSWORTH, D. S. A Simple Method for Simulating Drought Effects on Plants. *Frontiers in Plant Science*, v. 10, n. January, p. 1–14, 2020.
85. MARENGO, J. A. O futuro clima do Brasil. *Revista USP*, n. 103, p. 25, 2014.
86. MARENGO, J. A.; CAMARGO, C. C. Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960-2002. *International Journal of Climatology*, v. 28, n. 7, p. 893–904, 2008.
87. MARSELLE, M. R.; BOWLER, D. E.; WATZEMA, J.; et al. Urban street tree biodiversity and antidepressant prescriptions. *Scientific Reports*, v. 10, n. 1, p. 1–11, 2020. Nature Publishing Group UK. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/s41598-020-79924-5>>. Acesso em junho de 2021..

88. MATZARAKIS A.; MAYER H. Another kind of environmental stress: thermal stress. WHO collaborating centre for air quality management and air pollution control. Newsletter 18:7–10, 1996
89. MAY, P. B.; LIVESLEY, S. J.; SHEARS, I. Managing and monitoring tree health and soil water status during extreme drought in Melbourne, Victoria. *Arboriculture and Urban Forestry*, v. 39, n. 3, p. 136–145, 2013.
90. MILLS, G. Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, v. 10, n. P3, p. 479–489, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>>. Acesso em dezembro de 2020. .
91. MILLS, G.; CLEUGH, H.; EMMANUEL, R.; et al. Climate information for improved planning and management of mega cities (Needs Perspective). *Procedia Environmental Sciences*, v. 1, n. 1, p. 228–246, 2010.
92. MONTEIRO, L. M. CONFORTO TÉRMICO EM ESPAÇOS URBANOS ABERTOS: Verificações Modelares como Aportes à Exploração de Abordagens, 2018. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.
93. MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Modelo adaptativo de conforto para avaliação in loco de espaços urbanos abertos. *Ambiente Construído*, v. 12, n. 1, p. 61–79, 2012.
94. MONTEITH, J. L. et al. The measurement and control of stomatal resistance in the field. *Journal Appy. Ecology*, v. 2, 1965, p. 345-355.
95. MORAKINYO, T. E.; OUYANG, W.; LAU, K. K. L.; REN, C.; NG, E. Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation. *Science of the Total Environment*, v. 719, n. March, p. 137461, 2020. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461>>. Acesso em abril de 2021.
96. MORAKINYO, T. E.; REN, C.; SHI, Y.; et al. Estimates of the impact of extreme heat events on cooling energy demand in Hong Kong. *Renewable Energy*, v. 142, p. 73–84, 2019. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.077>>. Acesso em abril de 2021. .
97. MOSER, A.; RÖTZER, T.; PAULEIT, S.; PRETZSCH, H. The urban environment can modify drought stress of small-leaved lime (*Tilia cordata* Mill.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Forests*, v. 7, n. 3, 2016.
98. NAZARIAN, N.; LEE, J. K. W. Personal assessment of urban heat exposure: A systematic review. *Environmental Research Letters*, v. 16, n. 3, 2021.
99. NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A. Mudanças climáticas em rede: um olhar interdisciplinar. 2017.
100. NOBRE, C. A.; YOUNG, A. F.; SALDIVIA, P. H. N.; MARENGO, J. A. Cidades Brasileiras Às Mudanças climáticas: relatório final. 2011.

101. NOWAK, D. J. Urban and Community Forestry in the Northeast. Urban and Community Forestry in the Northeast, January 2010, 2007.
102. OKE, T. R. Boundary Layer Climates. 2 ed. London; New York: Routledge; John Wiley & Sons, 1987.
103. OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v.1, 237-254, 1981.
104. OKE, T. R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, v.7, 769-779, 1973.
105. OKE, T. R. The micrometeorology of the urban forest. *Philosophical Transactions - Royal Society of London, B*, v. 324, n. 1223, p. 335–349, 1989.
106. OKE, T.; MILLS, G.; A., °C.; VOOGT, J. Urban Climates. New York: Cambridge University Press, 2017.
107. OLIVEIRA, B. B. DE. Políticas públicas para a inserção de vegetação nas cidades: os indicadores de vegetação para o espaço público e privado e a Quota Ambiental em São Paulo, 2018. Relatório de Iniciação Científica. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.
108. ORDÓÑEZ, C.; DUINKER, P. N. Assessing the vulnerability of urban forests to climate change. *Environmental Reviews*, v. 22, n. 3, p. 311–321, 2014.
109. PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Impactos, Vulnerabilidades e Adaptação. 2014.
110. PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Mudanças Climáticas e Cidades: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2016.
111. PBMC. Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 ao Primeiro Relatório de Avaliação Nacional do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Sumário Executivo GT1. Base Científica das Mudanças Climáticas, p. 23, 2013.
112. PERROTTI, D.; STREMKER, S. Can urban metabolism models advance green infrastructure planning? Insights from ecosystem services research. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, v. 47, n. 4, p. 678–694, 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/2399808318797131>>. Acesso em julho de 2021. .
113. QI, J.; DING, L.; LIM, S. Planning for cooler cities: A framework to support the selection of urban heat mitigation techniques. *Journal of Cleaner Production*, v. 275, p. 122903, 2020. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122903>>. Acesso em junho de 2021.
114. RAHMAN, M. A.; ARMSON, D.; ENNOS, A. R. A comparison of the growth and cooling effectiveness of five commonly planted urban tree species. *Urban Ecosystems*, v. 18, n. 2, p. 371–389, 2015.

115. ROSSI, F. A.; KRÜGER, E. L.; BRÖDE, P. Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços
116. SANTAMOURIS, M.; DING, L.; FIORITO, F.; et al. Passive and active cooling for the outdoor built environment – Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects. *Solar Energy*, v. 154, p. 14–33, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.006>>. Acesso em janeiro de 2020. .
117. SANTAMOURIS, M.; PAPANIKOLAOU, N.; LIVADA, I.; et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of building. *Solar Energy*, v. 70, n. 3, p. 201–216, 2001.
118. SANTAMOURIS, M.; SYNNEFA, A.; KARLESSI, T. Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy*, v. 85, n. 12, p. 3085–3102, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2010.12.023>>. Acesso em fevereiro de 2020. .
119. SANUSI, R.; JOHNSTONE, D.; MAY, P.; LIVESLEY, S. J. Microclimate benefits that different street tree species provide to sidewalk pedestrians relate to differences in Plant Area Index. *Landscape and Urban Planning*, v. 157, p. 502–511, 2017. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.08.010>>. Acesso em Agosto de 2021.
120. SÃO PAULO (cidade), Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente / Coordenação de Planejamento Ambiental. Mapeamento Digital da Cobertura Vegetal do Município de São Paulo. Relatório Final / Coordenação: OLIVEIRA, Vivian Prado de. São Paulo: SVMA, 2020.
121. SATHLER, D.; PAIVA, J. C. P.; BAPTISTA, S. Cidades e Mudanças Climáticas: planejamento urbano e governança ambiental nas sedes das principais regiões metropolitanas e regiões integradas de desenvolvimento. *Cities and Climate Change: urban planning and environmental governance in the central Munich*. Caderno de Geografia, v. 29, n. 56, p. 262, 2019.
122. SCHIPPER, L. Climate Change Adaptation and Development Exploring the Linkages. Tyndall Centre for Climate Change Research, v. 8, n. 2, p. 282–288, 2007.
123. SEDDON, N.; CHAUSSON, A.; BERRY, P.; GIRARDIN, C. A. J.; SMITH, A.; TURNER, B. Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 375, n. 1794, 2020.
124. SHEPHERD, J. M. ã. Evidence of urban-induced precipitation variability in arid climate regimes. v. 67, p. 607–628, 2006.
125. SHINZATO, P.; SIMON, H.; SILVA DUARTE, D. H.; BRUSE, M. Calibration process and parametrization of tropical plants using ENVI-met V4–Sao Paulo case study. *Architectural*

- Science Review, v. 62, n. 2, p. 112–125, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/00038628.2018.1563522>>.
126. SHINZATO, P.; YOSHIDA, D. F. O.; DUARTE D. H. S.; Parametrization of tropical plants using ENVI-met V4 and its impact on urban microclimates – Sao Paulo case study. 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, June, p. 30–31, 2016.
 127. SHINZATO, P. O impacto da vegetação nos microclimas urbanos. , p. 173, 2009. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/16/16132/tde-26032010-160951/>>. Acesso em julho de 2019 .
 128. SHINZATO, P.; YOSHIDA, D. F. O.; DUARTE, D. H. S. O Impacto Da Vegetação Nos Microclimas Urbanos : Estimativa Do Índice De Área Foliar - Iaf Pelo Método De Fotos Hemisféricas. , , n. November, p. 1–8, 2014.
 129. SIMON, H. Modeling urban microclimate, 2016. Johannes Gutenberg-Universität at Mainz.
 130. SIMON, H.; KROPP, T.; SOHNI, F.; BRUSE, M. Downscaling climate models: Running nested simulations in the microclimate model ENVI-MET. A case study using Wudapt2envi-Met simulation data. PLEA 2018 - Smart and Healthy within the Two-Degree Limit: Proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, v. 1, n. December, p. 200–205, 2018.
 131. SLATER, A.-M. Book Review: Global Report on Human Settlements 2011, Cities and Climate Change. 2012.
 132. SLOT, M.; CALA, D.; ARANDA, J.; et al. Leaf heat tolerance of 147 tropical forest species varies with elevation and leaf functional traits, but not with phylogeny. Plant Cell and Environment, v. 44, n. 7, p. 2414–2427, 2021.
 133. SLOT, M.; KRAUSE, G. H.; KRAUSE, B.; HERNÁNDEZ, G. G.; WINTER, K. Photosynthetic heat tolerance of shade and sun leaves of three tropical tree species. Photosynthesis Research, v. 141, n. 1, p. 119–130, 2019. Springer Netherlands. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11120-018-0563-3>>. Acesso em agosto de 2021.
 134. STEWART, I. D., OKE, T., KRAYENHOFF, S. Evaluation of the 'local climate zone' scheme using temperature observations and model simulations. International Journal of Climatology, 34: 1062–1080, 2014.
 135. STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 93, n. 12, p. 1879–1900, 2012.
 136. STONE Jr., Brian. The city and the coming climate. Climate Changes in the Places we live. New York: Cambridge, 2012.
 137. TESKEY, R.; WERTIN, T.; BAUWERAERTS, I.; et al. Responses of tree species to heat waves and extreme heat events. Plant Cell and Environment, v. 38, n. 9, p. 1699–1712, 2015.

138. TYLER, S.; REED, S. O.; MACCLUNE, K.; CHOPDE, S. CLIMATE RESILIENCE IN CONCEPT Planning for Urban Climate Resilience: Framework and Examples from the Asian Cities Climate Change Resilience Network Institute for Social and Environmental Transition www.i-s-e-t.org i Planning for Urban Climate Resilience: . , 2010. Disponível em: <www.i-s-e-t.org>. Acesso em agosto de 2020. .
139. UMEZAKI, A. S.; RIBEIRO, F. N. D.; DE OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J.; DE MIRANDA, R. M. Numerical characterization of spatial and temporal evolution of summer urban heat island intensity in São Paulo, Brazil. *Urban Climate*, v. 32, n. January, p. 100615, 2020. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100615>>. Acesso em janeiro de 2021..
140. UN HABITAT. *World Cities Report 2020*. 2020.
141. UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. *Making Peace With Nature*. 2021.
142. UNIVERSITE PARIS-SACLAY. PET INDEX: A REVISED MODEL FOR IMPROVED THERMAL COMFORT. Disponível em <https://ens-paris-saclay.fr/en/actualite/pet-index-revised-model-improved-thermal-comfort>. Acesso em julho de 2022.
143. VENTER, Z. S.; CHAKRABORTY, T.; LEE, X. Crowdsourced air temperatures contrast satellite measures of the urban heat island and its mechanisms. p. 1–10, 2021.
144. VOOGT, James A., OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384, 2003.
145. WEISS, M. et al. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology*, n.121, 2004, p. 37–53
146. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO provisional statement on the state of global climate in 2019. 2019..
147. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2019. 2020.
148. YANG, X.; ZHAO, L.; BRUSE, M.; MENG, Q. Evaluation of a microclimate model for predicting the thermal behavior of different ground surfaces. *Building and Environment*, v. 60, p. 93–104, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.008>>. Acesso em outubro de 2020.
149. ZUCCHI, Luísa A. O Impacto da vegetação nos microclimas urbanos: quantificação da densidade foliar de diferentes grupos arbóreos pelas metodologias de foto hemisféricas e de analisador do dossel. 2018. Relatório de Iniciação científica (Graduando em Arquitetura e Urbanismo). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo.