

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS DE ESPAÇOS
ABERTOS: SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS POR
MEIO DO SOFTWARE ENVI-MET**

CAROLINA DE REZENDE MACIEL

Orientadora: **Prof^a. Dr^a. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE
NOGUEIRA**

Co-orientadora: **Prof^a. Dr^a. FLÁVIA MARIA DE MOURA SANTOS**

Cuiabá, MT

Outubro de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

**CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS DE ESPAÇOS
ABERTOS: SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS POR
MEIO DO SOFTWARE ENVI-MET**

CAROLINA DE REZENDE MACIEL

*Tese apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Física Ambiental da
Universidade Federal do Mato Grosso,
como parte dos requisitos para obtenção
do título de Doutora em Física Ambiental.*

Prof^ª. Dr^ª. MARTA CRISTINA DE JESUS ALBUQUERQUE NOGUEIRA

Co-orientadora: Prof^ª. Dr^ª. FLÁVIA MARIA DE MOURA SANTOS

Cuiabá, MT
Outubro de 2014

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

D278c de Rezende Maciel, Carolina.
CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS DE ESPAÇOS ABERTOS: SIMULAÇÃO
DE ESTRATÉGIAS POR MEIO DO SOFTWARE ENVI-MET / Carolina de
Rezende Maciel. -- 2014
93 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientadora: Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira.
Co-orientadora: Flávia Maria de Moura Santos.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física,
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2014.
Inclui bibliografia.

1. Ilha de calor. 2. Estratégias de mitigação. 3. Envi-met. 4. Clima Urbano. I.
Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.

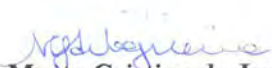
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental

FOLHA DE APROVAÇÃO

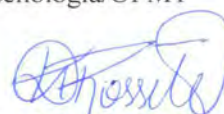
**TÍTULO: CONDIÇÕES MICROCLIMÁTICAS DE ESPAÇOS
ABERTOS: SIMULAÇÃO DE ESTRATÉGIAS POR MEIO DO
SOFTWARE ENVI-MET**


AUTORA: CAROLINA DE REZENDE MACIEL


Tese de Doutorado defendida e aprovada em 17 de outubro de 2014, pela comissão julgadora:


**Profa. Dra. Marta Cristina de Jesus
Albuquerque Nogueira- Orientadora**
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e
Tecnologia/UFMT


Profa. Dra. Flávia Maria de Moura Santos
Examinadora Interna
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e
Tecnologia/UFMT


Profa. Dra. Karyna de Andrade Carvalho Rosseti
Examinadora Interna
Faculdade de Arquitetura, Engenharia e
Tecnologia/UFMT


Prof. Dr. Jonathan Willian Zangeski Novais
Examinador Externo
Universidade de Cuiabá/UNIC


Prof. Dr. Marlon Leão
Examinador Externo
Universidade do Estado de Mato Grosso/UNEMAT

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais José Maciel de Mello e Clara de Rezende Maciel pelo apoio incondicional e incentivo a buscar sempre o caminho do conhecimento.
- A Prof.^a Dr.^a Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira, por compartilhar seu conhecimento e pelo carinho durante estes anos de trabalho.
- Ao Prof. Dr. José de Souza Nogueira pela oportunidade de fazer parte da família Física Ambiental.
- Aos membros da banca examinadora , Professores Dr.^a Flávia Maria de Moura Santos, Dr.^a Karyna de Andrade Carvalho Rosseti, Dr. Marlon Leão e Dr. Jonathan Willian Zangeski Novais pela ricas contribuições para o aperfeiçoamento deste trabalho.
- Aos professores do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental pelo conhecimento dividido.
- À Professora Maria Kolokotroni por compartilhar seu conhecimento durante período de doutorado sanduíche (2012/2013).
- Aos meus colegas do Programa de Pós Graduação em Física Ambiental, pela amizade construída nestes anos de trabalho.
- Ao CNPq pela bolsa fornecida durante o período de realização desta pesquisa.
- À CAPES pela bolsa fornecida por meio do Programa Institucional de Bolsas de Doutorado Sanduíche no Exterior (PDSE), Processo BEX: 1462/12-1.
- A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	v
LISTA DE TABELAS	viii
RESUMO	x
ABSTRACT	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 PROBLEMÁTICA.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
2.1 CLIMA URBANO.....	4
2.1.1 Os elementos climáticos e o meio urbano.....	5
2.1.2 Características do Ambiente Urbano.....	9
2.2 ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANAS.....	17
2.2.1 Estratégias Utilizando Materiais Frescos.....	18
2.2.1 Estratégias Utilizando Vegetação.....	21
2.3 MODELO ENVI-MET.....	23
2.3.1 Estrutura do modelo.....	23
2.3.2 Limitações do modelo.....	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 FASE PREPARATÓRIA.....	28
3.1.1 Definição e caracterização da área de estudo.....	29
3.1.2 Medição das variáveis microclimáticas.....	33
3.1.3 Medição das variáveis espaciais.....	35
3.2 FASE DE SIMULAÇÃO.....	37
3.2.1 Configuração dos arquivos de entrada.....	39
3.2.2 Modelagem dos cenários.....	42
3.3 MÉTODOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE.....	44
3.3.1 Coeficiente de Determinação (R^2).....	44
3.3.2 Erro Médio Quadrático (RMSE).....	45
3.3.3 Erro Absoluto Médio (MAE).....	45

3.3.4 Desvio das Médias (MBE).....	46
4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	47
4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	47
4.1.1 Validação períodos quente-úmido e quente-seco.....	48
4.1.2 Definição das equações de calibração.....	51
4.2 RESULTADOS - CASO DE REFERÊNCIA.....	54
4.2.1 Temperatura do ar	54
4.2.2 Umidade relativa do ar	56
4.3 RESULTADOS - EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS.....	58
4.3.1 Estratégia 1 - Telhado Fresco	58
4.3.2 Estratégia 2 - Telhado Verde.	62
4.3.3 Estratégia 3 - Pavimento Fresco.	66
4.3.4 Estratégia 4 - Incremento de áreas verdes.	70
4.4 COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS.....	75
4.4.1 Temperatura do ar	75
4.4.2 Umidade relativa do ar	78
5. CONCLUSÕES.....	81
5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	82
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
6.1 BIBLIOGRAFIAS CITADAS.....	83
6.2 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Temperatura de superfície devido ao sombreamento das árvores.....	13
FIGURA 2 – Aplicação de material fresco em cobertura.....	19
FIGURA 3 – Fluxograma do modelo ENVI-met.....	24
FIGURA 4 – Fluxograma das etapas realizadas para o presente estudo.....	28
FIGURA 5 – (a) Localização do município no estado e (b) Municípios limítrofes.....	29
FIGURA 6 - Valores médios mensais de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) para Cuiabá no período 1961-1990.....	30
FIGURA 7 – Modificações no espaço do Campus da UFMT (1975 e 2010).....	31
FIGURA 8 – Relevo da Universidade Federal de Mato Grosso - campus Cuiabá.....	32
FIGURA 9 – Área selecionada para simulação no software ENVI-met.....	33
FIGURA 10 – Localização dentro da área em estudo e estação fixa PGFA	34
FIGURA 11 – Imagem da área de estudo e caracterização em software CAD.....	36
FIGURA 12 – Mapas de áreas relativas para cada categoria de ocupação do solo.....	37
FIGURA 13 – (a) Fragmento da área de estudo e (b) análise da imagem editada por meio do software Scion Image©.....	38
FIGURA 14 – Localização dos sensores para validação do modelo.....	47
FIGURA 15 – Regressão linear para validação da temperatura do ar - estações quente-úmida e quente-seca.....	49
FIGURA 16 – Regressão linear para validação da umidade relativa do ar - estações quente-úmida e quente-seca.....	50
FIGURA 17 – Regressão linear para calibração da temperatura do ar - estações quente-úmida e quente-seca.....	52

FIGURA 18 – Regressão linear para calibração da umidade relativa do ar - estações quente-úmida e quente-seca.....	53
FIGURA 19 – Mapas da distribuição horizontal da temperatura do ar (°C), a 1,1m do solo, para as estações quente-úmida e quente-seca.....	55
FIGURA 20 – Mapas da distribuição horizontal da umidade relativa do ar (%), a 1,1m do solo, para as estações quente-úmida e quente-seca.....	57
FIGURA 21 – Efeito da adoção da estratégia 1 - telhado fresco - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	59
FIGURA 22 – Efeito da adoção da estratégia 1 - telhado fresco - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	61
FIGURA 23 – Efeito da adoção da estratégia 2 - telhado verde - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	63
FIGURA 24 – Efeito da adoção da estratégia 2 - telhado verde - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	66
FIGURA 25 – Efeito da adoção da estratégia 3 - pavimento fresco - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	67
FIGURA 26 – Efeito da adoção da estratégia 3 - pavimento fresco - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	70
FIGURA 27 – Efeito da adoção da estratégia 4 - incremento de áreas verdes - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	71
FIGURA 28 – Efeito da adoção da estratégia 4 - incremento de áreas verdes - sobre a umidade relativa do ar para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo.....	74

FIGURA 29 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a temperatura média do ar, estação quente-úmida, ao longo do dia.....	75
FIGURA 30 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a temperatura média do ar, estação quente-seca, ao longo dia.	76
FIGURA 31 – Comparação entre estratégias do efeito sobre umidade relativa média do ar, estação quente-úmida, ao longo do dia	78
FIGURA 32 – Comparação entre estratégias do efeito sobre umidade relativa média do ar, estação quente-seca, ao longo do dia...	79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Aspectos da urbanização, que mudam o ambiente físico e levam a alterações na troca de energia e condições térmicas, em comparação à periferia	6
TABELA 2 – Propriedades radiativas de materiais urbanos.....	12
TABELA 3 – Valores típicos da rugosidade z_g para terrenos urbanizados.....	15
TABELA 4 – Contabilização das áreas - Campus UFMT.....	36
TABELA 5 – Dados de entrada do modelo - Quente-úmido.....	40
TABELA 6 – Dados de entrada do modelo - Quente-seco.....	41
TABELA 7 – Períodos de dados utilizados.....	48
TABELA 8 – Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met (Validação).....	49
TABELA 9 – Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met (Calibração).....	51

RESUMO

MACIEL, C. R. *“Condições Microclimáticas de Espaços Abertos: Simulação de Estratégias por meio do Software ENVI-Met”*. 93f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

Os estudos do clima urbano têm mostrado que, tanto em áreas temperadas quanto tropicais, a mudança climática local está associada ao efeito de transformação de energia na área urbana, influenciada por sua morfologia, propriedades térmicas dos materiais das superfícies construídas e pela produção antropogênica de calor. Estas modificações resultam em fenômenos como a ilha de calor urbana, que caracteriza-se por uma temperatura do ar mais elevada em meio urbanos, quando comparada à regiões vizinhas menos urbanizadas. O objetivo geral desta pesquisa foi avaliar estratégias de mitigação de ilhas de calor urbanas por meio do estudo de caso do campus da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado em Cuiabá-MT. Foram avaliados os efeitos das estratégias telhado fresco, telhado verde, pavimento fresco e incremento de áreas vegetadas nas variáveis temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%). O método utilizado consistiu em simulações por meio do software ENVI-met. Para tanto, foi necessária a coleta de dados micrometeorológicos para realizar a validação do modelo e a criação de 5 cenários, sendo 1 considerado o cenário de referência, tal como encontrado na realidade e mais 4 cenários, contemplando as estratégias estudadas. A avaliação do efeito destes cenários foi feita por meio de diferença do valor da variável encontrada no cenário de referência e no cenário com a estratégia implantada. Todas as estratégias avaliadas apresentaram efeitos sobre a temperatura do ar (redução) e umidade do ar (aumento), em maior ou menor grau, durante as duas estações climáticas consideradas. O maior efeito de redução da temperatura média do ar, ao longo do dia, durante os dois períodos estudados foi registrado pela estratégia 3 - pavimentos frescos, com 1,20°C no período úmido (13h) e 1,96°C (12h) para o período seco. O mesmo resultado foi encontrado para a variável umidade relativa do ar, que teve o maior efeito verificado também na estratégia 3. Foram registrados valores de aumento de 9,76% para o período úmido e de 9,34% para o período seco. Espera-se que com os resultados desta pesquisa, o estudo do conforto ambiental para o estado do Mato Grosso e da região Centro-Oeste seja enriquecido, atentando para o papel das estratégias de mitigação de ilhas de calor como agentes amenizadores do rigor climático imposto pelo clima das cidades de porte médio, como é o caso de Cuiabá.

Palavras-chave: ilha de calor, estratégias de mitigação, ENVI-met, clima urbano.

ABSTRACT

MACIEL, C. R. *Microclimatic Conditions of Open Spaces: Strategies Simulation through Envi-met Software*. 93f. Thesis (PhD in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2014.

Urban climate studies have shown that, in temperate as tropical areas, local climate change is associated with the effect of energy conversion the urban area, influenced by its morphology, thermal properties of materials surfaces constructed and by anthropogenic heat production. These modifications result in phenomena such as the urban heat island, which is characterized by a higher air temperature in urban environment, compared to less urbanized neighboring regions. The overall objective of this research is to evaluate urban heat islands mitigation strategies from case study of the Federal University of Mato Grosso campus, located in Cuiabá-MT. The effects of the strategies cool roof, green roof, fresh pavement and vegetated areas increment variables air temperature (°C) and relative humidity (%) were evaluated. The method used consisted in simulations using ENVI-met software. Therefore, it was necessary to collect micrometeorological data to perform model validation and to design five scenarios: the reference scenario, as found in reality and 4 more scenarios, contemplating the strategies studied. The evaluation of the effect of these scenarios was made by difference value of the variable found in the reference scenario and the scenario with the strategy implemented. All strategies evaluated showed effects on air temperature (reduction) and humidity (increase) during the two seasons considered. The highest effect in reducing the average air temperature during the day, for two study periods was recorded by strategy 3 - cool pavement with 1.20 °C in the wet period (13h) and 1.96 °C (12h) during the dry period. The same result was found for the variable relative humidity, which also had the highest effect seen in strategy 3, with increase from 9.76% for the wet period and 9.34% during the dry period. It is hoped that with the findings of this research, the study of environmental comfort for the state of Mato Grosso and the Midwest region is enriched, noting the role of urban heat island mitigation strategies as softening agents to the high temperature climates of the mid-sized cities, such as Cuiabá.

Keywords: Urban Climate, mitigation strategies, ENVI-met, urban heat island.

1. INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMÁTICA

As áreas urbanas concentram atualmente grande parte da população mundial e das atividades econômicas, sociais, culturais, o que resulta numa demanda e consumo crescentes de energia, água e outras matérias primas.

Recortando para a América Latina, de acordo com dados da ONU-Habitat (2012), 80% da população ocupa áreas urbanas. No Brasil, este contingente soma cerca de 87% da população, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012).

Para o ano de 2050, a projeção é de que a população urbana mundial aumentará em duas vezes o valor da população referente a 2007, passando de 3,3 bilhões para 6,4 bilhões de pessoas. Este crescimento será absorvido principalmente pelos países em desenvolvimento, cuja população passará de 2,4 bilhões em 2007, para 5,3 bilhões em 2050, (ONU, 2008).

Este aumento populacional previsto resultará em uma série de modificações sobre o ambiente natural, urbanizando áreas que antes não eram ocupadas a fim de abrigar e garantir condições de habitabilidade aos seres que viverão nestas áreas.

Os materiais usualmente empregados neste processo de urbanização, por sua vez, possuem características diferentes dos materiais encontrados no meio ambiente natural. Geralmente, materiais típicos do meio urbano apresentam tendência a serem impermeáveis, elevarem sua temperatura mais rapidamente e armazenarem esta energia térmica durante mais tempo.

Estas características dos materiais usualmente encontrados em meio urbano são a principal causa do fenômeno ilha de calor urbana, que é definido como o registro de temperaturas mais elevadas em espaços urbanos em comparação com suas regiões vizinhas menos urbanizadas.

A formação de ilhas de calor podem ter reflexos negativos para cidades de clima tropical, como por exemplo, desconforto térmico e consequente aumento do consumo de energia para alcançar estas condições de conforto. Este aumento do consumo de energia se deve à necessidade de utilização de equipamentos condicionares de ar, o que acarreta em impactos financeiros e ambientais elevados, que, por sua vez, comprometem a sustentabilidade destes espaços.

1.2 JUSTIFICATIVA

Nas últimas décadas, o crescimento e a concentração das populações nos centros urbanos tem acelerado o processo de mudança da cobertura das superfícies do solo. Este crescimento tem contribuído para o fenômeno das ilhas de calor, exigindo dos pesquisadores mais dedicação ao estudo da interação de variáveis microclimáticas com os materiais e formas que compõe o ambiente urbano.

Os estudos do clima urbano têm mostrado que, tanto em áreas temperadas quanto tropicais, a mudança climática local está associada ao efeito de transformação de energia na área urbana, influenciada por sua morfologia, propriedades térmicas dos materiais das superfícies construídas e pela produção antropogênica de calor. As consequências destas transformações têm como resultado a redução das taxas de resfriamento evaporativo e convectivo, devido à cobertura sistemática do solo e redução das áreas de vegetação, bem como à redução da velocidade dos ventos, causado pelo aumento da rugosidade superficial.

Nestas situações, as mudanças microclimáticas decorrentes das alterações nos balanços energético, hídrico e térmico e nos fluxos aerodinâmicos do ambiente urbano são ainda mais perceptíveis. As alterações no balanço de radiação referem-se ao decréscimo de radiação recebida em zonas sombreadas, ao aumento da radiação solar recebida e refletida internamente em cânions urbanos, à captação e armazenamento de calor pelos materiais de construção e à redução da radiação de onda longa emitida pela área urbana para a atmosfera devido à obstruções locais (OKE, 1978; SOUZA, 1996).

Portanto, considera-se de grande importância o estudo não só das relações existentes entre as características do meio urbano e as variáveis ambientais, como

também de diferentes formas de mitigar as consequências negativas destas relações. Desta forma, a pesquisa aqui apresentada investiga o impacto que diferentes métodos de mitigação de ilhas de calor têm sobre o microclima de uma área urbana.

De acordo com Gartland (2010), as principais estratégias difundidas atualmente, no que diz respeito à mitigação de ilhas de calor são: adoção de materiais frescos para pavimentação de superfícies e telhados e incremento da quantidade de vegetação, seja por meio de parques urbanos, seja por meio da incorporação de elementos verdes às diferentes partes de uma edificação, como por exemplo os telhados e fachadas verdes.

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar estratégias de mitigação de ilhas de calor urbanas a partir do estudo de caso do campus da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado em Cuiabá-MT.

Para alcançar este objetivo geral, é necessário o desenvolvimento dos seguintes objetivos específicos: selecionar uma porção urbana que seja passível da aplicação das estratégias a serem avaliadas; realizar a caracterização espacial da área escolhida para o desenvolvimento do estudo; elaborar um modelo da área de estudo reproduzindo as características reais dentro do ambiente do software ENVI-met; validar o modelo com dados micrometeorológicos reais, a fim de garantir a confiabilidade dos dados simulados; elaborar cenários alternativos para o campus da UFMT, contemplando os principais métodos difundidos acerca de mitigação de ilhas de calor urbanas; analisar o impacto das estratégias propostas no microclima dos cenários desenvolvidos.

Desta forma, espera-se que com os resultados desta pesquisa, o estudo do conforto ambiental para o estado do Mato Grosso e da região Centro-Oeste seja enriquecido, atentando para a importância da adoção de estratégias como forma de melhoria das condições microclimáticas de cidades tropicais de porte médio, como é o caso de Cuiabá.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CLIMA URBANO

O conceito de clima urbano é abordado por diversos autores e sob diversos enfoques. Neste item será apresentado o conceito visto pelo prisma dos diferentes autores que mais contribuíram para a construção da climatologia urbana como a disciplina que é conhecida atualmente.

Monteiro (2003) define clima urbano como um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização.

Já Souza (1996), define clima urbano como a situação climática específica das cidades, resultado da ocupação antrópica do meio que se manifestam devido à inter-relação de fenômenos, muitos deles causados pela própria urbanização.

Para Andrade (2005) o clima urbano resulta das interações entre “os fatores urbanos com o clima regional e com o meio físico pré-existentes.

Enquanto isso, Romero (2000), define que o clima de um lugar pode ser considerado como a integração de uma série de elementos que se verificam em escalas diferentes, abrangendo desde a macroescala até a microescala. Ainda segundo Romero (2000), o estudo do clima, compreende tanto a formação resultante de diversos fatores geomorfológicos e espaciais em jogo (sol, latitude, altitude, ventos, massas de terra e água, topografia, vegetação, solo, etc), quanto sua caracterização definida por seus elementos (temperatura do ar, umidade do ar, movimentos das massas de ar e precipitações).

Já Givoni (1976), define que o clima de uma dada região é determinado pelo padrão das variações dos vários elementos e suas combinações, destacando que os principais elementos climáticos que devem ser considerados no desenho dos edifícios e no conforto humano são: radiação solar, comprimento de onda da radiação, temperatura do ar, umidade, ventos e precipitações.

Para Oke (1978), o clima urbano é a modificação do clima local, resultado das condições particulares do meio ambiente urbano, ou seja, pela rugosidade do tecido urbano, ocupação, permeabilidade ou pelas propriedades térmicas dos materiais que o compõem.

Lombardo (1985) define o clima urbano como um mesoclima que está incluído no macroclima e que sofre, na proximidade do solo, influências microclimáticas derivadas dos espaços intra-urbanos.

Segundo García (1999), o clima urbano é aquele próprio das cidades e áreas urbanas, correspondendo às características do clima original da região onde se assenta a cidade e modificadas localmente pela ação do ser humano. As principais características deste tipo de clima consistem em: aumento da temperatura, diminuição da umidade relativa, maior nebulosidade e precipitação, diminuição da velocidade do vento e aumento da turbulência.

Já Landsberg¹ (1981) apud Gonçalves (2009), afirma que os efeitos microclimáticos que influenciam as condições climáticas da camada inferior da atmosfera se manifestam somente em condições de calmaria (ventos fracos e sem nuvem), pois em condições de ventos fortes, alta nebulosidade e chuva, a influência gerada pela cidade sobre o clima são, em grande parte, suprimidas.

2.1.1 Os elementos climáticos e o meio urbano

Os elementos climáticos são grandezas meteorológicas que variam no tempo e no espaço e que servem para definir o tipo climático de uma determinada região. Os principais elementos climáticos, de acordo com Romero (1988), são temperatura e umidade do ar, movimento do ar (ventos) e precipitação (chuvas).

Inicialmente, será descrito como os materiais do meio urbano afetam o balanço de energia e em seguida, a influência deste meio sobre cada elemento especificamente.

¹ LANDSBERG, H. E. *The urban climate*. Nova York: Academic Press, 1981 apud GONÇALVES, C.E.C. *Ruas confortáveis, ruas com vida - Proposição de diretrizes de desenho urbano bioclimático para vias públicas*. Dissertação – Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília, 2009.

2.1.1.1 *Balço de Energia em Ambientes Urbanos*

As cidades podem ser entendidas como organizações estritamente humanas, nas quais o homem atua com toda a sua força e plenitude, transformando a natureza em função de suas necessidades, excluindo como prioridade a preservação do meio ambiente e a qualidade de vida, (SANTOS, 2003).

O clima destas cidades, portanto, será produto de todos os fatores que se processam sobre a camada limite urbana e que agem alterando o clima em escala local, (MONTEIRO, 1976).

Estas características de ocupação do solo, típicas do meio urbano, modificam a troca de energia, atuando conforme descrito na Tabela 1:

Tabela 1 – Aspectos da urbanização, que mudam o ambiente físico e levam a alterações na troca de energia e condições térmicas, em comparação à periferia

1. Poluição do ar	Aumento da radiação de ondas longas emitida pela atmosfera, devido a maior absorção das ondas curtas recebidas e radiação de ondas longas emitidas pelos poluentes.
2. Calor Antropogênico	Calor despreendido no processo de combustão.
3. Superfícies Impermeáveis	Substituição de parte do calor latente que seria utilizado para evaporação de áreas úmidas por calor sensível, que aquece os materiais e o ar conseqüentemente.
4. Propriedades Térmicas das Superfícies	Superfícies e materiais construtivos que acumulam calor durante o dia, liberando-o durante a noite.
5. Geometria das Superfícies	Aumento da absorção de ondas longas devido à retenção entre as edificações; diminuição da perda de calor por turbulência causada pela estagnação entre as edificações; diminuição da perda da radiação por ondas longas do espaço entre edificações pela redução da área de céu visível.

Fonte: Adaptado de Oke, (1981).

Deste modo, o balanço de energia na área urbana é modificado devido às alterações promovidas pela substituição das superfícies naturais (solo nu, vegetação, por exemplo) por superfícies artificiais (pavimentações e construções), que armazenam parte da energia incidente na superfície que seria utilizada na evaporação, aquecendo os ambientes urbanos, tornando-os mais quentes que as regiões periféricas.

Estas modificações características do ambiente urbano são responsáveis por diversos fenômenos constatados atualmente, como por exemplo, as chamadas Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Este fenômeno caracteriza-se por um incremento da temperatura nas áreas centrais em relação às áreas do entorno. Este fenômeno reflete a interferência do homem na dinâmica dos sistemas ambientais e pôde ser constatado por Maitelli² apud Campos Neto (2006) na cidade de Cuiabá, com elevação de 0,073°C da temperatura média mínima por ano no período de 22 anos (1970-1992), período em que a cidade teve um elevado crescimento demográfico.

Diversas implicações microclimáticas negativas observadas em meio urbano são geradas por não serem consideradas as relações existentes entre os materiais que compõe estes espaços e as variáveis ambientais. Investigar o modo como uma interfere na outra, é, portanto, um passo essencial para que possam ser adotadas medidas preventivas.

2.1.1.2 *Temperatura e Umidade do Ar em Ambientes Urbanos*

Conforme visto no item anterior, a substituição da cobertura natural do solo por materiais como o asfalto e o concreto modificam o balanço de energia nas áreas urbanas. As cidades acabam então, por apresentar temperaturas médias maiores do que as zonas rurais de mesma latitude. Dentro delas, portanto, as temperaturas aumentam das periferias em direção ao centro.

Durante o período diurno, as áreas rurais atingem temperaturas máximas superiores aos valores encontrados nas áreas urbanas. Isso se deve ao fato de que a poluição e as grandes edificações dificultam a passagem da radiação direta do sol, diminuindo o saldo de radiação disponível no solo das cidades. Já no período noturno com a ausência da radiação direta, a malha urbana formada por materiais com grande capacidade de armazenar calor começam a dissipar toda a energia acumulada com o balanço de energia positivo durante o dia, fato este que não ocorre na área rural, que recebeu grande quantidade de energia, mas seu acúmulo, foi inferior ao da cidade, devido ao fato de sua composição ser em grande parte formada por vegetação e

² MAITELLI, G.T. *Uma abordagem Tridimensional do clima urbano em área Tropical Continental: o exemplo de Cuiabá/MT*. Tese (Doutorado em Climatologia) – USP, São Paulo, 1994 apud CAMPOS NETO, A.A. *Estudo bioclimático no campus da Universidade Federal de Mato Grosso*. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental0 – UFMT, Cuiabá, 2006.

também pela estratificação feita pela ventilação mais intensa destes locais, (MASCARÓ, 1996).

Com isso, as máximas temperaturas no período noturno nas cidades são superiores às encontradas nas áreas rurais, enquanto que, a umidade relativa do ar da área rural é superior ao das cidades, devido ao aumento da capacidade de absorção do vapor de água nas altas temperaturas da cidade e também pela evaporação do solo mais permeável e da transpiração das plantas, o que chamamos de evapotranspiração.

De acordo com Pezzuto et al. (2003), a acelerada urbanização nos grandes centros pode provocar sérios danos ao meio ambiente. Em relação à qualidade climatológica, a autora afirma que existem diferenças significativas entre dados climáticos do ambiente urbano comparado com o rural, demonstrando que o clima nas cidades sofre influência do conjunto complexo da estrutura urbana.

Para Mascaró (1996), em meios urbanos, a relação entre temperatura e umidade relativa do ar sofre interferência das características do recinto. A quantidade de vapor de água na massa de ar é afetada pela temperatura local do ar. O teor de umidade local dependerá, então, da interação entre a temperatura do ar e a temperatura superficial do meio circundante.

Este fenômeno de aumento da temperatura da região central em relação ao entorno, descrito anteriormente, é comumente denominado de Ilha de Calor Urbana (ICU), e possui um comportamento variável de acordo com o perfil urbano. A intensidade da ilha de calor, isto é, o excesso na temperatura urbana, pode ser máxima sobre a superfície e quase nula a 300 metros de altitude.

A condição mais propícia para identificação da ilha de calor são noites claras e calmas (condições aciclônicas), de 2 a 5 horas após o pôr-do-sol, quando o resfriamento das áreas periféricas e rurais é maior do que aquele ocorrido em áreas urbanas. Para condições de céu nublado e chuva e para o período diurno, devido à turbulência próxima à superfície, a ICU é menos intensa, dificultando, desta forma, sua identificação.

2.1.1.3 Ventos

No centro urbano, a velocidade do vento é mais baixa que nos arredores. O ar tende a se mover mais devagar próximo ao solo e aumenta a sua velocidade com a

altura. Além do mais, o vento, ao chegar na cidade, pode mudar a direção ao seguir os túneis criados pelas ruas com edificações altas em ambos os lados, ou ao incidir em edificações perpendiculares à direção original do vento.

A diminuição da velocidade do vento está relacionada à rugosidade da superfície edificada na cidade. Contudo, em alguns casos, a configuração de vias e edifícios pode acelerar a velocidade do vento urbano – efeito de canalização de ruas, efeito de pilotis, desvio do fluxo de ar até o solo por edifícios altos, (BARBIRATO et al., 2007).

2.1.1.4 Precipitações

As precipitações são o resultado de qualquer deposição em forma líquida ou sólida derivada da atmosfera. Refere-se, portanto, às várias formas líquidas e congeladas de água, como chuva, neve, granizo, orvalho, geada e nevoeiro. A evaporação das águas de superfície leva à formação de chuva e outras precipitações.

A condensação do vapor d'água, em forma de chuva, provém, em grande parte, de massas de ar úmida em ascensão, esfriadas rapidamente pelo contato com massas de ar mais frias. No ambiente urbano, a maior precipitação nas cidades em relação ao campo circundante deve-se, fundamentalmente, aos movimentos ascendentes do ar sobre a cidade devido à ilha de calor; à turbulência resultante de obstáculos próprios do ambiente da cidade e da nebulosidade urbana, proveniente da presença de partículas na atmosfera da cidade, (BARBIRATO et al., 2007).

2.1.2 Características do Ambiente Urbano

2.1.2.1 Uso e Ocupação do Solo

As ações antrópicas contribuem de maneira significativa para o aumento da temperatura no ambiente urbano. Ao observar o dia-a-dia típico de habitantes de áreas urbanas, vemos diversos emissores de energia térmica, dentre os quais se pode citar: emissões de poluentes pelos veículos automotores e pelas indústrias, a concentração de pessoas ou tipos de atividades em determinado local, utilização de máquinas que liberam energia entre outros.

Nery et al. (2003) confirmam a existência de uma relação entre os valores das médias das temperaturas e os padrões de ocupação. Os padrões de ocupação com maior densidade tendem a possuir as maiores médias de temperatura, enquanto que os padrões de ocupação com menores taxas tendem a possuir as menores médias. Conclui ainda o quanto seria conveniente que, o planejamento urbano, de posse dessa informação, definisse com base em critérios climáticos, novos padrões de ocupação que implicassem em uma nova condição térmica.

2.1.2.2 Materiais de Cobertura do Solo

Além das atividades que influenciam no ritmo e no fluxo de pessoas na superfície da área urbana, o tipo de recobrimento do solo interfere diretamente no clima do local, uma vez que, ao impermeabilizar o solo são introduzidos novos materiais com diferentes propriedades térmicas dos elementos naturais, que acarreta na alteração da relação com o meio e, conseqüentemente, com o microclima.

Em estudo realizado por Asaeda et al. (1996), foi verificado o fluxo de calor próximo à superfície do solo, e demonstrou-se a influência da pavimentação na alteração da temperatura do ar para diferentes tipos de pavimentos como asfalto, concreto e solo descoberto. Os resultados da pesquisa demonstraram que pavimentos asfálticos absorvem substancialmente maiores quantidades de radiação solar durante o dia, conservando, desta forma, a temperatura elevada destas superfícies durante toda a noite. Todo este ciclo contribui para o aquecimento do ar, e esta parcela é sendo esta taxa mais elevada em pavimentos asfálticos do que em superfícies de concreto e de solo descoberto.

A pesquisa realizada por Huang et al. (2008) utilizou 4 tipos de cobertura do solo para avaliação do microclima urbano, sendo eles: bosques urbanos, superfície de concreto, áreas com presença de água e vegetação rasteira (gramado), chegando a resultados de diferença de temperatura entre 0,5°C e 3,5°C. Durante o dia, o material que mantinha o maior valor era o concreto e à noite, o material com menor temperatura era o gramado.

A cidade tem sua massa edificada construída por materiais com diferentes propriedades que influenciam – junto com a vegetação e as superfícies pavimentadas

ou não – na quantidade de energia térmica acumulada e irradiada para sua atmosfera, expressas, principalmente, pelo albedo, pela absorvância e pela emitância.

Os diversos tipos de materiais utilizados para a pavimentação das superfícies urbanas possuem grande influência no acúmulo de energia radiante nas cidades. A quantidade de energia térmica agregada ao espaço urbano será diretamente proporcional às características dos materiais que o compõe, determinados principalmente pelos valores de emitância e albedo, conforme nos mostra a Tabela 2.

De acordo com Pereira et al. (2000), o albedo de uma superfície é definido como a razão entre todo o fluxo solar por ela refletido em relação a todo o fluxo solar nela incidente, ou seja, a refletância integrada em todo o espectro solar. O albedo da superfície está diretamente relacionado com as trocas de energia e afetam os regimes radiativos, ocasionando variações na temperatura, modificação no microclima local e mudanças no calor latente e sensível.

Os valores desta medida depende não só da composição do material, como também da idade do mesmo. Desta forma, tomando como exemplo uma cobertura cerâmica pode ter seu valor de albedo variando de 0,10 a 0,35, indicando um telhado com alguns anos e um telhado novo, respectivamente.

Já a variável emissividade, de acordo com Da Silva et al. (2009) é definida como a razão entre a emitância monocromática deste corpo e a correspondente emitância monocromática de um corpo negro, à mesma temperatura do corpo considerado. Esta definição é baseada no Princípio de Prevot, que afirma que todo corpo cuja temperatura esteja acima de 0 K emite e absorve radiação. Desta forma, a razão entre a energia emitida a energia absorvida por um corpo é somente função da temperatura e comprimento de onda e define uma característica importante do corpo: a emissividade (ϵ).

Interpretando os valores apresentados, observa-se que o material ‘Asfalto’, um dos maiores constituintes do ambiente urbano, possui valor de albedo de 5 a 20%, ou seja, de toda a radiação que chega até ele, apenas uma faixa de 5 a 20% é refletida, restando de 80 a 95% para ser absorvida pelo material.

A cobertura e os tipos de uso do solo, além de seus efeitos sobre as condições de balanço de energia, exercem importante influência na interceptação da água advinda da precipitação. O escoamento diminui à medida que aumentam as áreas

com cobertura vegetal (de maior rugosidade), e quanto maiores forem as áreas pavimentadas, maior e mais impactante será o escoamento superficial, (CECÍLIO e PRUSKI, 2003).

Tabela 2 – Propriedades radiativas de materiais urbanos

Superfície	α Albedo (%)	ϵ Emissividade (%)
<u>1- Ruas</u>		
Asfalto	5- 20	95
<u>2- Paredes</u>		
Concreto	10-35	71-90
Tijolo	20-40	90-92
Pedra	20-35	85-95
Madeira	40	90
<u>3- Coberturas</u>		
Betume e cascalho	8-18	92
Telhas	10-35	90
Ardósia	10	90
Chapa metálica	10-16	13-28
<u>4- Janelas</u>		
Vidro comum (altura solar em relação à janela)		
- Maior que 40°	8	87-94
- Menor que 40°	9-52	87-92
<u>5- Pinturas</u>		
Branças, claras	50-90	85-95
Vermelha, marrom, verde	20-35	85-95
Preto	2-15	90-98
<u>6- Áreas urbanas</u>		
Variação	10-27	85-95
Média	15	-

Fonte: Adaptado de Oke (1978).

2.1.1.5 *Vegetação em Ambientes Urbanos*

De acordo com Nicodemo & Primavesi (2009), a presença de árvores e de outros tipos de vegetação na cidade tem impactos físicos sobre uma série de características ambientais, sendo que, destes, os efeitos mais claramente percebidos são sobre a temperatura e a umidade do ar.

Um dos efeitos da vegetação é o resfriamento do ar por meio do aumento da umidade proveniente do processo de evapotranspiração. Segundo Primavesi (2007),

quanto maior for a superfície foliar, maior será a capacidade de transpiração das árvores, desde que haja água no solo disponível para permitir esta troca. Por esta razão, um metro quadrado ocupado com vegetação é mais eficiente que um metro quadrado de lâmina d'água na umidificação e na redução da temperatura do ar.

Ainda de acordo com Primavesi (2007), estima-se que a superfície evapotranspirante da lâmina foliar seja de quatro a dez vezes maior do que a mesma superfície coberta por água.

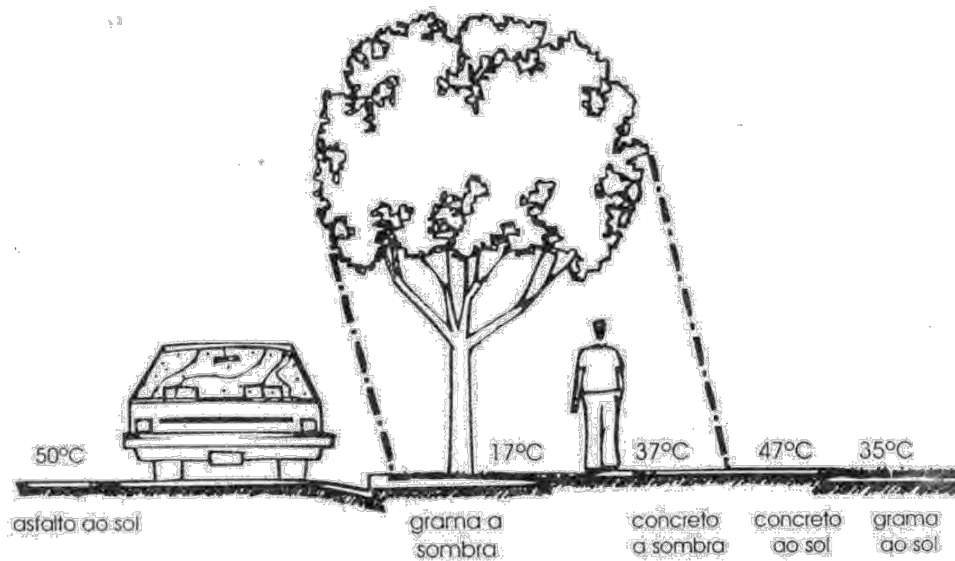


Figura 1 – Temperatura de superfície devido ao sombreamento das árvores

Fonte: Mascaró (1996).

A disposição estratégica de árvores pode também contribuir para reduzir gastos de energia com resfriamento ou com aquecimento e com umidificação do ar. Os efeitos diretos do sombreamento pela vegetação podem ser quantificados por meio das medições de temperatura de superfície de materiais expostos e protegidos pelas copas das árvores, (figura 1)

Como pode ser visto na figura e como afirma Heisler (1986), as árvores influenciam diretamente o fluxo de calor da radiação térmica ao bloquear a radiação solar, evitando o aumento da temperatura da superfície.

Atualmente, o planejamento urbano não prioriza as áreas verdes, principalmente devido ao fato de o interesse econômico se sobrepôr às necessidades ambientais da cidade. De acordo com Duarte (2000), o traçado urbano coloca em primeiro plano as edificações, deixando, desta forma, as áreas verdes restritas a

locais com dimensões reduzidas e formas irregulares, nas ‘sobras’ dos espaços construídos, tendo como consequência o resultado de que nem sempre estejam de acordo com as necessidades de lazer e conforto térmico da população.

Mascaró (1996), afirma que o uso da vegetação é um recurso eficiente contra o calor, pois, além de oferecer sombreamento, permite a passagem da brisa local e absorve parte da radiação de onda longa sobre suas folhas refrescadas pela evaporação. Os parques urbanos produzem diferença de temperatura local, fator diretamente relacionado com o tamanho do mesmo.

Ainda segundo Mascaró (1996), a radiação que a planta absorve é parte transformada em calor físico e parte em energia química. O albedo da superfície foliar chega a cerca de 30% da superfície total. Apenas 20% do fluxo incidente sobre a cobertura vegetal atinge o solo e cerca de 46% da radiação transmitida sobre a vegetação é difusa.

Esta influência da vegetação nos microclimas do ambiente urbano dependerá dos aspectos de cada espécie, pois cada uma apresentará características diferentes de obstrução (bloqueio de radiação) e a filtragem (interceptação parcial da radiação).

Para uma cidade como Cuiabá, local de estudo desta pesquisa, as altas temperaturas registradas podem ser amenizadas pontualmente, constituindo um dos principais benefícios que a vegetação urbana pode promover para a cidade.

2.1.1.6 *Rugosidade da Superfície*

A rugosidade (Z_g) é um parâmetro que expressa a morfologia geométrica da superfície, cujo conceito significa a medida da rugosidade aerodinâmica da superfície, relacionada, à altura dos elementos e à forma e distribuição da densidade destes (OKE, 1996).

Em áreas urbanas, os elementos de rugosidade são principalmente suas edificações, o que torna a cidade a mais rugosa das superfícies. Em face da dificuldade de sua medição para problemas práticos relacionados ao meio ambiente urbano, sugerem-se os seguintes valores típicos para rugosidade em terrenos urbanizados, de acordo com Oke (1996), (Tabela 3).

Tabela 3 – Valores típicos da rugosidade z_g para terrenos urbanizados

TERRENO	Z_g (m)
Povoados esparsos (fazendas, vilas, árvores)	0,2 - 0,6
Suburbano, baixa densidade, residências e jardins	0,4 - 1,2
Suburbano, alta densidade	0,8 - 1,8
Urbano, alta densidade, fileira de edificações e blocos <5 pavimentos	1,5 - 2,5
Urbano, alta densidade urbana, blocos de multiandares	2,5 - 10

Fonte: Oke (1996).

2.1.1.7 *Densidade Construída*

A maioria dos estudos que relacionam microclima urbano mostra que, o centro da Ilha de calor Urbana (ICU) de uma cidade está frequentemente localizado sobre a área central das cidades, fato este que pode ser explicado pela grande concentração de edifícios, redução da ventilação e pouca arborização.

Duarte & Serra (2003) afirmam que diferentes densidades construídas na cidade afetam os microclimas, e pelo seu efeito cumulativo, determinam a modificação do clima regional pela urbanização, podendo, inclusive, substituir o fator “população” pela “densidade construída” para se estudar os fenômenos climáticos urbanos. Essa substituição deve-se ao fato de que, segundo os autores, a densidade construída possui maior relação causal com o aquecimento urbano.

As edificações funcionam como um espaço de armazenamento de radiação de ondas curtas, aumentando a energia solar absorvida, devido às múltiplas reflexões sofridas pelos raios solares, ao encontrarem as superfícies das edificações. Estas edificações também constituem um obstáculo ao resfriamento urbano, uma vez que dificultam a perda de radiação de ondas longas para o espaço, (LOMBARDO, 1985).

A perda de radiação de ondas longas das superfícies é maior, quanto maior for a área de céu visível para propiciar a troca de calor entre a superfície e o espaço. Deste modo, quanto mais compacta a área de edificações, mais difícil seu resfriamento.

O ambiente urbano, portanto, configura-se pelo resultado da interação humana sobre o espaço natural, e por definição, está inserido na categoria de espaço adaptado. Mas, torna-se claro que as alterações no ambiente nem sempre atendem

aos requisitos de um “habitat” congruente às necessidades biofísicas do ser humano. Desta forma, o clima de um lugar pode ser considerado como a integração de uma série de elementos que se verificam em escalas diferentes, abrangendo desde a macro até a microescala.

Como o céu apresenta, normalmente, temperaturas mais baixas do que a superfície terrestre, funciona como um elemento primordial no balanço de energia, pois recebe as radiações de ondas longas emitidas pelo solo terrestre, que conseqüentemente perde calor, diminuindo a sua temperatura. Por isso a capacidade de resfriamento das superfícies urbanas está relacionada à obstrução do seu horizonte, evidenciando, mais uma vez, a importância da forma geométrica de uma superfície e de um conjunto de superfícies.

No ambiente urbano ocorre uma relação geométrica entre as superfícies, o qual influi na troca de calor por radiação entre elas e na troca de calor dessas com o céu. Essa relação é um parâmetro adimensional chamado de “fator de visão, fator de configuração ou fator angular”.

Quando as condições morfológicas observadas, a partir de um determinado ponto da superfície, causam obstrução do céu, a troca de calor ocorre entre as superfícies, acarretando um acúmulo de calor no entorno urbano. Por outro lado, quanto maior a capacidade de visão de uma superfície para o céu, maior a sua capacidade de resfriamento.

Trata-se de um fator que indica uma relação geométrica entre a terra e o céu e que representa uma estimativa da área visível do céu. Assim, a área de céu toma uma configuração resultante de limites impostos pelas edificações, associada a sua própria forma, aparentemente arredondada para os olhos do observador na Terra. Na inclusão desta forma arredondada aparente do céu como elemento da unidade geométrica, sua representação é tida como uma superfície hemisférica imaginária.

Em termos geométricos, qualquer edificação, elemento ou equipamento urbano pertencente ao plano do observador representa uma obstrução à abóbada celeste. A sombra dessa edificação na abóbada celeste é a fração de céu por ela obstruída para o observador (ou ainda, representa a parte obstruída do fluxo de radiação, que deixa o observador, em direção ao céu). Seu valor numérico é sempre menor que a unidade, pois dificilmente se encontram regiões urbanas, que não

apresentem nenhuma obstrução do horizonte (situação para a qual seu valor seria a unidade).

2.2 ESTRATÉGIAS PARA MITIGAÇÃO DE ILHAS DE CALOR URBANAS

Conforme visto na seção anterior, as diversas interações que ocorrem no ambiente do espaço urbano acabam por modificar as características microclimáticas de um determinado local. Como principal consequência destas interações, é observada a ocorrência do fenômeno de ilha de calor urbana (ICU), que pode ser definido como áreas no espaço urbano com temperaturas mais elevadas que nas regiões vizinhas menos urbanizadas. Para seu estudo, portanto, torna-se importante uma visão mais abrangente do problema, de forma a considerar as diversas variáveis envolvidas no fenômeno.

Apesar de seus estudos terem se intensificado somente nas últimas décadas, em parte devido à atenção internacional dispensada à crise do petróleo de 1973 e suas implicações, o início da investigação do fenômeno de ilha de calor remete ao ano de 1833, quando da publicação do estudo pioneiro de Luke Howard, "*The Climate of London*".

Estudos relacionados à formação das ilhas de calor vêm tomando corpo nas diversas áreas de pesquisa que relacionam o ser humano ao clima, com a crescente preocupação relacionada a fenômenos de caráter ambiental e sustentabilidade.

A formação de ilhas de calor podem ter reflexos negativos para cidades, principalmente para as de clima tropical com altas temperaturas registradas ao longo de todo o ano, como o caso de Cuiabá. As ICUs podem resultar em desconforto térmico para os habitantes e consequente aumento do consumo de energia para alcançar estas condições de conforto nestes espaços habitados. O aumento no consumo de energia se deve à necessidade de utilização de equipamentos condicionares de ar, o que acarreta em impactos financeiros e ambientais elevados, que, por sua vez, comprometem a sustentabilidade destes espaços.

De acordo com Gartland (2010), dentre as estratégias mais difundidas atualmente para mitigação dos efeitos negativos das ilhas de calor, podem-se citar o uso de materiais frescos (para cobertura e grandes áreas de estacionamento) e vegetação (incrementando a densidade e a extensão deste componente em no espaço considerado). Serão estas estratégias que serão avaliadas no presente estudo, sendo suas características vistas em detalhes a seguir.

2.2.1 Estratégias Utilizando Materiais Frescos

Os materiais usados no envelope dos edifícios e nas estruturas urbanas têm um importante papel no balanço térmico urbano. Eles absorvem radiação solar e infravermelha e dissipam parte do calor acumulado para a atmosfera por meio de processos convectivos e radiativos, aumentando a temperatura ambiente.

Além disso, de acordo com Santamouris (2011), as características dos materiais usados são determinantes no consumo de energia e condições de conforto tanto em edificações quanto em espaços abertos. Desta forma, muitos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de entender as características térmicas destes materiais típicos do meio urbano e seu impacto no clima das cidades.

Materiais frescos (*cool materials*) têm seu comportamento diferenciado em relação aos materiais urbanos principalmente devido à duas propriedades: alta refletância solar (albedo) e alta emissividade térmica (acima de 85%). Logo, a temperatura resultante em ambientes que adotam estes materiais, é significativamente menor que em ambientes compostos por materiais tipicamente urbanos. De acordo com Santamouris (2011), os materiais frescos possuem as seguintes características:

(a) Alta refletância solar (albedo). Refletância solar é a medida da capacidade da superfície de um material de refletir a radiação solar. Esta medida expressa a refletância total de uma superfície, considerando todo o espectro solar, incluindo refletância difusa e refletida e é medida em escala de 0 a 1 (ou 100%).

(b) Alta emissividade (ϵ). A emissividade (ou emitância infravermelha) é a medida da habilidade de uma superfície de emitir (liberar) a energia térmica absorvida. Ela expressa o quanto uma superfície emite energia em comparação com um corpo negro à mesma temperatura. A emissividade é medida em escala de 0 a 1.

2.2.1.1 Estratégia Telhado Fresco (Cool Roof)

De acordo com Gartland (2010), as coberturas cobrem cerca de 20% das áreas urbanas e suburbanas, e são responsáveis por um grande parcela do aquecimento das edificações.

Os valores de refletância solar (albedo), variam de acordo com o material de composição desta cobertura e com a idade deste material. Como exemplo, pode-se citar a telha cerâmica, que tem o albedo variando de 0,10 a 0,35, (OKE, 1978).

Revestimentos frescos para coberturas são tratamentos de superfícies que são preferencialmente aplicados em coberturas com pequena inclinação e bom estado de conservação. Os revestimentos têm a consistência de uma tinta grossa (figura 2), e contém aditivos que os tornam superiores às tintas em termos de aderência e durabilidade.



Figura 2 - Aplicação de material fresco em cobertura

Fonte: Gartland (2010).

Materiais frescos aplicados ao telhado de edifícios para reduzir a demanda de energia para resfriamento, sendo que seus benefícios relativos desta redução dependem da construção do edifício, condições climáticas externas e padrões de uso.

Existem dois tipos principais de revestimentos frescos - cimentícios e elastoméricos. Revestimentos cimentícios contém partículas de cimento, enquanto revestimentos elastoméricos contém polímeros que os tornam menos quebradiços e aumentam sua aderência. Polímeros de uretano, silicone ou acrílico podem ser utilizados em revestimentos elastoméricos.

Ambos os tipos de revestimento geralmente têm coloração branca reluzente, e conseqüentemente apresentam altos valores de refletância solar (normalmente acima de 70% quando novos) e emissividade térmica (acima de 80%).

Em estudo recente, Kolokotroni et al. (2013) examinaram o impacto da aplicação de pintura reflexiva em um telhado plano em um edifício de escritórios naturalmente ventilado na cidade de Londres, Reino Unido, onde o clima é temperado, com grande demanda de aquecimento pelos edifícios. Foram monitoradas as condições internas de conforto antes e depois da aplicação da pintura e, posteriormente, simuladas por meio do software TRNSYS. Como resultado, o conforto térmico pode ser melhorado em média 2,5 °C, para uma mudança de 0,6 no valor do albedo (0,1 antes e 0,7 depois da aplicação de pintura reflexiva).

Já Romeo & Zinzi (2013) relataram os resultados de uma aplicação em grande escala em um edifício de laboratórios/escritórios pertencente a um campus escolar em Trapano, costa Oeste da Sicília. O monitoramento foi feito antes e depois da aplicação da pintura reflexiva, caracterizada por alta refletância solar e emissividade térmica e os dados do monitoramento foram usados para calibrar os dados de entrada de um modelo do edifício em uma ferramenta dinâmica de simulação. Como resultado, o conforto térmico pode ser melhorado em média 2,3 °C, para uma mudança de 0,57 no valor do albedo (0,25 antes e 0,82 depois da aplicação de pintura reflexiva).

Kolokotsa et al. (2012), relatou a aplicação da tecnologia de telhados fresco em um laboratório de construção localizado em Iraklion, Creta, Grécia. O edifício foi monitorado em relação ao seu desempenho energético e ambiente interno antes e depois da implementação da tecnologia de telhado fresco (valor de albedo 0,89). Por meio de simulações, os resultados revelaram uma economia de energia anual da ordem de 19,8%, e de 27% considerando somente a estação do verão.

2.2.1.2 Estratégia Pavimento Fresco

De acordo com Gartland (2010), os pavimentos cobrem entre 25 e 50% das cidades e são geralmente o aspecto mais dominante em nossos ambientes urbanos. As características térmicas dos pavimentos, como reforça a autora, exercem muita influência sobre a formação das ilhas de calor.

Semelhante às coberturas frescas, os pavimentos frescos também possuem como principal agente de mudança os valores de albedo (alta reflexividade solar) e emissividade térmica.

Shahidan et al. (2012), avaliou o efeito resfriativo de árvores em combinação com a modificação dos materiais de cobertura do solo em mitigar as ilhas de calor urbanas, com o objetivo de melhorar o desempenho térmico de edificações em climas tropicais. Como resultado, os autores afirmam que, para mitigar o efeito ilha de calor, altos valores de densidade de copa (IAF 9,7) juntamente com materiais frescos (albedo 0,8) foram responsáveis pela maior redução na temperatura urbana da ordem de 2,7°C, quando comparado com a situação atual. Além disso, ambas as modificações resultaram em um potencial de economia da demanda de resfriamento para os edifícios de até 29%.

Synnefa et al. (2006) investigou o efeito de revestimentos reflexivos em diminuir as temperaturas superficiais de edifícios e do ambiente urbano. Foram avaliados 14 tipos de materiais reflexivos, usados tanto em revestimento de edifícios como em elementos urbanos tais como calçadas e estacionamentos. Foi demonstrado que, o uso destes materiais reflexivos foi responsável por uma redução na temperatura ambiente, em condições de verão, da ordem de 4°C durante o dia e 2°C durante o período noturno.

2.2.2 Estratégia Utilizando Vegetação

De acordo com Jusuf (2009), existem duas formas de incrementar o efeito da vegetação nos espaços de convivência: por meio do aumento da densidade de vegetação, neste caso aumentando valores da variáveis IAF (Índice de Área Foliar) e, aumentando a área de vegetação. Estas medidas configuram a base das estratégias apresentadas a seguir:

2.2.2.1 Estratégia Telhado Verde (Green Roof)

A estratégia de adoção de telhado verde baseia-se no aumento da área de superfícies vegetadas

Para o clima de Cuiabá, este tema já foi abordado de maneira extensa e detalhada por Rosseti (2013), que avaliou os efeitos de telhados vegetados em ilha de calor urbana, por meio de simulações com o software ENVI-met. A análise abrangeu os dois períodos climáticos típicos da região, verificando o desempenho de 3 cenários com diferentes porcentagens de incorporação de telhados vegetados (10%,

50% e 100%). São apresentados resultados expressivos, com redução no valor de temperatura do ar de até 1,56°C para o cenário de 100% de cobertura vegetada.

Kolokotsa et al. (2013) estudaram o assunto por meio de técnicas de simulação, avaliando o efeito de diferentes tipos de vegetação e taxas de irrigação. Como resultado, os autores afirmam que telhados vegetados podem contribuir consideravelmente para melhoria do conforto dos espaços ao mesmo tempo em que diminui a demanda por energia destes espaços.

Peng & Jim (2013) investigaram o impacto da instalação de telhados vegetados em cinco conjuntos habitacionais em Hong Kong, que apresenta clima sub-tropical. Fazendo uso do software ENVI-met, foram estudados dois cenários principais, denominados telhados verdes extensivos e intensivos. O resultado demonstrou que os efeitos do telhado vegetado não se restringem à área de cobertura, registrando uma redução na temperatura do ar ao nível de pedestres da ordem de 0,4-0,7°C, para telhado verde extensivo e 0,5-1,7°C, para telhado verde intensivo.

2.2.2.2 Estratégia Incremento de Áreas Vegetadas

Estudos adotando o incremento da intensidade de áreas vegetadas como estratégia de mitigação de ilhas de calor, indicam que seus efeitos se devem principalmente aos efeitos de sombreamento das superfícies e evapotranspiração realizada pelas plantas.

Shinzato (2009) desenvolveu um experimento que avaliava os efeitos da vegetação nas condições microclimáticas urbanas, estudando diferentes formas de distribuição das áreas verdes na cidade. Por meio de simulação no software ENVI-met, os resultados mostraram que em relação à intensidade do efeito da vegetação, a diferença média entre as temperaturas do ar nas áreas verdes arborizadas e as ruas adjacentes chega a 1,5°C. E quando avaliado o sombreamento pelas árvores de copa densa (IAF=10), foram registradas diferenças médias de 23°C nas temperaturas superficiais do solo, embaixo da copa.

Maciel (2011) também abordou o efeito da vegetação no microclima de uma porção do campus da UFMT. Com base nos resultados apresentados, a autora observou a existência de uma tendência aos pontos localizados na área verde ou com proximidade a esta de apresentarem valores de temperaturas mais baixos e valores de

umidade relativa do ar mais altos, corroborando estudos consagrados da área de climatologia urbana.

Wong et al. (2007) estudaram o efeito da quantidade de vegetação na temperatura ambiente resultante. Para o experimento foram usadas imagens de satélite, medições de campo e simulações com o software ENVI-met. Por meio da avaliação de cenários hipotéticos, foi registrada uma diferença de até 4°C na redução da temperatura do ar quando incrementada a quantidade de vegetação. Os resultados apresentados pelo grupo mostraram que áreas vegetadas são eficientes em manter a temperatura ambiente baixa, registrando valores inferiores de temperatura em edifícios próximos à áreas vegetadas em comparação aos edifícios que se encontravam afastados destas regiões.

2.3 MODELO ENVI-MET

2.3.1 Estrutura do modelo

O software ENVI-met foi desenvolvido pelo Professor Michael Bruse da Universidade de Bochum, Alemanha. Trata-se de um modelo tridimensional que simula o microclima urbano, por meio das interações entre superfície-vegetação-atmosfera. De acordo com Bruse (2008), o cálculo do balanço de energia é feito por meio das variáveis radiação, reflexão e sombreamento de edifícios e vegetação, fluxo do ar, temperatura, umidade, turbulência local e sua taxa de dissipação e as trocas de água e calor dentro do solo.

É observado o uso crescente deste modelo tanto em âmbito nacional quanto internacional. Para o clima de Cuiabá, foi realizado um estudo pioneiro por Rosseti (2013), avaliando o efeito do uso de telhados vegetados em ilhas de calor.

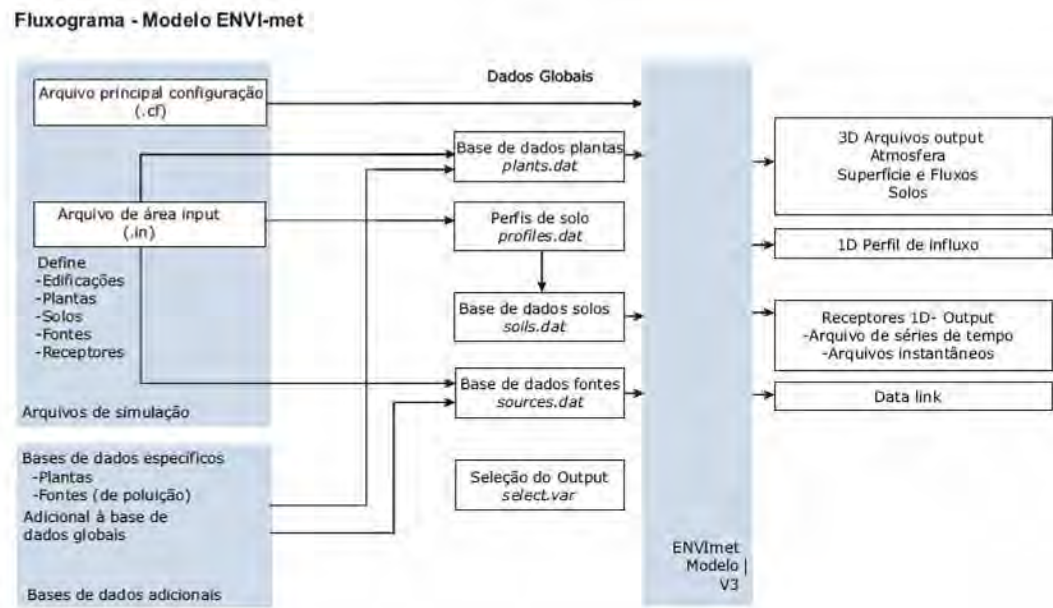


Figura 3 - Fluxograma do modelo ENVI-met

Fonte: Adaptado de Carfan (2011).

Segundo Bruse (2008), o modelo numérico estruturas complexas urbanas com resoluções (grids) entre 0,5 m a 10m, de acordo com a posição do sol, geometria urbana, vegetação, solo e materiais de construção. Na figura 3 é possível observar o fluxograma de trabalho do software ENVI-met.

O ENVI-met oferece diversas opções de saída de dados. Para o presente trabalho, será avaliado o comportamento das variáveis temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e umidade do ar (%), antes e depois da aplicação das estratégias selecionadas.

Para realização das análises, o software ENVI-met disponibiliza três aplicativos:

a) *Area Input File Editor*: Este aplicativo permite a criação da geometria do modelo a ser analisado, com a especificação de detalhes do ambiente como por exemplo, posição e altura dos edifícios, posição e tipos de vegetação, distribuição dos materiais de superfície e tipos de solo, posição de fontes de poluentes, posição de pontos específicos para análise (receptores) e link para os bancos de dados.

b) *Configuration File Editor*: Determina os dados básicos de entrada para a simulação de um determinado caso, a saber: Dia e horário de início da simulação, quantas horas serão simuladas, qual o intervalo de tempo que o software deve salvar

os dados, velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s), direção do vento, rugosidade da superfície, temperatura inicial da atmosfera (K), umidade específica a 2500m de altura (g de H₂O/Kg ar) e umidade relativa a 2m de altura (%).

c) *ENVI-met interface*: O software de simulação propriamente dito, que permite conferir e editar as configurações, selecionar as variáveis desejadas para obtenção dos dados de saída e finalmente, ativar a simulação.

A visualização dos dados pode ser feita por meio do programa Leonardo (cortes e mapas esquemáticos do comportamento horário das variáveis na área de estudo), além de softwares de análises de dados como o Microsoft Excel.

2.3.2 Limitações do modelo

Desde seu lançamento em 1998, o modelo desenvolvido por Michael Bruse já sofreu diversas modificações visando melhorias e aperfeiçoamentos. As alterações feitas na versão vigente (Beta V3.1) podem ser vistas no Quadro 1:

Quadro 1 - Modificações na versão Beta V3.1 do software ENVI-met

Beta V3.1 Novembro/2008	Removeu pequenos problemas no manejo das pastas; Acrescentou mais localidades para simulação;
Beta II V3.1 Março/2009	Removeu problemas no cálculo de extinção da radiação direta das plantas;
Beta III V3.1 Dezembro/2009	Melhorou o módulo de fluxo, agora mais estável; Requer a definição de arquivos de projetos para armazenar os modelos;
Beta IV V3.1 Janeiro/2010	Removeu um problema no cálculo do sombreamento que ocorria na vegetação em telhados verdes;
Beta V V3.1 Outubro/2010	Removeu problemas de incompatibilidade com o Windows 7; Removeu problemas no Xtract; Adicionou o HTML-Help;

Contudo, mesmo com diversos ajustes, o software ainda apresenta algumas limitações, apontadas por Johansson (2006):

- O modelo não considera massa térmica na fachada dos edifícios, sendo a capacidade térmica apenas presente no solo. Este fato subestima o efeito do fluxo da radiação de onda longa, uma vez que não existe o acúmulo de calor pelas fachadas das construções;
- Outro ponto é a variável temperatura interna dos edifícios, que se mantém constante durante todo o período de simulação. Esta limitação do programa afeta diretamente os resultados da temperatura de superfície das fachadas e indiretamente a temperatura média radiante e temperatura do ar.
- Os desenhos das áreas urbanas no ENVI-met devem seguir o formato da grade ortogonal. Assim o formato das quadras e ruas precisa ser adaptado, sem considerar as curvas e linhas com inclinações diferenciadas.

Além destas limitações apontadas por Johansson (2006), durante o desenvolvimento da presente pesquisa foram constatadas outras limitações, como por exemplo, a incapacidade de determinar condições de relevo da área de estudo e o valor de velocidade do vento, que é determinado como um valor constante, não reproduzindo a real dinâmica desta variável.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item serão apresentados a metodologia e procedimentos adotados visando analisar o efeito de cada estratégia sobre o comportamento das variáveis temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa do ar (%), por meio do monitoramento meteorológico e da simulação numérica em modelo computacional microclimático, usando um caso de estudo na cidade de Cuiabá-MT.

A metodologia adotada (figura 4) abrange fases que podem ser divididas em: a) fase preparatória, onde são descritas as etapas necessárias para aquisição da dados e informações para preparação dos arquivos a serem simulados, que implicou na definição e caracterização da área de estudo, e medição de variáveis microclimáticas e variáveis espaciais; e, b) fase da simulação numérica, que engloba a composição, dentro do software ENVI-met, dos arquivos de área (situação atual e cenários hipotéticos) e de configuração das condições (para estação quente-seca e estação quente-úmida).

Também serão descritos neste item os métodos estatísticos utilizados para realizar a validação e calibração dos dados, etapas a serem detalhadas na análise dos resultados.

A metodologia foi desenvolvida de forma a permitir a simulação do ambiente termohigrométrico para a situação real da área de estudo e para quatro cenários visando explorar as implicações nas variáveis meteorológicas em função de alterações provocadas por diferentes estratégias de mitigação de ilhas de calor.

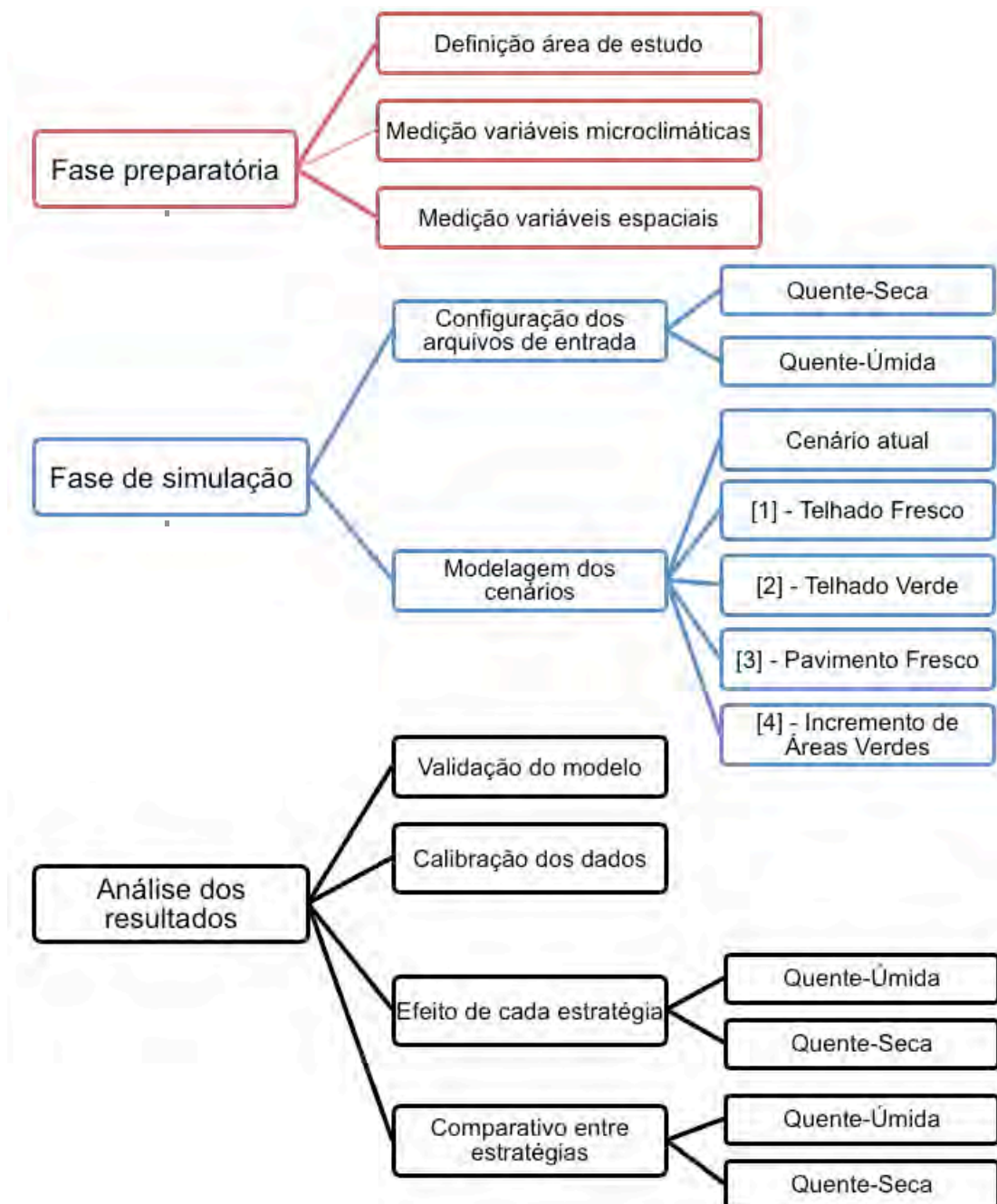


Figura 4 – Fluxograma das etapas realizadas para o presente estudo

3.1 FASE PREPARATÓRIA

Neste item serão apresentados os procedimentos que compõem a fase preparatória da pesquisa. Serão abordadas a definição e caracterização da área do estudo de caso, a instrumentação utilizada na pesquisa e o monitoramento de dados meteorológicos na área de estudo.

3.1.1 Definição e caracterização da área de estudo

A cidade de Cuiabá, capital do estado de Mato Grosso (figura 5a), pertence à região Centro-Oeste do Brasil, localizada nas coordenadas geográficas 15°35'56" de latitude Sul e 56°06'01" de longitude Oeste.

De acordo com Cuiabá (2008), o município possui uma área de 3.224,68 km², sendo dividida em 254,57km² (7,89%) de área urbana e 2.970,11 km² (92,1%) de área rural e localiza-se a uma altitude média de 165 metros acima do nível do mar, na província geomorfológica denominada Depressão Cuiabana. Seus limites fazem divisa com os seguintes municípios: Acorizal, Rosário Oeste, Chapada dos Guimarães, Santo Antônio de Leverger e Várzea Grande (figura 5b).

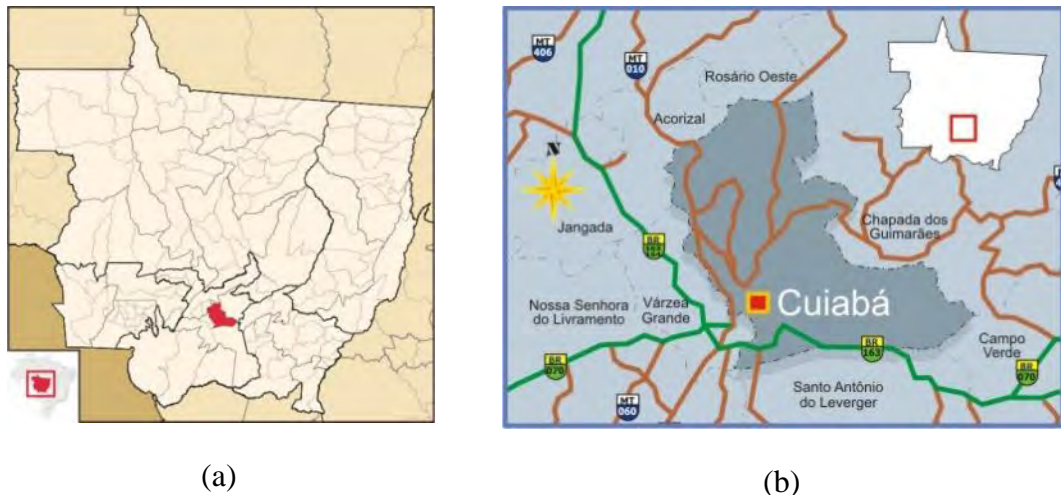


Figura 5 – (a) Localização de Cuiabá no mapa do estado de Mato Grosso e
(b) Municípios limítrofes

Fonte: <http://www.mtseusmunicipios.com.br/>

O IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) é 0,821 e, de acordo com o último Censo demográfico (IBGE, 2010), sua população é de 551.350 habitantes, sendo que 541.002 (98,12%) residem na área urbana e 10.348 (1,87%) residem na área rural.

Cuiabá é conhecida como uma das capitais mais quentes do Brasil. De acordo com a classificação de Köppen, seu clima é do tipo Aw2, isto é, Tropical semi-úmido, caracterizado por altas temperaturas ao longo do ano, alternando entre duas estações bem definidas, uma seca (outono-inverno) e uma chuvosa (primavera-verão).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2003), baseado no período de monitoramento de dados coletados de 1961 a 1990, a temperatura média anual máxima em Cuiabá variou de 31°C a 34°C. Já a temperatura mínima média anual, durante o mesmo período, variou de 18 a 21°C. A umidade relativa do ar variou entre 57% (no mês de agosto) e 82% (no mês de fevereiro).

Pode-se observar o gráfico com os valores médios mensais de temperatura do ar (C) e umidade relativa do ar (%) registradas em Cuiabá durante o período de 1961 a 1990, (figura 6). Os meses com valores de temperatura do ar mais baixos (junho, julho e agosto) apresentam também valores de umidade relativa do ar mais baixos, sendo caracterizados como meses de seca. Da mesma forma, observa-se que nos meses de verão registram valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar mais elevados, caracterizando, portanto, a estação úmida.

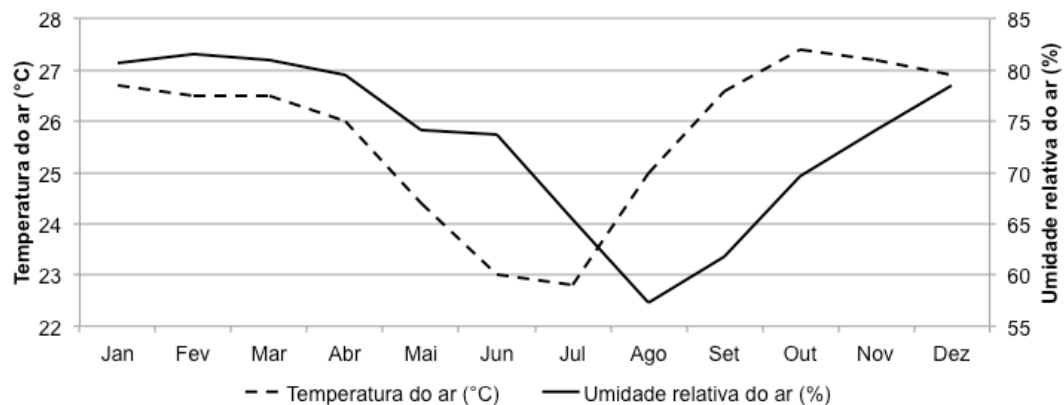


Figura 6 - Valores médios mensais de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%) para Cuiabá no período de 1961 a 1990

Fonte: Adaptado de INMET, disponível em <http://www.inmet.gov.br/>

Segundo Duarte & Serra (2003), em Cuiabá a direção do vento predominante é N (norte) e NO (noroeste) durante grande parte do ano, e S (sul) no período do inverno. Afirmam ainda que o fato de Cuiabá ser uma zona urbana situada em uma depressão geográfica faz com que a frequência e a velocidade média dos ventos seja extremamente baixa, minimizando o efeito das trocas térmicas por convecção e ressaltando ainda mais a influência do espaço construído sobre a temperatura do ar.

3.1.1.1 O Campus da Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT

Ao longo de sua história, o campus da Universidade Federal de Mato Grosso sofreu transformações, passando de 25.396,00 m² de área construída, em 1977, para 83.111,60 m², registrados em 2010, de acordo com Alves (2010). Na figura 7 é possível observar as transformações ocorridas entre o período de 1975 e 2010.



Figura 7 – Modificações no espaço do Campus da UFMT (1975 e 2010).

Fonte: Divulgação - UFMT e Google Earth.

A definição da área a ser simulada no software ENVI-met obedeceu às seguintes condicionantes, a saber: variações topográficas, dimensão da área compatível com as dimensões compatíveis do software e possuir elementos passíveis de aplicação das estratégias a serem estudadas.

Em relação à variação topográfica, de acordo com levantamento realizado por Alves (2010), o campus da UFMT possui cotas variando de 165m a 185m, totalizando uma amplitude de 20m, (figura 8).

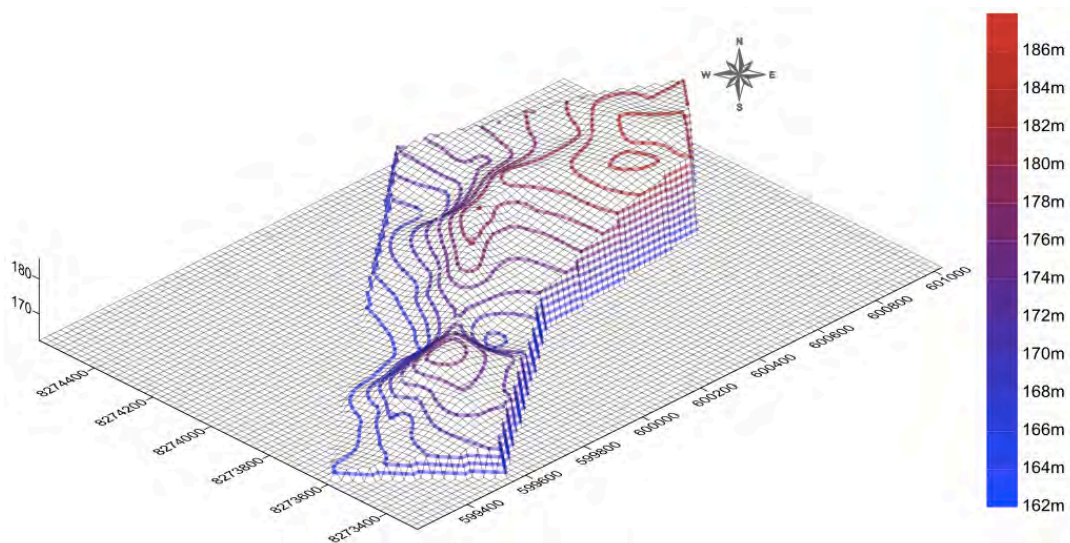


Figura 8 – Relevo da Universidade Federal de Mato Grosso - campus Cuiabá.

Fonte: Alves (2010).

Em relação à dimensão da área a ser simulada, a versão atual do software ENVI-met (v. 3.1 Beta 5) possibilita a composição de uma malha horizontal de até 250x250 grids. Considerando a dimensão dos elementos que compõe a área selecionada, adotou-se a escala de 2,5x2,5m para cada grid, o que permite cobrir uma área de 600mx600m. Valores maiores de grid (3x3m, por exemplo), simplificaria demais o desenho e valores menores de de grid (1x1m, por exemplo) limitaria em muito as dimensões da área total de entrada.

Além da topografia e tamanho do grid, outra condicionante para a definição da área era que tivesse elementos passíveis de aplicação das estratégias estudadas, o que resultou na determinação da área posterior do campus, pois nesta porção encontra-se a maioria das edificações do campus, além de grandes áreas de superfícies pavimentadas e áreas verdes.

Desta forma, considerando as três condicionantes descritas, a área final selecionada para a simulação dos cenários no modelo ENVI-met é a apresentada na figura 9, compreendendo um total de 36ha.

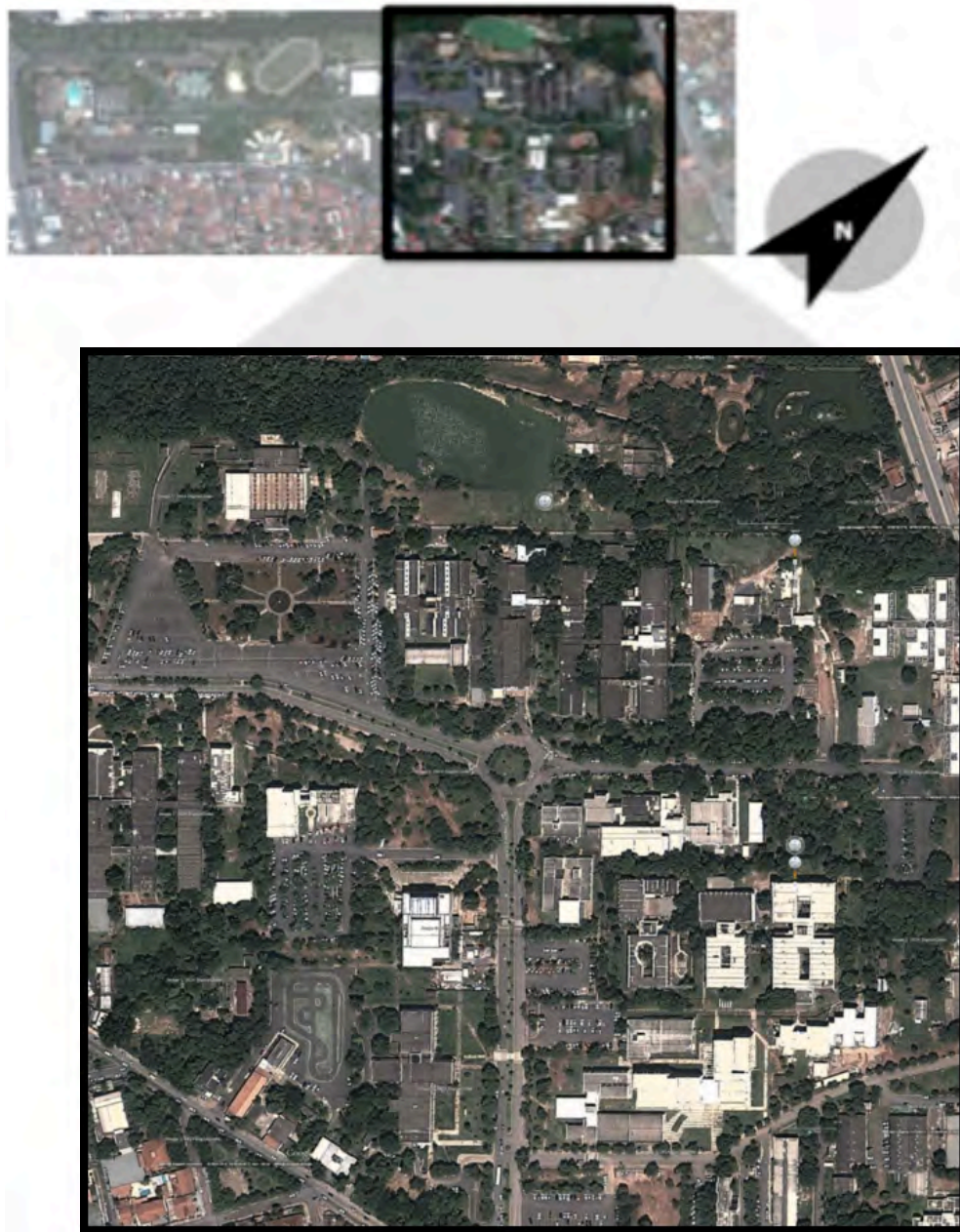


Figura 9 – Área selecionada para simulação no software ENVI-met

Fonte: Adaptado de Google Earth (2014)

3.1.2 Medição das variáveis microclimáticas

Para realizar a configuração dos arquivos de entrada do software ENVI-met e posterior validação dos resultados foi necessária a obtenção de dados microclimáticos, provenientes de duas fontes distintas, descritas a seguir.

3.1.2.1 Protocolo de medições

Para a configuração dos arquivos de entrada do ENVI-Met foram utilizados dados provenientes da estação de referência (83362) - Aeroporto Marechal Rondon, em Várzea Grande, MT, localizado à 6,5km da área de estudo, disponíveis para consulta por meio do site o serviço de informação meteorológica Weather Underground (<http://www.wunderground.com>) e do site da University of Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/uppeair>).

A estação de referência do Aeroporto Marechal Rondon forneceu dados horários direção e velocidade do vento a 10m do solo (m/s), temperatura da atmosfera (K), umidade específica a 2500m (g H₂O/kg ar) e umidade relativa do ar (%) a 2m de altura.

Para a validação dos resultados gerados pelo software foram utilizados dados coletados diretamente na área de estudo, por meio da estação fixa pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, inserida dentro da área de estudo, o campus da Universidade Federal de Mato Grosso, em Cuiabá-MT, (figura 10). A estação fixa do PGFA forneceu dados das variáveis temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), medidos de 5 em 5 minutos.

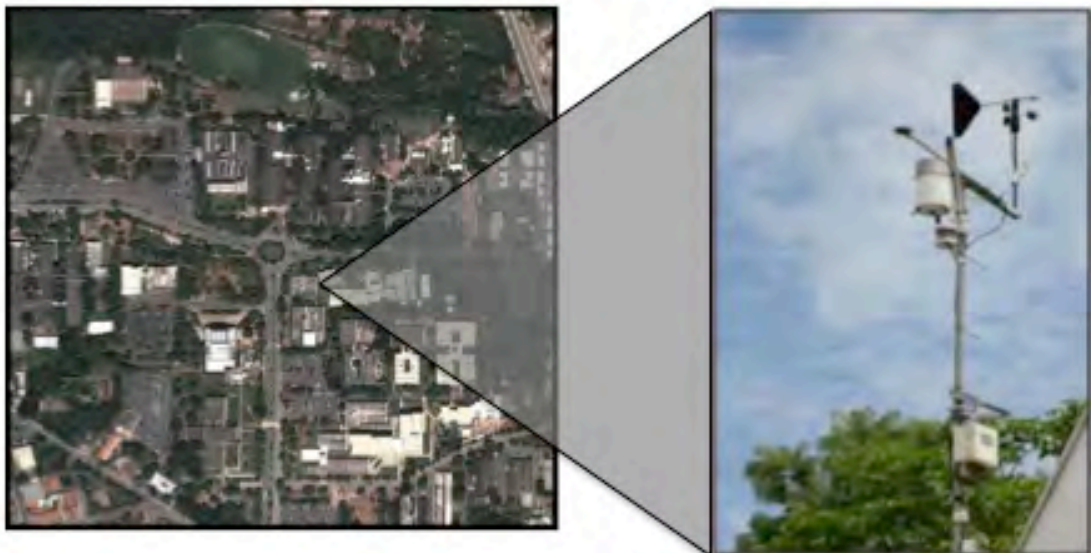


Figura 10 – Localização dentro da área em estudo e estação fixa PGFA

Fonte: Adaptado de Google Earth (2014) e Rosseti (2013).

A determinação do intervalo de tempo a ser estudado considerou as características climáticas de Cuiabá, caracterizando, desta forma, 3 meses durante

cada estação (quente-seca e quente-úmida). O período quente-úmido compreendeu os meses fevereiro, março e abril de 2012, enquanto que o período quente-seco abrangeu os meses julho, agosto e setembro de 2012.

3.1.3 Medição das variáveis espaciais

A seguir serão descritos os métodos utilizados para a caracterização das variáveis espaciais da área em estudo, de forma a possibilitar sua reprodução dentro do modelo ENVI-met.

3.1.3.1 Caracterização Espacial da Área de Estudo

Para a realização das simulações no software ENVI-met é necessário a composição de um arquivo de área que contenha as características da área de estudo. O levantamento destas características para o estudo do campus da UFMT-Cuiabá baseou-se em uma adaptação da metodologia de Maciel (2011), que descreve como quantificar os materiais que compõe a superfície do espaço urbano juntamente com metodologia proposta por Silva (2009) que descreve os passos para inserção destas informações no software.

O levantamento é iniciado a partir de imagens obtidas pelo software GoogleEarth de datas próximas ao período no qual foram realizadas as medições das variáveis micrometeorológicas, (figura 11a). Adicionalmente são identificados detalhes, como por exemplo altura das edificações, por meio de visitas *in loco*.

Em seguida, uma imagem com alta resolução (que permita o reconhecimento de detalhes) é inserida em software CAD (*Computer Aided Design* - Desenho Assistido por computador) em escala apropriada para o estudo.

Desta forma, é desenhada uma grade com a dimensão definida, 2,5mx2,5m neste caso, e são identificadas as características do ambiente, como por exemplo diferentes materiais de cobertura do solo que compõe o espaço, áreas ocupadas por edificações, entre outras. , (figura 11b). A definição dos valores de albedo para as diferentes categorias baseou-se no trabalho de Sailor e Fan (2002).

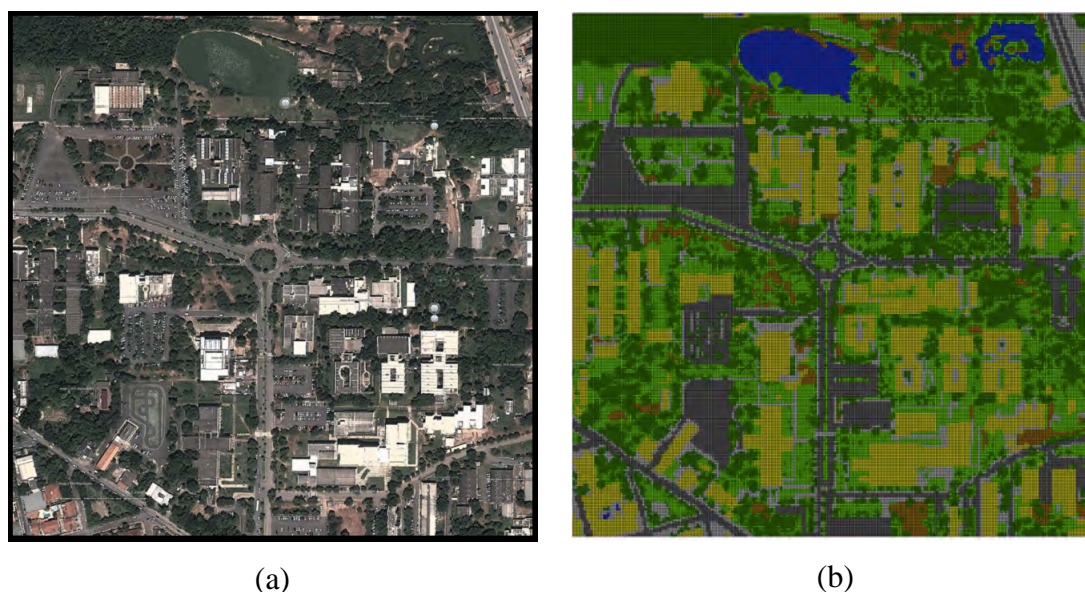


Figura 11 – (a) Imagem da área de estudo e (b) caracterização em software CAD.

Fonte: Google Earth (2014).

Existem outras metodologias que possibilitam a caracterização da área de estudo. A metodologia conforme aqui descrita foi adotada pelo fato de permitir, por meio de cálculos em software CAD, a contabilização da área relativa que cada atributo (edificações, calçadas, asfalto, corpos d'água, vegetação rasteira e árvores) ocupa na superfície total da área de estudo, conforme Tabela 4 e figura 12, a seguir:

Tabela 4 - Contabilização das áreas - Campus UFMT

Categoria	Área Relativa (%)	Área (m²)
Água	2,7%	10.068,75
Solo Exposto	3,7%	13.650,02
Calçada	9,9%	35.645,59
Árvores	17%	61.355,23
Edificação	18,8%	67.731,25
Gramma	22,6%	81.364,77
Asfalto	25%	90.184,385

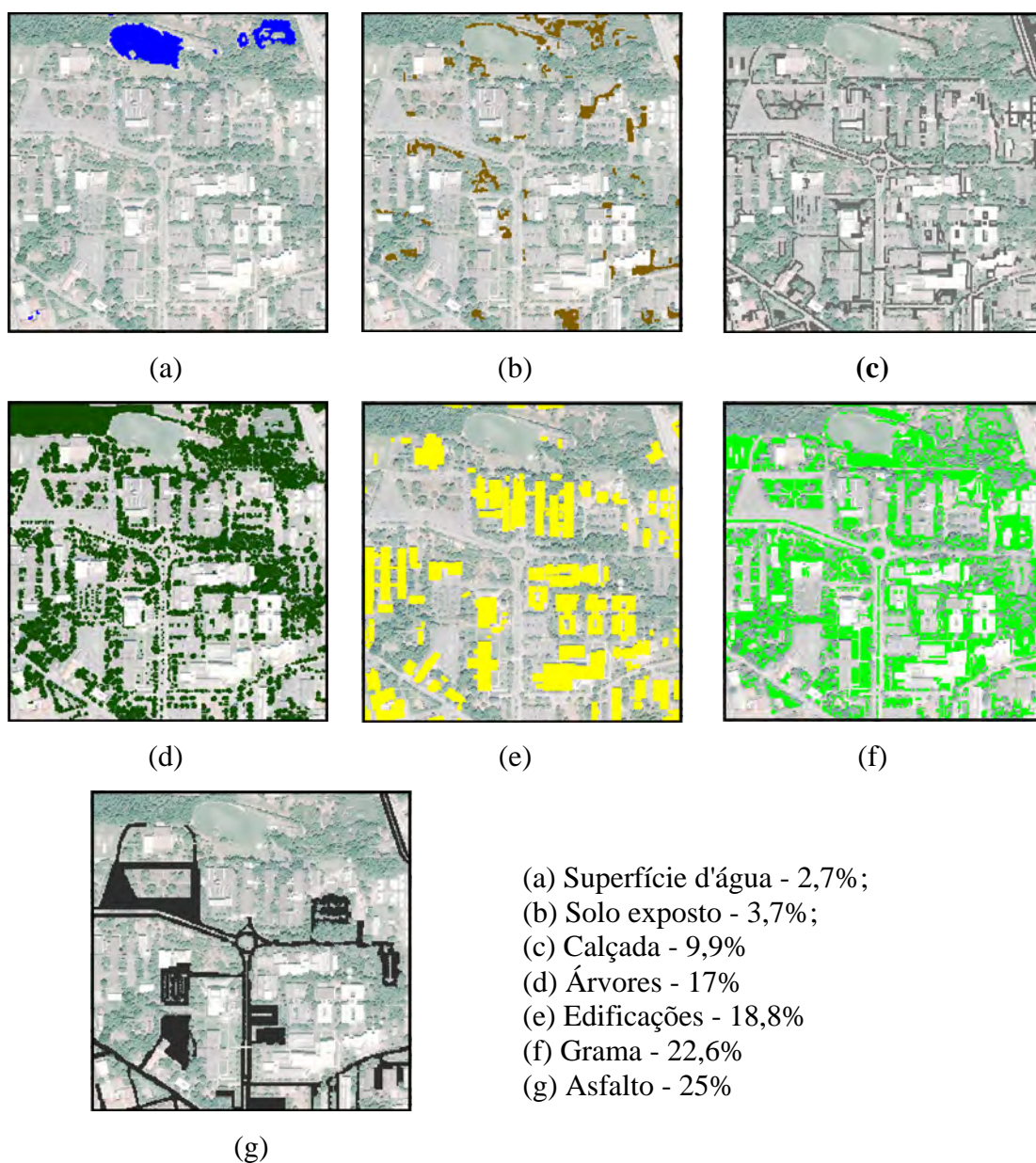


Figura 12 – Mapas de áreas relativas para cada categoria de ocupação do solo

3.1.3.2 Caracterização Arbórea da Área de Estudo

Para a caracterização arbórea da área de estudo foi adotada a metodologia de Watkins & Kolokotroni (2012), que utilizaram o software Scion Image© juntamente com o conceito de *Green Plot Ratio* proposto por Ong (2003).

Devido à extensão da área da estudo, para a caracterização das espécies arbóreas foi considerado o conceito do *Green Plot Ratio* proposto por Ong (2003) e adotado de maneira satisfatória em diversas pesquisas envolvendo o software ENVI-

met (WONG & JUSUF, 2008; EMMANUEL et al. 2007; SHINZATO, 2009; JOHANSSON et al., 2006).

O software Scion Image© é um programa de análise de imagens digitais utilizado em diversas campos de pesquisa, por exemplo a biologia, onde é aplicado com o objetivo de quantificar a área ocupada por microrganismos, bem como análise de coloração de folhas, (MURAKAMI et al. 2005).

Para a análise, primeiro é necessário uma imagem de alta resolução da área de estudo em formato Bitmap (*.bmp), editada em software CAD para mostrar somente a área de vegetação, (figura 13a).



Figura 13 – (a) Fragmento da área de estudo e (b) análise da imagem editada por meio do software Scion Image©

O software Scion Image© trabalha com a interpretação dos tons de cinza da imagem. Os valores identificados são classificados em três categorias de intensidades definidas por Jusuf (2009), a saber *Sparse Greenery*, *Less Dense Greenery* e *Dense Greenery*, ou seja, Vegetação Esparsa, Vegetação Pouco Densa e Vegetação Densa, com valores de densidade de área foliar de 2, 5 e 9 m^2/m^3 , respectivamente (figura 13b).

Em seguida, a imagem é novamente ajustada em escala apropriada, com o auxílio de software CAD, onde é feita a quantificação obedecendo à dimensão determinada para malha do software ENVI-met, neste caso 2,5x2,5m.

3.2 FASE DE SIMULAÇÃO

Os experimentos de simulação realizados para a área de estudo selecionada tiveram o objetivo de analisar o efeito que quatro estratégias de mitigação de ilhas de calor tem sobre variáveis micrometeorológicas. Dessa forma, a área de estudo de foi modelada no ENVI-Met e os dados meteorológicos monitorados em campo (por meio da estação fixa PGFA) foram comparados com as saídas do modelo.

3.2.1 Configuração dos arquivos de entrada

O arquivo de configuração do software ENVI-met define as condições de inicialização da atmosfera do período a ser estudado, e necessita das seguintes informações:

- Dia de início da simulação, em formato DD.MM.AAAA;
- Horário de início da simulação, em formato HH:MM:SS;
- Período total de simulação, em horas;
- Frequência de registro de dados do estado do modelo, em minutos;
- Velocidade do vento a 10m de altura, em m/s;
- Direção do vento, em graus em relação ao Norte;
- Rugosidade da superfície no ponto de referência;
- Temperatura inicial da atmosfera, em K;
- Umidade específica a 2500m, em g H₂O/kg ar;
- Umidade relativa do ar a 2m de altura, em %.

O dia e a hora da simulação são definidos de acordo com a estação do ano que se deseja simular. É recomendado que as simulações tenham início no período noturno, minimizando a possibilidade de erros de convergência devido à existência de radiação de onda curta nas primeiras horas da simulação, (FRANCISCO, 2012). O período total de simulação deve compreender no mínimo 48h, das quais são

descartadas as primeiras 24h, por ser o intervalo em que o modelo ainda está estabilizando as condições iniciais. Para a presente pesquisa foi definido o horário de início sendo 20h e o período de simulação de 48h.

O valor da rugosidade da superfície no ponto de referência foi definido de acordo com Oke (1996).

Os valores de temperatura do ar (K), umidade relativa do ar (%), velocidade do vento (m/s) e direção do vento utilizados para a simulação são oriundos da estação de referência do Aeroporto Marechal Rondon. Para cada variável foi calculado o valor médio referente ao período estudado: quente-úmido (fevereiro, março e abril) e quente-seco (julho, agosto e setembro). Os valores de velocidade e direção do vento foram calculados por meio de média dos valores horários para cada período de três meses. Os valores de temperatura do ar (K), umidade relativa do ar 2m (%) e umidade específica do ar a 2500m foram calculados por meio de média dos valores destas variáveis no horário de início da simulação, ou seja, às 20h.

Para a presente pesquisa, foram consideradas as duas estações climáticas características de Cuiabá, quente-úmida e quente-seca. Os dados de entrada do modelo podem ser observados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Dados de entrada do modelo - Quente-úmido

Basic Input Data - Estação Úmida	
Dia do início da simulação (DD.MM.AAAA)	=25.03.2012
Horário do início da simulação (HH:MM:SS)	=20:00:00
Total de horas de simulação	=48.00
Salvar o modelo a cada ? min	=60
Vel. Vento a 10 m da superfície [m/s]	=2.03
Direção do vento (0:N..90:E.180:S..270:W)	=330
Comprimento de rugosidade	=0.1
Temperatura do ar inicial [K]	=310.15
Umidade específica em 2500 m [g /kg]	=9.69
Umidade relativa em 2m [%]	=77.2

Tabela 6 - Dados de entrada do modelo - Quente-Seco

Basic Input Data - Estação Seca	
Dia do início da simulação (DD.MM.AAAA)	=24.08.2012
Horário do início da simulação (HH:MM:SS)	=20:00:00
Total de horas de simulação	=48.00
Salvar o modelo a cada ? min	=60
Vel. Vento a 10 m da superfície [m/s]	=2.06
Direção do vento (0:N..90:E.180:S..270:W)	=170
Comprimento de rugosidade	=0.1
Temperatura do ar inicial [K]	=309.64
Umidade específica em 2500 m [g /kg]	=6.64
Umidade relativa em 2m [%]	=46.41

Aos dados requeridos para a configuração básica citados acima devem ser acrescentados dados complementares, a saber:

- Temperatura (K) e umidade relativa (%) do solo, para as camadas 0-20cm, 20-50cm e abaixo de 50cm de profundidade;
- Valores de transmitância térmica (U) e albedo para telhados e paredes;
- Cobertura de nuvens (em oitavas);
- Ajuste solar (fator de 0,5 a 1,5);

Para os dados de temperatura e umidade do solo para as alturas de 0-20 cm, de 20 -50 cm e abaixo de 50 cm foram adotados os valores descritos por Rosseti (2013), tanto para estação quente-úmida como para seca (ajustado para vegetação-irrigado).

Os valores para transmitância térmica (U) de paredes e telhados foram obtidos na Norma Brasileira NBR-15220 (2005). Conforme já dito, os edifícios são representados de forma simplificada, compostos pelos mesmos materiais e apresentam o mesmo albedo, ou seja, considera-se um valor médio para o modelo.

O ajuste das nuvens (cobertura e tipo de nuvens) é feito juntamente com o ajuste de radiação de onda curta, conforme descrito por Rosseti (2013). Para o valor de cobertura de nuvens, o ajuste é realizado visando obter um valor de radiação difusa do modelo próximo ao valor calculado para o horário de meio-dia do dia da simulação, usando para isso dados de nebulosidade média do período oriundos do banco de dados do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos - CPTEC/INPE.

Para o ajuste da radiação de onda curta, são testados valores com o auxílio do programa RADIASOL2 desenvolvido pelo laboratório de energia solar da UFRGS (disponível em <ftp://ftp.solar.ufrgs.br/progs/Radiasol2.zip>). Os ajustes na caracterização das nuvens deve ser feito até que o valor de SWdif (radiação difusa) às 12h solar coincida com o calculado para o local. Em seguida, na seção SOLARADJUST, conhecendo o valor de radiação global I_g para o mesmo horário (w/m^2), comparar com o calculado após o ajuste de SWdif. Pela diferença de valores deve ser atribuído um fator de correção entre 0,5 e 1,5.

3.2.2 Modelagem dos cenários

Para a presente pesquisa foram consideradas 4 estratégias de mitigação de ilhas de calor com o intuito de avaliar seu efeito sobre as variáveis temperatura de ar ($^{\circ}C$) e umidade relativa do ar (%).

Desta forma, além da simulação do ambiente térmico para a situação real da área de estudo, foram realizados quatro cenários visando entender o impacto de cada estratégia durante os dois períodos considerados (quente-seco e quente-úmido). Os cenários são descritos a seguir:

a) Cenário 1 - Estratégia telhado fresco (Cool roof)

Para a estratégia telhado fresco, o atributo responsável pelas modificações no microclima é a área de telhados dos edifícios, definida pela projeção das edificações contidas na área de estudo, que ocupam uma área de $67.731,25m^2$, constituindo 18,8% da superfície total.

A estratégia de utilização de telhados frescos na cobertura dos edifícios possui como elemento principal a alteração do valor de albedo deste telhado. Dentro do ambiente ENVI-met, a implementação desta estratégia foi feita por meio da modificação dos valores de albedo deste elemento, passando de 0,15 (configuração padrão), para 0,85 (condição telhado fresco).

b) Cenário 2 - Estratégia telhado verde (Green roof)

Para a estratégia telhado verde, o atributo responsável pelas modificações no microclima também é de telhados dos edifícios, definida pela projeção das edificações contidas na área de estudo. Aplicado em 100% das edificações, resulta em uma área de 67.731,25m², ou seja, 18,8% da superfície total.

Para o presente estudo, a implementação desta estratégia foi feita por meio da adição de vegetação do tipo grama esmeralda, de nome científico *Zoysia japonica*, nos telhados dos edifícios, por ser o tipo de vegetação comumente usado na cidade de Cuiabá.

c) Cenário 3 - Estratégia pavimentos frescos

Para a estratégia pavimentos frescos, o atributo responsável pelas modificações no microclima é toda a área de pavimentos impermeáveis, ou seja, a soma das superfícies de calçadas e superfícies asfálticas, que totalizam 125.829,97m², ou seja, 34,9% da superfície total.

De forma similar a estratégia de telhados frescos, o elemento alterado foi o valor de albedo destas superfícies. Dentro do ambiente ENVI-met, a implementação desta estratégia foi feita por meio da modificação dos valores de albedo dos calçadas, passando de 0,1 (valores descritos por Oke, 1987), para 0,60 (condição material fresco) e albedo das superfícies asfálticas, passando de 0,05 (valores descritos por Oke, 1987), para 0,80 (condição material fresco).

d) Cenário 4 - Estratégia incremento de áreas vegetadas

Para a estratégia de incremento de áreas vegetadas, atributo responsável pelas modificações no microclima é toda a área composta por massas arbóreas, que totalizam 61.355,23m², ou seja, 17% da superfície total.

Para o presente estudo, a implementação desta estratégia foi feita por meio da multiplicação do valor de cada LAD (*leaf area index*) dentro do banco de dados das plantas (Plants.dat) pelo índice 2. Desta forma, toda a vegetação da área de estudo tem seu valor de densidade de área foliar duplicado.

3.3 MÉTODOS ESTATÍSTICOS UTILIZADOS NA ANÁLISE

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto da adoção de quatro estratégias (telhado fresco, telhado verde, pavimento fresco e incremento de áreas vegetadas) na mitigação de ilhas de calor urbanas, por meio do estudo de caso do campus da UFMT.

Para cada estratégia foi desenvolvido um cenário e simuladas as condições meteorológicas do período estudado, usando o modelo ENVI-met. Considerando os objetivos do trabalho e recomendações dos desenvolvedores do software, as variáveis utilizadas para a validação do modelo foram a temperatura do ar (°C) e a umidade relativa do ar (%).

Para avaliar o desempenho do modelo foram adotadas quatro medidas de quantificação do erro na estimação das variáveis pelo software ENVI-met, seguindo metodologia de Rosseti (2013). São elas: o Coeficiente de Determinação (R^2), o Erro Médio Quadrático (RMSE), o Erro Médio Absoluto (MAE) e o Desvio das Médias (MBE).

3.3.1 Coeficiente de Determinação (R^2)

O coeficiente de determinação mede a proporção da variação da variável dependente (temperatura e umidade do ar estimadas), que é explicada pelo modelo de regressão linear, a partir da variável independente (temperatura e umidade do ar observadas).

O coeficiente de determinação assume valores entre -1 e 1, demonstrando maior associação quando o valor é próximo da unidade. O sinal que o valor assume indica uma correlação positiva (+), ou seja, aumento no valor da variável medida é

acompanhado por aumento no valor da variável estimada, ou uma correlação negativa (-), quando aumento no valor da variável medida apresenta como resposta uma diminuição no valor da variável estimada.

De acordo com Anderson et al. (2007), o coeficiente de determinação é uma medida da eficiência de ajuste da equação de regressão estimada.

3.3.2 Erro Médio Quadrático (RMSE)

Outro indicador de desempenho utilizado para avaliar o modelo foi o RMSE (*Root Mean Square Error*), ou Erro Médio Quadrático, em português.

De acordo com Moura et al. (2010), este indicador tem o objetivo de mostrar a magnitude do erro de uma determinada estimativa. Este indicador sempre tem valor positivo, e está relacionado com a dispersão entre os dados estimados e observados, (Equação 1).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad \text{Equação 1}$$

em que, E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, e n é o número de observações. Segundo Stone (1993), a desvantagem desta medida é alguns poucos valores discrepantes resultam em um aumento significativo na magnitude de seu valor.

3.3.3 Erro Absoluto Médio (MAE)

O Erro Absoluto Médio (*Mean Absolute Error*), é outro indicador utilizado para medir a proximidade entre os dados estimados e observados, sendo, de acordo com Santos et al. (2011), menos sensível a valores extremos. Assim como o RMSE, quanto mais próximo de zero, menor a dispersão entre valores estimados e observados, conforme Equação 2.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |E_i - O_i| \quad \text{Equação 2}$$

em que, E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, e n é o número de observações.

3.3.4 Desvio das Médias (MBE)

Por último, outro indicador de desempenho avaliado foi o Desvio das Médias (MBE), ou *Mean Bias Error*, em inglês. O MBE indica o quanto o modelo está sendo subestimado (valor negativo) ou superestimado (valor positivo), conforme Equação 3.

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i) \quad \text{Equação 3}$$

em que, E_i e O_i são os valores estimados e observados (medidos), respectivamente, e n é o número de observações.

De acordo com Ulgen & Hepbasli (2009), o ideal para um modelo é que o valor de MBE apresente tendência a zero, o que indica consonância entre os valores observados e estimados.

4. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste item serão apresentados os resultados do procedimento de validação do modelo e definição das equações de calibração dos dados, para os dois períodos estudados.

Em seguida serão apresentados os resultados decorrentes das simulações, iniciando pela apresentação do caso de referência (situação real), seguido dos quatro cenários hipotéticos, cada um contemplando uma estratégia separadamente. Ao final deste item, são os cenários são analisados de forma comparativa, tanto para estação quente-seca quanto para quente-úmida.

4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para realizar a validação do modelo foi necessária a comparação dos dados reais, registrados na área de estudo, com os dados gerados pelo modelo ENVI-met, para cada um dos períodos estudados (quente-seco e quente-úmido).

Os dados reais foram medidos pela estação fixa localizada no bloco de Pós-Graduação em Física Ambiental (figura 10), enquanto que os dados gerados pelo software foram registrados através de 5 sensores dispostos nas proximidades do bloco, dentro do ambiente virtual ENVI-met, (figura 14).

A definição de 5 sensores para o registro das variáveis dentro do modelo tem o objetivo de minimizar possíveis interferências pontuais, como por exemplo o efeito localizado do vento, que poderia levar a valores não condizentes com a realidade.

Para os dados estimados pelo software, foi calculado o valor médio horário destes 5 sensores, para a altura de sete metros, tanto para variável temperatura do ar (°C), quanto para umidade relativa do ar (%).

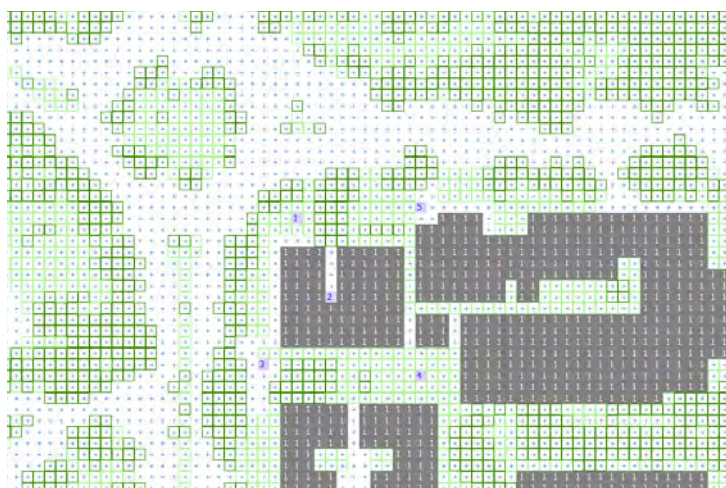


Figura 14 – Localização dos sensores para validação do modelo

Para os dados observados pela estação fixa do PGFA, foi considerado um conjunto de dados, do qual foi extraída a média horária para cada variável, conforme Tabela 7.

Do conjunto composto de 3 meses para cada período, utilizado para o cálculo dos dados de entrada, para realizar a validação, foi considerada a média horária de dois meses imediatos (um mês anterior e um posterior) ao mês da data simulada. Já para a etapa de definição das equações de calibração, foi considerada a média horária extraída do mesmo mês da data selecionada para simulação.

Tabela 7 - Períodos de dados utilizados

Período e dia simulado	Validação	Calibração
Úmido (26/03/2012)	Fevereiro + Abril/2012	Março/2012
Seco (25/08/2012)	Julho +Setembro/2012	Agosto/2012

Logo, foram plotados os valores médios registrados pelos sensores do ENVI-met um gráfico de dispersão juntamente com os dados obtidos pela estação fixa no campus da UFMT, conforme visto a seguir.

4.1.1 Validação períodos quente-úmido e quente-seco

A tabela 8 apresenta um resumo dos indicadores de desempenho do modelo ENVI-met para cada variável, usando o conjunto de dados designado para validação.

Observa-se que, o valor do R^2 , apresenta-se acima de 0,90 para as duas variáveis nos dois períodos do ano. A variável temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) apresenta valores mais altos de R^2 do que a variável umidade relativa do ar (%), registrado por valores superiores a 0,95. Comparando-se o valor do outros indicadores isto também fica evidente, uma vez que, a variável umidade relativa do ar apresenta os valores das medidas de quantificação do erro RMSE, MAE e MBE superiores em todos os períodos.

Tabela 8 - Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met (Validação)

Variável/Período	R^2	RMSE	MAE	MBE
Temperatura/Úmido	0,95125	2,3881	2,0022	1,2923
Temperatura/Seco	0,95252	2,2088	1,9477	0,3315
Umidade/Úmido	0,91491	13,3729	12,7187	12,7187
Umidade/Seco	0,90121	15,0838	13,5069	4,5454

Isto já havia sido apontado por outros autores, que afirmam que o software consegue reproduzir, com mais acurácia, o comportamento da variável temperatura do ar, quando comparado com o comportamento da umidade relativa do ar (CARFAN, 2011; ROSSETI, 2013; JOHANSSON et al., 2006 e EMMANUEL et al., 2007).

A seguir, são apresentados os gráficos de regressão linear entre os valores observados na estação fixa PGFA e os valores estimados pelo software ENVI-met, referentes às duas variáveis estudadas, para os dois períodos considerados.

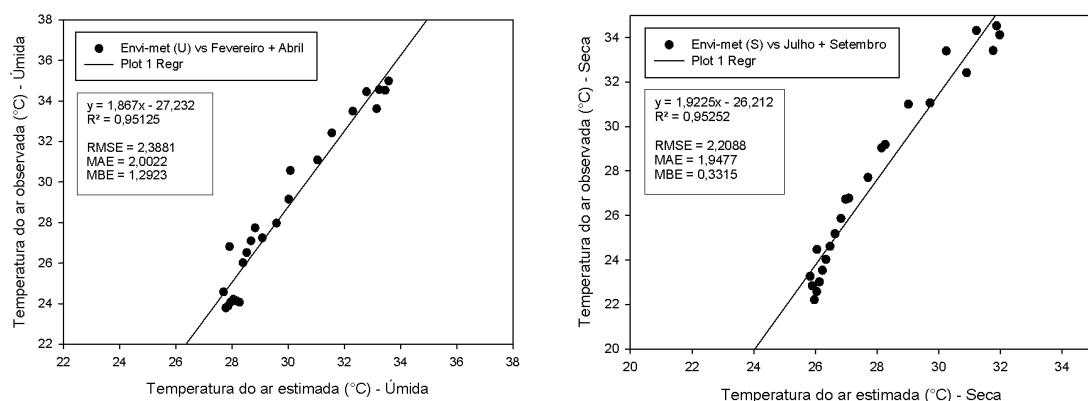


Figura 15 – Regressão linear para validação da temperatura do ar - estações quente-úmida e quente-seca

Na figura 15, é possível observar as retas de regressão para a variável temperatura do ar. Tanto para a estação úmida, quanto para estação seca, é observada a existência de correlação positiva entre as variáveis observadas e estimadas.

Analisando os indicadores de desempenho, verifica-se que o modelo ENVI-met estima melhor a dinâmica desta variável durante o período seco, que apresentou um valor de R^2 levemente superior (0,95252 e 0,95125, respectivamente) e valores de RMSE, MAE e MBE inferiores aos valores apresentados pelo software durante o período úmido. Os valores positivos de MBE (1,2923 e 0,3315) indicam que o modelo tende a superestimar os valores da variável em questão.

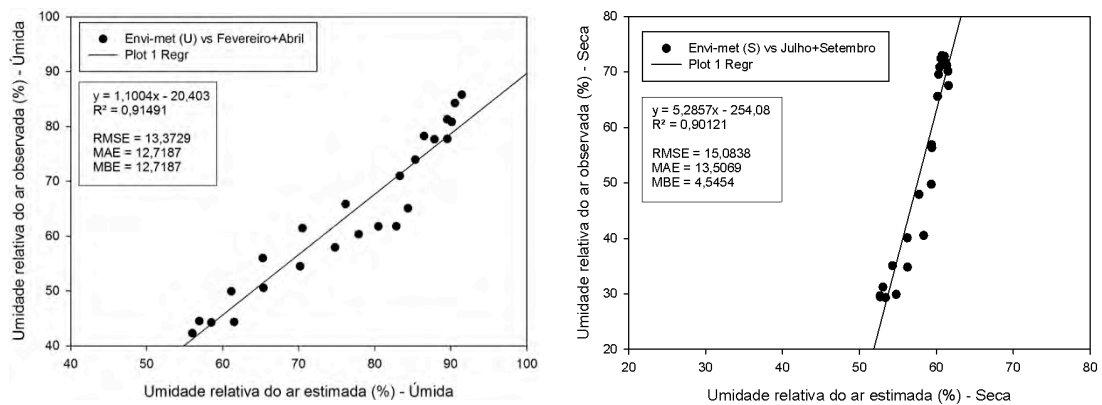


Figura 16 – Regressão linear para validação da umidade relativa do ar - estações quente-úmida e quente-seca

Na figura 16, é possível observar as retas de regressão para a variável umidade relativa do ar. Assim como para a temperatura do ar, tanto para a estação úmida, quanto para estação seca, é observada a existência de correlação positiva entre as variáveis observadas e estimadas, mostrando que alterações positivas na umidade relativa observada são acompanhadas por alterações positivas na umidade relativa estimada pelo modelo.

Analisando os indicadores de desempenho, verifica-se que o modelo ENVI-met estima a dinâmica desta variável com maior qualidade durante o período úmido, que apresentou um valor de R^2 levemente superior (0,91491 e 0,90121, respectivamente) e valores de RMSE, MAE inferiores aos valores apresentados pelo software durante o período seco.

Assim como verificado por Rosseti (2013) em estudo usando o software ENVI-met para o clima de Cuiabá, os resultados aqui apresentados reforçam a validade do modelo como uma ferramenta de previsão microclimática passível de ser aplicada em estudos para as condições descritas.

4.1.2 Definição das equações de calibração

Conforme exposto, o modelo ENVI-met simulou adequadamente a dinâmica das variáveis em estudo para os períodos definidos, comprovado pelos indicadores de desempenho apresentados. No entanto, a fim de possibilitar a inferência a partir dos dados estimados, é necessário a correção dos dados gerados pelo software por meio do ajuste usando-se equações de calibração.

Desta forma, para a etapa de calibração, foi comparado, por meio de gráfico de dispersão, os valores modelos pelo software com as médias horárias dos dados referentes ao período do mês definido para as simulações, sendo o mês de março/2012 para o período quente-úmido e agosto/2012 para o período quente-seco.

Os indicadores de desempenho são apresentados na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9 - Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met (Calibração)

Variável/Período	R ²	RMSE	MAE	MBE
Temperatura/Úmido	0,96002	1,3017	1,1312	0,3701
Temperatura/Seco	0,96786	3,3615	3,0531	-0,0050
Umidade/Úmido	0,95363	2,7119	2,0888	-0,9475
Umidade/Seco	0,91478	14,4609	12,5069	5,3194

De maneira similar aos resultados apresentados para validação, observa-se que o valor do R², apresenta-se acima de 0,90 para as duas variáveis nos dois períodos do ano. A variável temperatura do ar (°C) apresenta valores mais altos de R² do que a variável umidade relativa do ar (%), registrado por valores superiores a 0,95 (0,96002 e 0,96786 contra 0,95363 e 0,91478, respectivamente).

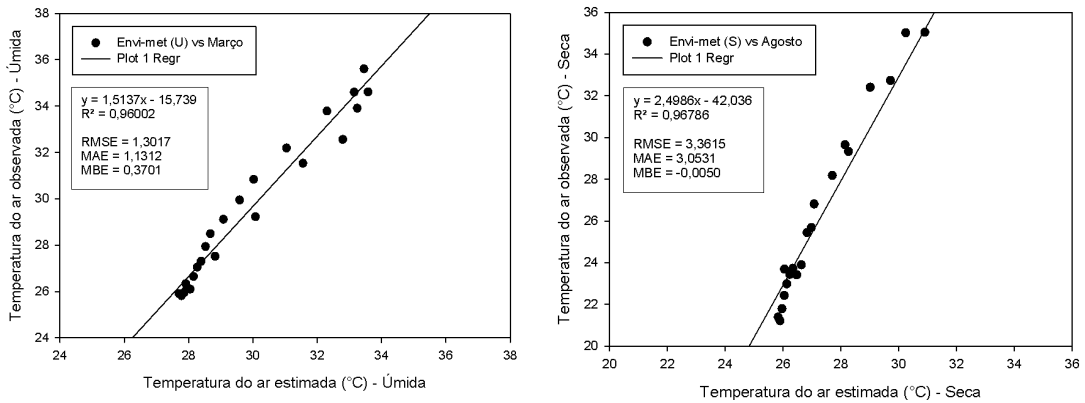


Figura 17 – Regressão linear para calibração da temperatura do ar - estações quente-úmida e quente-seca

Quando comparados os valores dos indicadores para a variável temperatura do ar, observa-se que, durante a estação úmida os dados foram estimados com maior qualidade, evidenciado pelos menores valores de RMSE e MAE, (1,3017 e 1,1312, respectivamente). A dispersão dos pontos em torno da reta de regressão reforça os indicadores de desempenho apresentados na Tabela 9.

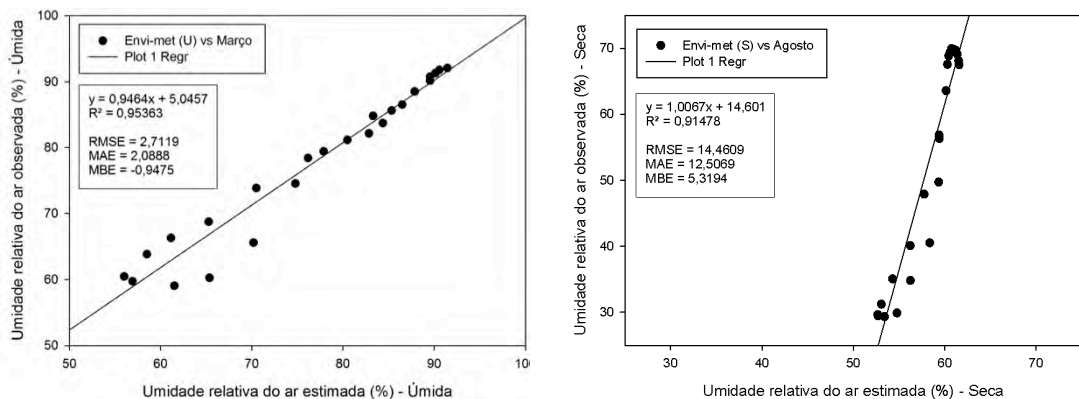


Figura 18 – Regressão linear para calibração da umidade relativa do ar - estações quente-úmida e quente-seca

A acurácia do modelo ENVI-met para a variável umidade do ar não é tão expressiva quanto da temperatura do ar. Para os dois períodos, foram registrados valores inferiores de R^2 , quando comparados aos valores apresentados para a variável temperatura do ar nos mesmos períodos.

Quando comparado os valores dos indicadores de desempenho entre as estações, observa-se que o modelo apresentou menores erros ao simular os dados para o período úmido, com valores de RMSE, MAE e MBE inferiores aos valores atingidos pelos dados simulados para o período seco, conforme Tabela 9.

Desta forma, foram definidas as equações de calibração a seguir para corrigir os valores nos dados de saída das variáveis simuladas, para os dois períodos estudados.

a) Temperatura do ar - período úmido

$$T_u = 1,5137t_u - 15,739 \quad \text{Equação 4}$$

em que T_u representa a temperatura do ar ajustada no período úmido e t_{eu} a temperatura do ar estimada pelo modelo no período úmido.

b) Umidade relativa do ar - período úmido

$$UR_u = 0,9464ur_u + 5,0457 \quad \text{Equação 5}$$

em que UR_u representa a umidade relativa do ar ajustada no período úmido e ur_{eu} a umidade relativa do ar estimada pelo modelo no período úmido.

c) Temperatura do ar - período seco

$$T_s = 2,4966t_s - 42,036 \quad \text{Equação 6}$$

em que T_s representa a temperatura do ar ajustada no período seco e t_{es} a temperatura do ar estimada pelo modelo no período seco.

d) Umidade relativa do ar - período seco

$$UR_s = 1,0067ur_s + 14,601 \quad \text{Equação 7}$$

em que UR_s representa a umidade relativa do ar ajustada no período seco e ur_{es} a umidade relativa do ar estimada pelo modelo no período seco.

4.2 RESULTADOS - CASO DE REFERÊNCIA

Com o objetivo de possibilitar um melhor entendimento do efeito de cada estratégia durante os períodos estudados, inicialmente será apresentado o comportamento da área de estudo simulada para o caso de referência, isto é, a situação atual, sem a aplicação de nenhuma das estratégias.

Serão apresentados mapas de temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%), com os valores já corrigidos por meio das equações de calibração, para os dois períodos. Os mapas representam a distribuição horizontal de cada variável, para o horário especificado, a uma altura de 1,10m acima do solo, conforme recomenda a ISO 7726 (ISO,1998).

O comportamento das variáveis é apresentado nos horários que caracterizam o fenômeno de ilha de calor, às 6h para manhã, 13h para tarde e 20h para noite.

Os mapas foram desenvolvidos no software Leonardo 2014 Beta 3.99.5, no qual foram definidas escalas diferentes para cada horário apresentado, com o objetivo de identificar as diferenças, nos valores de cada variável, dentro da área de estudo em um dado momento.

As setas coloridas em azul e vermelho, próximas ao símbolo da orientação norte, representam a direção predominante do vento para cada uma das estações, quente-úmida (330°) e quente-seca (170°), respectivamente, contados em direção horária a partir do norte.

4.2.1 Temperatura do ar (°C)

A distribuição horizontal, a 1,10m em relação ao solo pode ser observada na figura 19, a seguir.

Como pode ser observado na figura 19, em geral, a estação quente-úmida apresentou valores mais elevados de temperatura do ar, nos três horários analisados, demonstrado pela coloração predominante magenta dos mapas térmicos deste período, em comparação com os mapas da estação quente-seca.

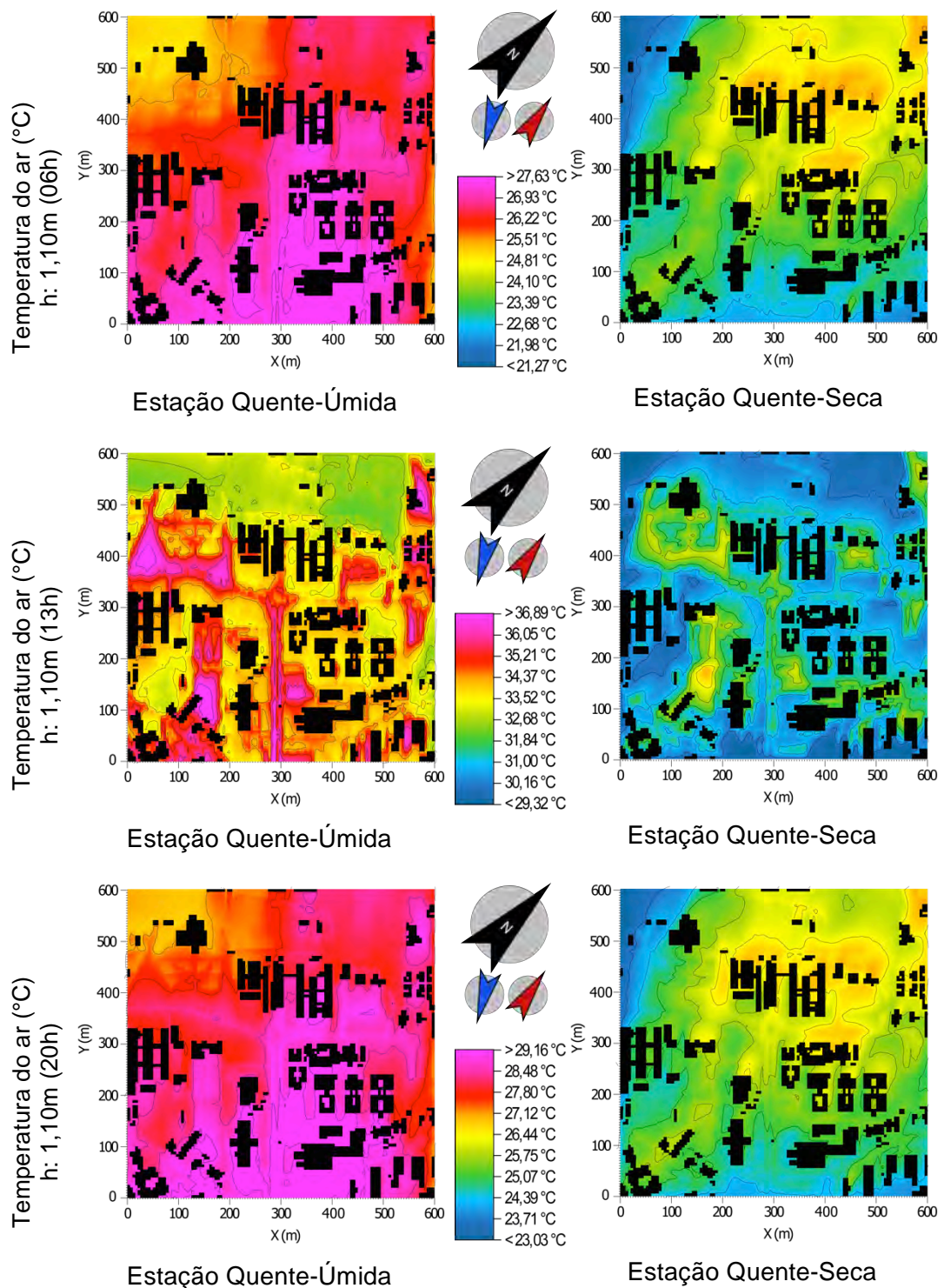


Figura 19 – Mapas da distribuição horizontal da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$), a 1,1m do solo, para as estações quente-úmida e quente-seca

No período da manhã (6h), os mapas registraram valor médio de $26,57^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,74^{\circ}\text{C}$) para a estação úmida e $23,86^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,87^{\circ}\text{C}$) para estação seca.

O efeito do vento sobre o comportamento da variável também é observado, determinando, dentro da área de estudo, locais com menores temperaturas na região de entrada da ventilação. Nas regiões opostas, é percebida a elevação da temperatura do ar, possivelmente pela concentração de ar aquecido, carregado pela ventilação.

O referido efeito é percebido, com maior expressividade, nos horários com pouca ou nenhuma presença de radiação solar, ou seja, às 6h e 20h, tanto no período úmido quanto no período seco.

No período da tarde (13h), influenciados pela intensidade da radiação solar, os mapas registraram valores mais elevados, com média de $34,15^{\circ}\text{C}$ ($\pm 1,09^{\circ}\text{C}$) para a estação úmida e $31,13^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,79^{\circ}\text{C}$) para estação seca.

Observa-se que, no período vespertino, a ventilação tem menor influência na determinação das áreas mais aquecidas. É possível identificar, por meio dos mapas térmicos, que neste horário, as regiões com temperatura mais elevada são os estacionamentos cobertos por material asfáltico. Este efeito é explicado pelo baixo valor de albedo deste material, que resulta em grande absorção da energia térmica proveniente da radiação solar.

No período noturno (20h), é registrado um valor médio de $28,32^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,59^{\circ}\text{C}$) para estação úmida e $25,57^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,72^{\circ}\text{C}$) para a estação seca.

4.2.2 Umidade relativa do ar (%)

A variável umidade relativa do ar tende a acompanhar, de maneira inversa, as variações na temperatura do ar. Isto resulta em valores menores de umidade relativa do ar em regiões onde foram registrados maiores valores de temperatura do ar, conforme figura 20, a seguir.

A escala cromática utilizada para representar esta variável é invertida em relação à utilizada na variável temperatura do ar. Portanto, valores mais elevados de umidade relativa do ar são representados pela cor azul, enquanto que valores menores são representados pela cor magenta.

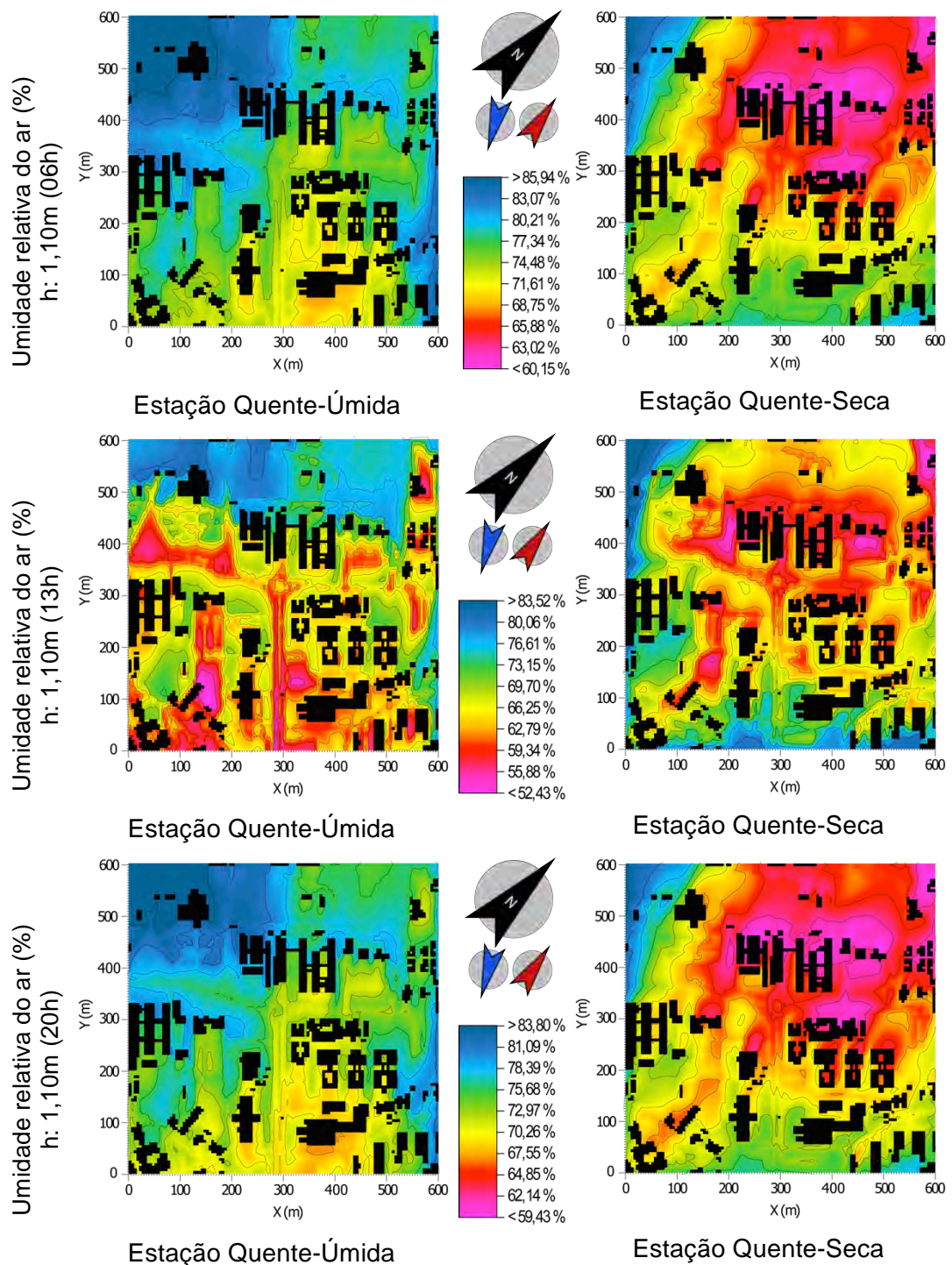


Figura 20 – Mapas da distribuição horizontal da umidade relativa do ar (%), a 1,1m do solo, para as estações quente-úmida e quente-seca

Da forma similar à variável temperatura do ar, a umidade relativa do ar também sofre influência da ventilação. Nos horários de 6h e 20h, este efeito é mais evidenciado, apresentando, nos mapas higrométricos, regiões bem demarcadas ao sul, no período quente-úmido, e à nordeste no período quente-seco.

A estação úmida, como esperado, apresentou, em geral ao longo do dia, valores mais elevados de umidade relativa do ar, registrando, às 6h, um valor médio de 78,61% ($\pm 4,35\%$), em comparação com a estação seca, que registrou valor médio de 70,12% ($\pm 5,19\%$).

No período vespertino (13h), a média registrada durante estação quente-úmida foi de 68,51% ($\pm 6,57\%$) e 65,72% ($\pm 5,48\%$) para estação quente-seca. Já no período noturno (20h), o valor médio para a úmida foi de 79,72% ($\pm 3,73\%$) e de 71,09% ($\pm 4,86\%$) para a estação seca.

4.3 RESULTADOS - EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS

A seguir serão apresentados os resultados do impacto de cada uma das quatro estratégias selecionadas para a presente pesquisa. Inicialmente, serão exploradas as diferenças entre o comportamento de cada estratégia para o período úmido e o período seco. Ao final do capítulo será feito um comparativo geral entre as quatro estratégias acerca da dinâmica das variáveis investigadas.

Estes resultados serão expostos por meio de mapas cromáticos, do efeito de cada estratégia. Isto significa que, os valores apresentados são a diferença entre o cenário com a estratégia aplicada e o cenário de referência.

Os resultados serão comentados em forma de valor pontual e média geral. O valor da média geral representa a média dos valores de todos os grids presentes na área de estudo, à uma altura de 1,10m do chão, sendo portanto, uma medida do efeito da estratégia no espaço como um todo.

Já o valor pontual representa o efeito máximo que a estratégia alcançou de forma localizada, podendo ser desde um grid isoladamente até um conjunto de grids, conforme observado nos mapas cromáticos.

4.3.1 Estratégia 1 - Telhado Fresco

Os efeitos da incorporação da estratégia 1 - telhado fresco, podem ser observados nas figuras 21 e 22, a seguir.

4.3.1.1 Temperatura do ar

Para a variável temperatura do ar, o efeito esperado das estratégias é de redução nos valores de temperatura, logo, quanto maior o efeito em determinada região, menos intensa é apresentada a cor vermelha.

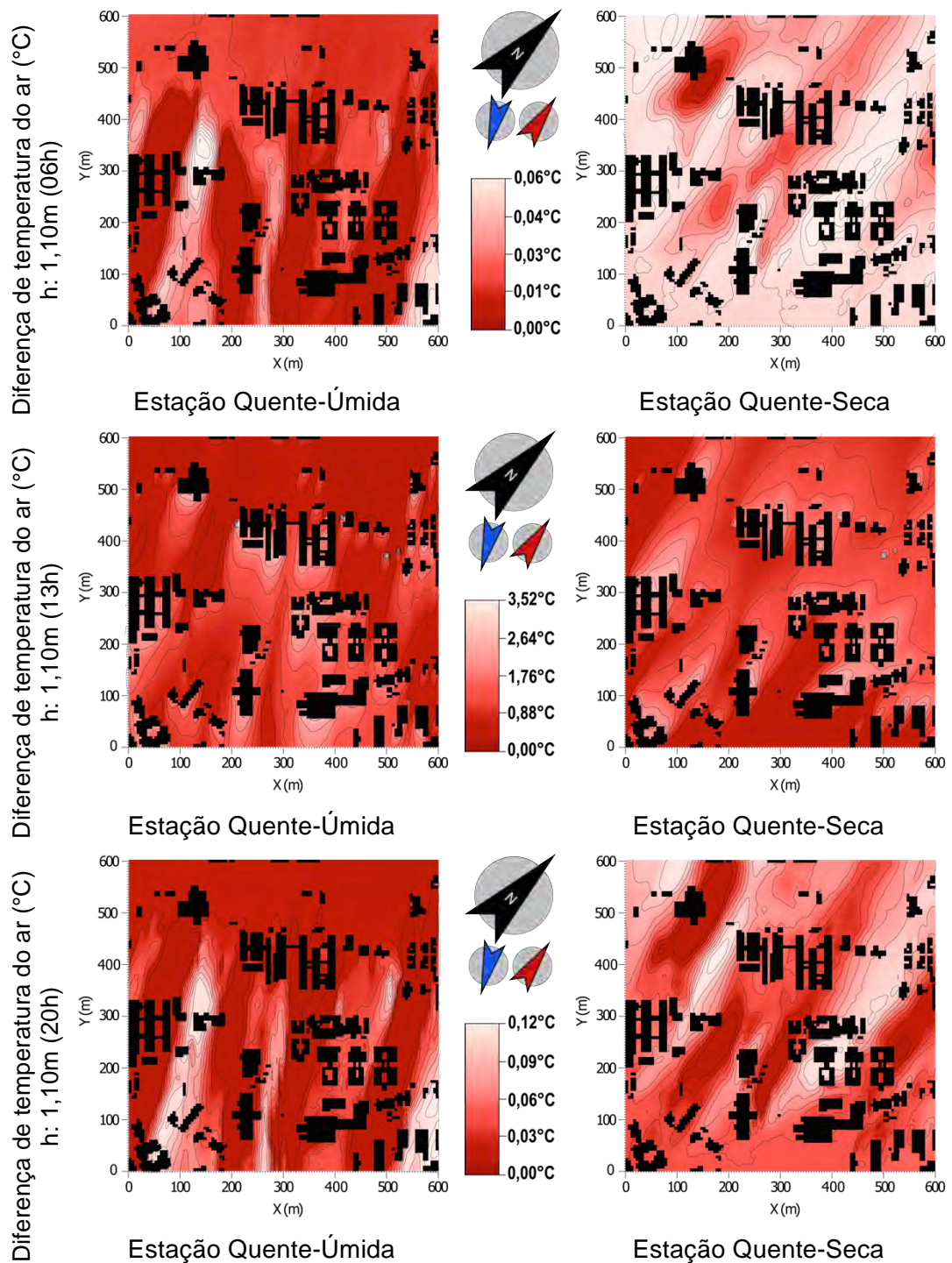


Figura 21 – Efeito da adoção da estratégia 1 - telhado fresco - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

Às 6h os mapas térmicos não apresentam alterações expressivas na temperatura do ar, registrando uma alteração pontual de $0,04^{\circ}\text{C}$ para o período quente-úmido e de $0,06^{\circ}\text{C}$, para o período quente-seco.

Às 13h o impacto da estratégia 1 é mais pronunciado, registrando uma redução na temperatura média da área de $0,46^{\circ}\text{C}$ para o período quente-úmido e de $1,05^{\circ}\text{C}$ para o período quente-seco.

O efeito pontual da estratégia chega a reduzir a temperatura em até $3,10^{\circ}\text{C}$ para o período úmido, que tem seu efeito espalhado pela ventilação em direção ao sul da área. Para o período seco a temperatura é reduzida pontualmente em até $3,52^{\circ}\text{C}$, com seu efeito espalhado em direção ao nordeste da área.

Durante a noite, às 20h, o efeito de resfriamento não é expressivo, reduzindo de forma pontual a temperatura do ar em até $0,09^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e até $0,12^{\circ}\text{C}$ para o período seco. A ventilação, também neste horário, é responsável por espalhar o efeito ao longo da sua direção predominante.

O efeito desta estratégia apresenta valor máximo durante o pico solar (entre 11h-13h), explicado pelo fato do telhado fresco fazer uso de um material com elevado albedo, que resulta em menor absorção de energia térmica. Em comparação com o cenário de referência, é esperado que este cenário apresente maior efeito em horários com altos valores de radiação solar.

Considerando o intervalo marcado pela presença de radiação solar (7h-17h), a estratégia de telhado fresco resultou numa diminuição de $2,02^{\circ}\text{C}$ e $2,22^{\circ}\text{C}$, para os períodos úmido e seco, respectivamente.

Estes valores estão em consonância com estudos recentes que avaliaram o impacto da aplicação de materiais frescos em telhados. Kolokotroni et al. (2013), registraram redução média de $2,5^{\circ}\text{C}$, para a cidade de Londres, para uma mudança de 0,6 no valor do albedo do telhado (0,1 antes e 0,7 depois da aplicação de pintura reflexiva).

Romeo & Zinzi (2012) em estudo abordando o impacto do uso de materiais frescos em coberturas, relatam valores próximos de redução da temperatura, registrando em média $2,3^{\circ}\text{C}$ para estudo realizado na Itália. Neste caso, o albedo do telhado foi alterado de 0,25 para 0,82 com a aplicação de pintura reflexiva.

4.3.1.2 Umidade relativa do ar

Para a variável umidade relativa do ar (%), os mapas são apresentados em cor azul. O efeito esperado das estratégias é de aumento nos valores de umidade relativa, logo, quanto maior o efeito em determinada região, mais intensa é apresentada a cor.

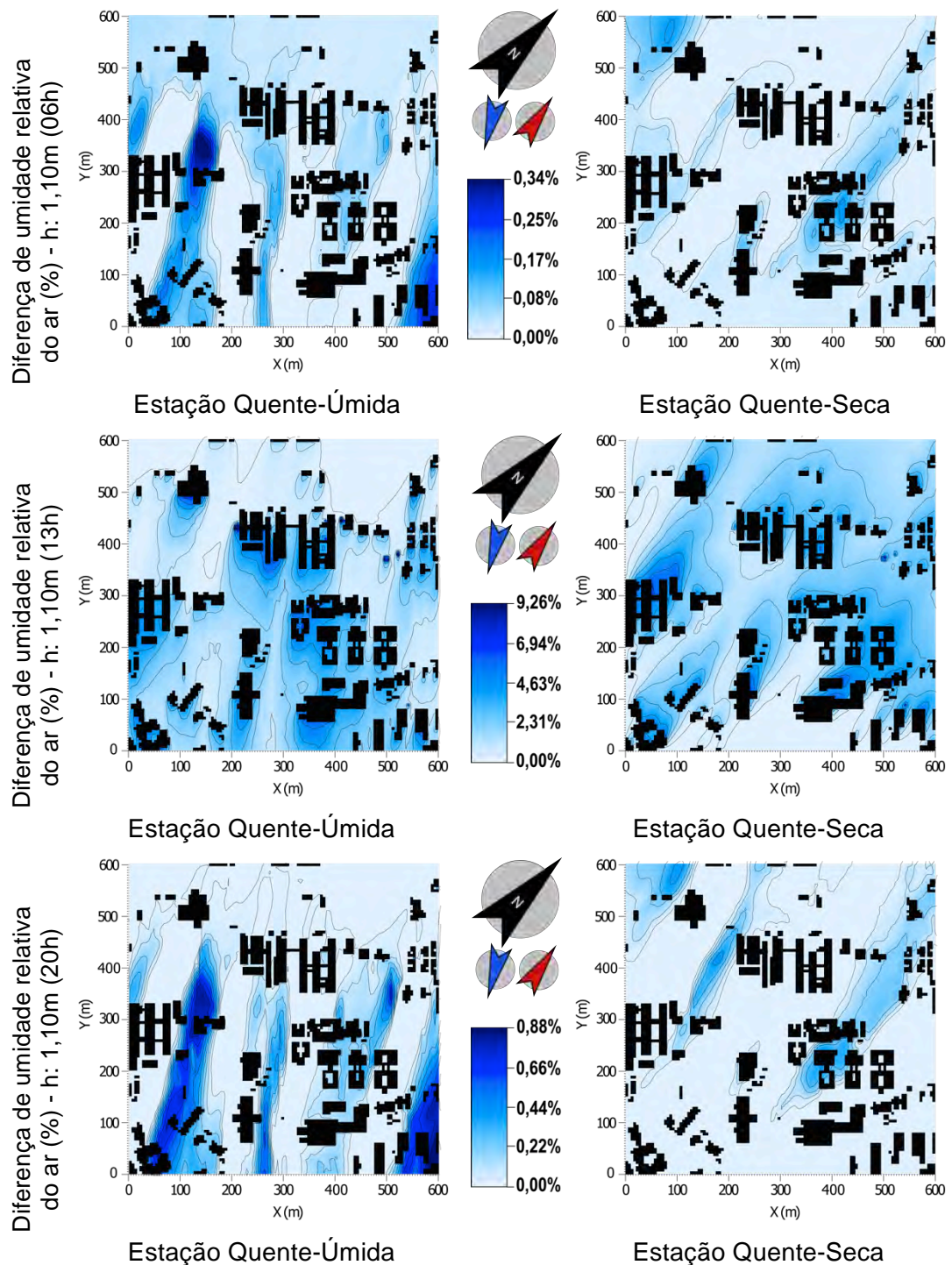


Figura 22 – Efeito da adoção da estratégia 1 - telhado fresco - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

De maneira geral, o comportamento da variável umidade relativa do ar, para a estratégia de telhados frescos, acompanha as variações da temperatura do ar, apresentando valores maiores de umidade relativa em regiões que registraram menores valores de temperatura do ar.

Durante o período matutino (6h), o efeito desta estratégia não é muito expressivo, apresentando um aumento pontual na umidade relativa de 0,34% para o período úmido e 0,22% para o período seco.

Às 13h, o efeito da estratégia é mais visível, com aumento na umidade média da área de 3,91% para período úmido e 4,55% para o período seco. Pontualmente, o efeito é maior, atingindo um aumento de até 9,26% para o período úmido e até 6,06% para o período seco.

No período vespertino é possível observar que o efeito desta estratégia não age de forma localizada. O aumento de umidade relativa, neste caso, abrange uma área mais extensa que a superfície dos telhados, pela ação de espalhamento pelo vento, principalmente na estação seca.

No período noturno (20h), o efeito da estratégia apresenta comportamento similar às 6h, com pouca expressividade, registrando um aumento pontual de até 0,88% para o período úmido e até 0,53% para o período seco.

Nos horários 6h e 20h observam-se algumas manchas localizadas sinalizando um aumento de umidade relativa, concentrados a sotavento da área de estudo, sendo seu efeito mais intenso às 20h.

Ao longo do dia, o período úmido apresentou valores médios mais elevados do que o período seco, com valores de 3,42% e 2,04%, respectivamente.

4.3.2 Estratégia 2 - Telhado Verde

4.3.2.1 Temperatura do ar

Os efeitos da incorporação da vegetação no telhado das edificações, medida a 1,10m do solo, nas duas estações estudadas, podem ser observados nas figuras 23 e 24, a seguir.

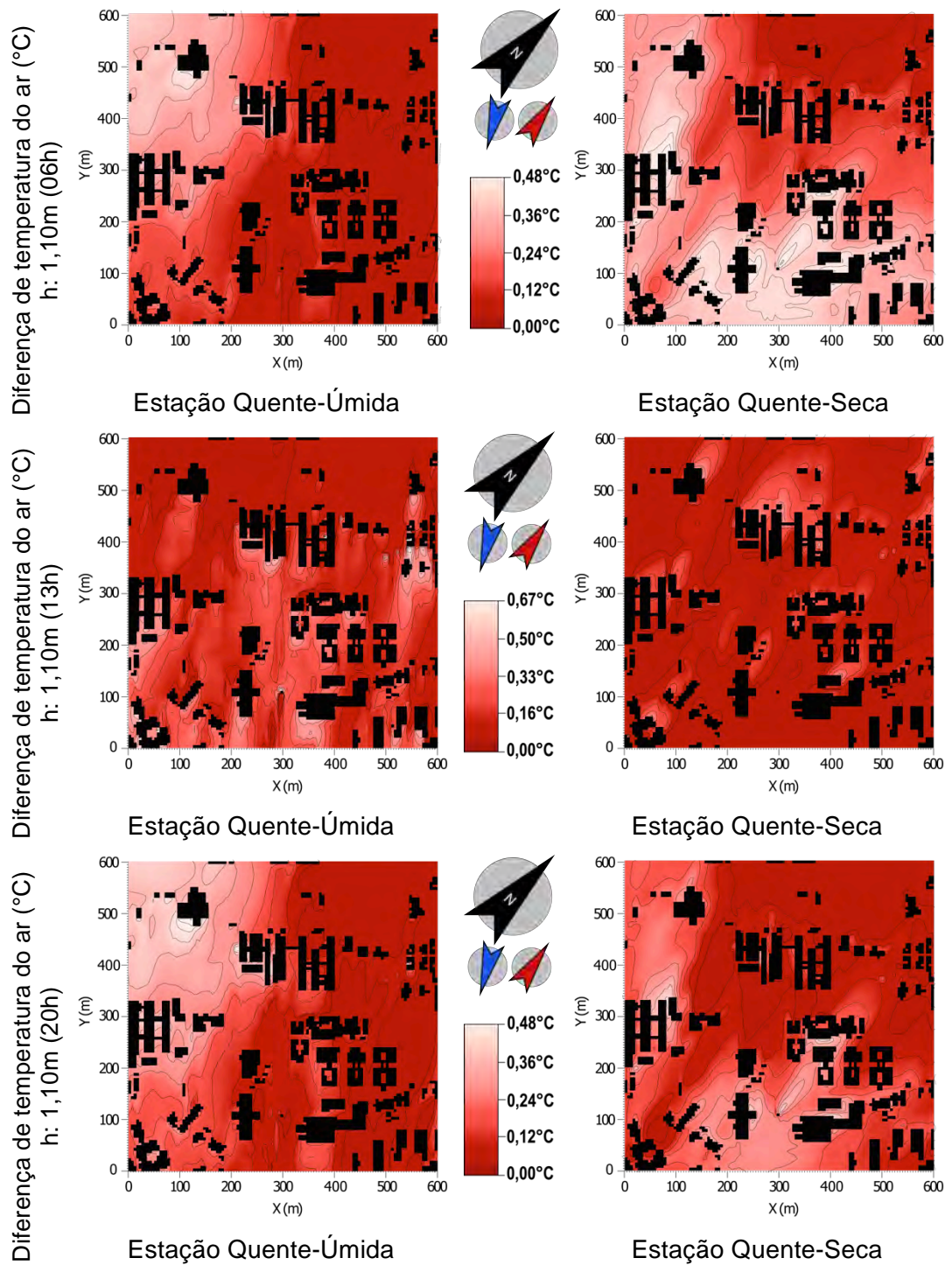


Figura 23 – Efeito da adoção da estratégia 2 - telhado verde - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

Às 6h os mapas térmicos apresentam alterações expressivas na temperatura do ar, registrando uma diminuição na temperatura média da área de $0,08^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e $0,13^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Pontualmente esta diminuição foi de $0,48^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e $0,43^{\circ}\text{C}$ para o período seco.

Nota-se, também no período matutino, que as variações espaciais de temperatura dentro de cada área estão bastante relacionadas com o vento, registrando uma concentração do efeito localizado próximo a entrada de ventilação do modelo.

Às 13h o impacto da incorporação de vegetação nos telhados é mais localizado, podendo-se identificar manchas mais claras próximo às edificações. O efeito da estratégia, da mesma forma que no período matutino, é espalhado pela ação do vento, reduzindo a temperatura também dos arredores das edificações.

Neste horário, foi registrada uma redução no valor médio da temperatura da área de $0,12^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e $0,20^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Em relação aos valores pontuais, foi verificada uma redução de até $0,64^{\circ}\text{C}$ no período úmido e de até $0,67^{\circ}\text{C}$ no período seco.

No período noturno (20h), é observado a mesma dinâmica verificada às 6h. A amplitude do efeito é bastante similar, com valor médio de resfriamento de $0,08^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e $0,14^{\circ}\text{C}$ para período seco. O efeito pontual varia de até $0,48^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e até $0,47^{\circ}\text{C}$ para o período seco.

Neste horário, a distribuição horizontal do efeito também apresenta uma influência marcada pela ventilação, mostrando o efeito mais proeminente nas regiões de entrada de ventilação do modelo, assim como verificado às 6h. São observadas, adicionalmente, manchas claras ao redor das edificações, mostrando que o efeito da incorporação do telhado vegetado permanece mesmo após o pôr do sol.

Rosseti (2013) relatou valores mais elevados na redução da temperatura do ar, em experimento de incorporação de telhado vegetado para o clima de Cuiabá. Para uma incorporação em 100% das edificações, a autora descreveu valores de redução de até $1,56^{\circ}\text{C}$ nos espaços dos quintais, próximos às edificações que tiveram aplicação da estratégia. Esta diferença, acredita-se, deve-se possivelmente às diferentes valores de densidade de área foliar (LAD) para a vegetação usadas nos dois estudos, resultando em um efeito mais evidente no experimento conduzido por Rosseti (2013).

D'Souza (2012) encontrou diferenças de 2,08°C em experimento usando ENVI-met, com incorporação de telhados vegetados para o clima de Dubai, onde as temperaturas atingem 49°C durante o verão.

Peng & Jim (2013) também investigaram o impacto da incorporação de telhados vegetados, para Hong Kong, que apresenta clima sub-tropical. Usando dois tipos diferentes de telhado vegetado, demonstraram que os efeitos não se restringem à área do telhado da edificação, registrando uma redução na temperatura do ar ao nível de pedestres da ordem de 0,4-0,7°C, para telhado verde extensivo e 0,5-1,7°C, para telhado verde intensivo.

Esta diferença entre os resultados encontrados na presente pesquisa e os valores relatados por diferentes pesquisadores podem ser atribuídos a diversos fatores, dentre os quais podem-se citar: diferenças no tamanho da área relativa das edificações da área de estudo, uso de diferentes espécies (com diferentes valores de LAD), entre outros.

4.3.2.2 Umidade relativa do ar

Os efeitos da incorporação do telhado verde na variável umidade relativa do ar (%) podem ser observados na figura 24, a seguir.

De forma geral, observa-se um comportamento semelhante à variável temperatura do ar, porém de maneira inversa, isto é, os pontos de menor temperatura do ar apresentam os maiores valores de umidade relativa.

Às 6h e às 20h, o efeito é marcado pela influência dos ventos, apresentando valores maiores de umidade nas regiões de entrada de ventilação no modelo. A amplitude do efeito também é semelhante nestes dois horários, registrando 0,96% de aumento na umidade relativa média para estação úmida e 1,29% de aumento na umidade relativa média para estação seca.

Às 14h, é possível observar o efeito da estratégia marcada pelas manchas em azul em torno das edificações, com sua intensidade mais elevada para o período seco, com um aumento de até 7,14%, pontualmente, em comparação com 2,71% no período úmido.

Neste horário também é percebido o efeito de espalhamento pela ventilação, ampliando o aumento no valor da umidade relativa para as regiões vizinhas às edificações.

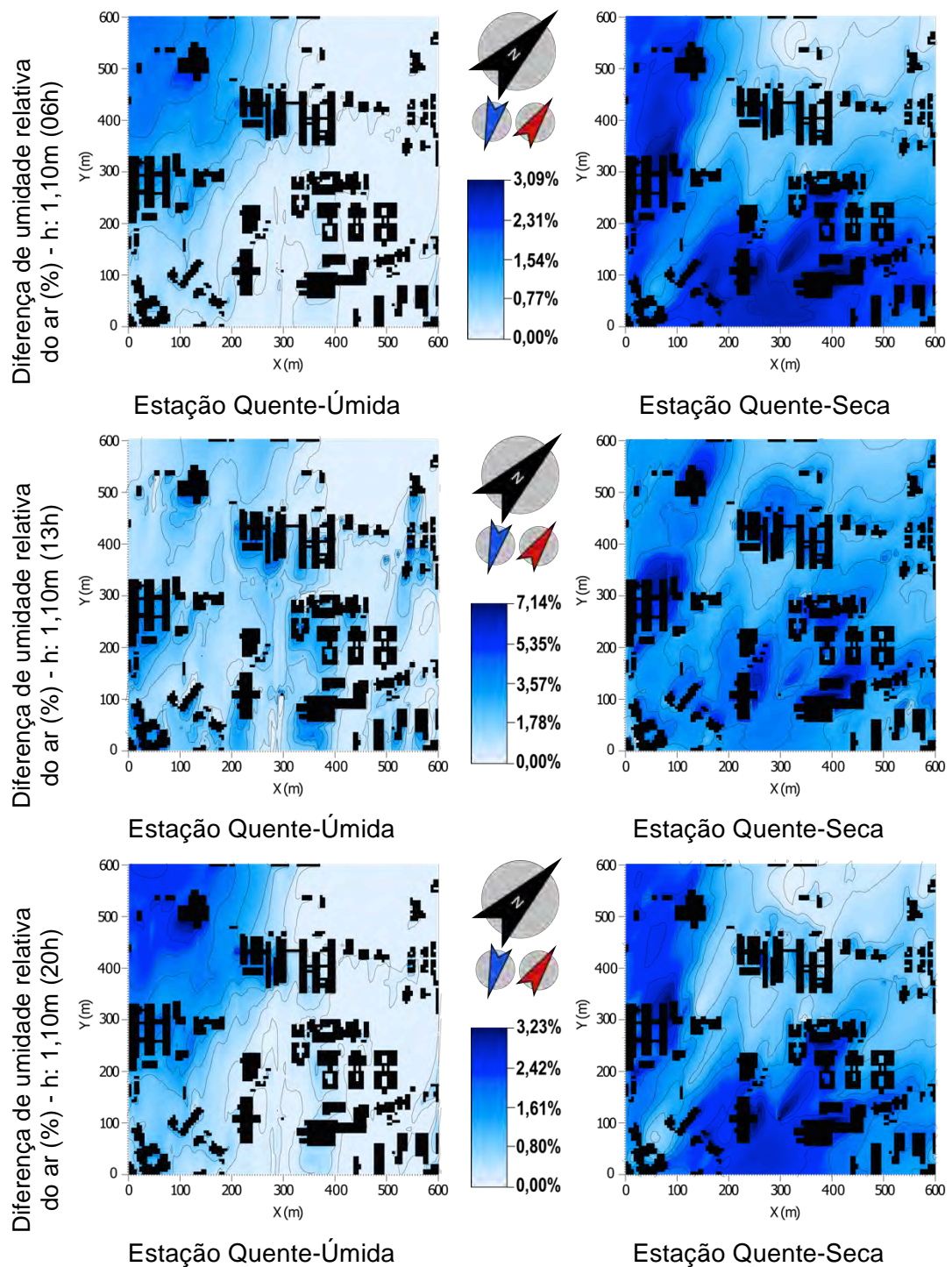


Figura 24 – Efeito da adoção da estratégia 2 - telhado verde - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

4.3.3 Estratégia 3 - Pavimento Fresco

O efeito da aplicação da estratégia 3 - pavimento fresco, pode ser observado nas figuras 25 e 26, a seguir.

4.3.3.1 Temperatura do ar

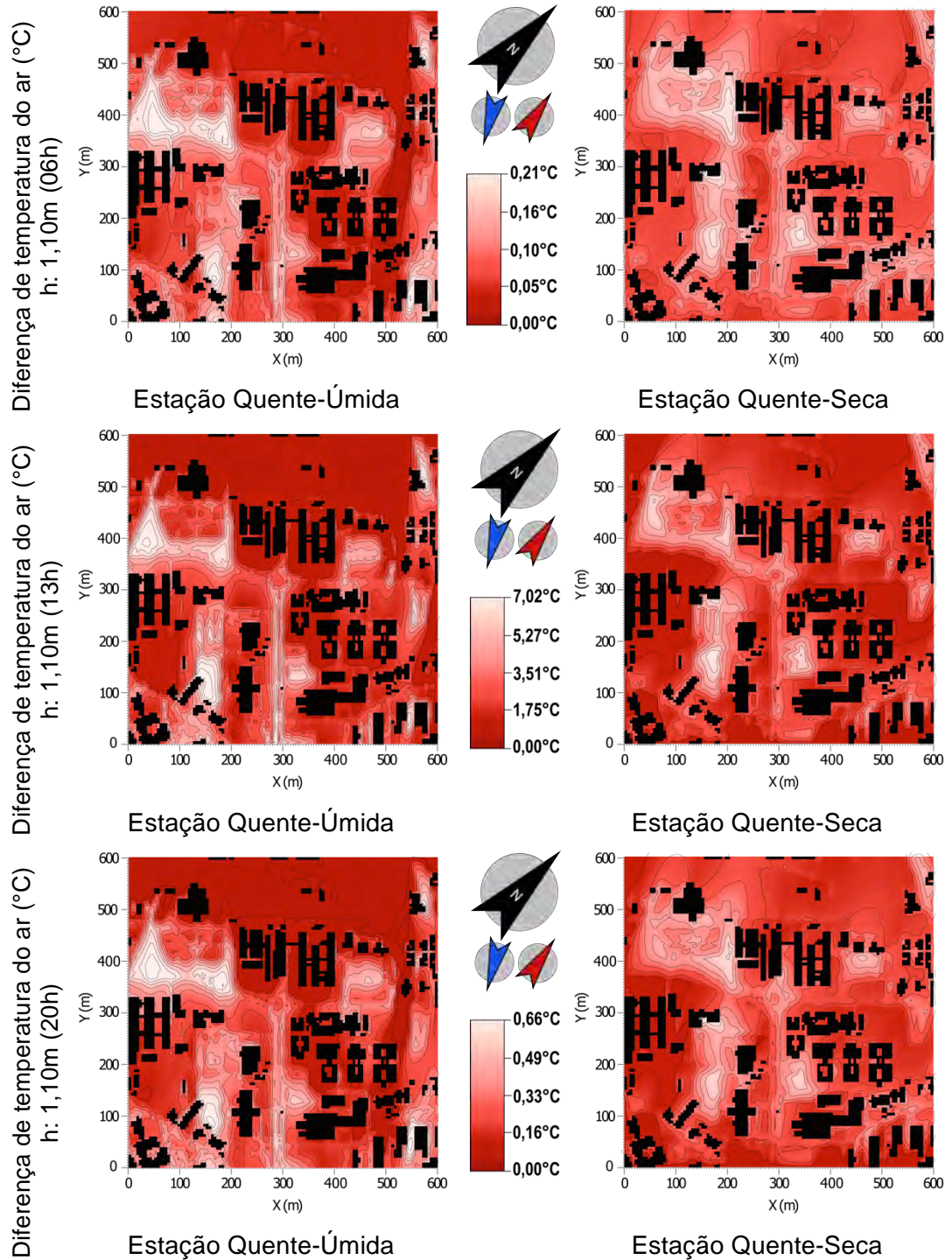


Figura 25 – Efeito da adoção da estratégia 3 - pavimento fresco - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

Para a estratégia pavimentos frescos, em todos os horários analisados pelos mapas térmicos é identificado o efeito marcado de redução da temperatura do ar nas extensas áreas de estacionamento presentes no campus da UFMT e vias de acesso adjacentes.

Para o horário matutino (6h), a redução na temperatura média do ar do espaço considerado alcança $0,04^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e $0,08^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Pontualmente estes valores são ligeiramente mais expressivos, registrando redução de $0,15^{\circ}\text{C}$ pontualmente para estação úmida e $0,21^{\circ}\text{C}$ para a estação seca.

Para o horário vespertino (13h), o efeito é mais evidente, chegando à uma redução na temperatura média da área de $1,20^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e de $1,94^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Pontualmente este efeito é mais elevado, chegando a registrar uma redução de até $5,72^{\circ}\text{C}$ para estação úmida e até $7,02^{\circ}\text{C}$ na estação seca.

Para o período noturno (20h), o efeito também é marcado nas área de vias de acesso e estacionamento. A redução na temperatura média alcança $0,11^{\circ}\text{C}$ no período úmido e $0,21^{\circ}\text{C}$ no período seco. A redução pontual atinge até $0,54^{\circ}\text{C}$ no período úmido e até $0,66^{\circ}\text{C}$ no período seco.

De forma similar à estratégia 1, o efeito da aplicação de pavimentos frescos também apresenta efeito mais evidente durante horário de sol a pino, em resposta à variação no valor de albedo, que resulta por refletir maior quantidade de energia térmica.

Apesar de demonstrar o efeito de forma mais marcada em relação às áreas dos pavimentos, é possível observar a influência da ventilação, principalmente na estação seca, às 6h e 20h. Nestes horários é apresentado um espalhamento horizontal, a sotavento, que carrega o efeito de redução da temperatura do ar para áreas adjacentes à delimitação do estacionamento.

Shahidan (2012), em estudo conduzido em Persiaran, Malásia, encontrou valores de redução da temperatura do ar de $2,7^{\circ}\text{C}$, usando pavimentos frescos (albedo 0,8).

Synnefa (2006), descreve valores de redução, durante o verão, de até 4°C para o período diurno e até 2°C para o período noturno, fazendo uso de material reflexivo com albedo 0,75.

As diferenças encontradas na literatura, mais uma vez, devem-se possivelmente à variações entre os experimentos, podendo ser devido à diferentes condições climáticas, diferentes valores de albedo (antes ou depois do experimento), entre outros.

4.3.3.2 Umidade relativa do ar

Os efeitos da incorporação do telhado verde na variável umidade relativa do ar (%) podem ser observados na figura 26, a seguir.

De forma similar à verificada nos outros cenários apresentados, as regiões que apresentam maior aumento no valor da umidade relativa do ar coincidem com as regiões que tiveram a temperatura do ar reduzida pela aplicação da estratégia.

Para o período matutino (6h), o efeito de aumento da umidade relativa do ar registra valores médios para a área de 0,34% para a estação úmida e 0,25% para estação seca. Pontualmente, o aumento da umidade relativa do ar atinge até 0,79% para o período úmido e até 0,47% para o período seco.

Para o período vespertino (13h), o impacto da estratégia alcança o valor médio de 9,76% a mais de umidade relativa do ar (%) para estação úmida, e 9,34% para estação seca. Pontualmente este valor é de 13,75% para o período úmido, enquanto no período seco é encontrado um aumento de 12,03% para esta variável.

Para o período noturno (20h), foi observado um aumento na umidade relativa média da área de 0,90% para o período úmido, e 0,79% para o período seco. Pontualmente, este aumento foi de até 2,32% na estação úmida e até 1,36% na estação seca.

Nos três horários analisados, o efeito mais pronunciado da aplicação de pavimentos frescos foi na estação úmida, registrando valores superiores de aumento de umidade relativa do ar, quando comparada à estação seca.

Assim como descrito para a temperatura do ar, o efeito da estratégia fica mais pronunciado nas áreas ocupadas pelos estacionamentos e vias de acesso da UFMT, em todos os horários e estações. No entanto, no horários do início (6h) e do final do dia (20h) é possível identificar que a área demarcada pela influência da estratégia cresce em dimensão, por conta do efeito da ventilação no modelo, principalmente na estação seca, expandindo o aumento da umidade relativa do ar para as áreas próximas aos estacionamentos e vias de acesso.

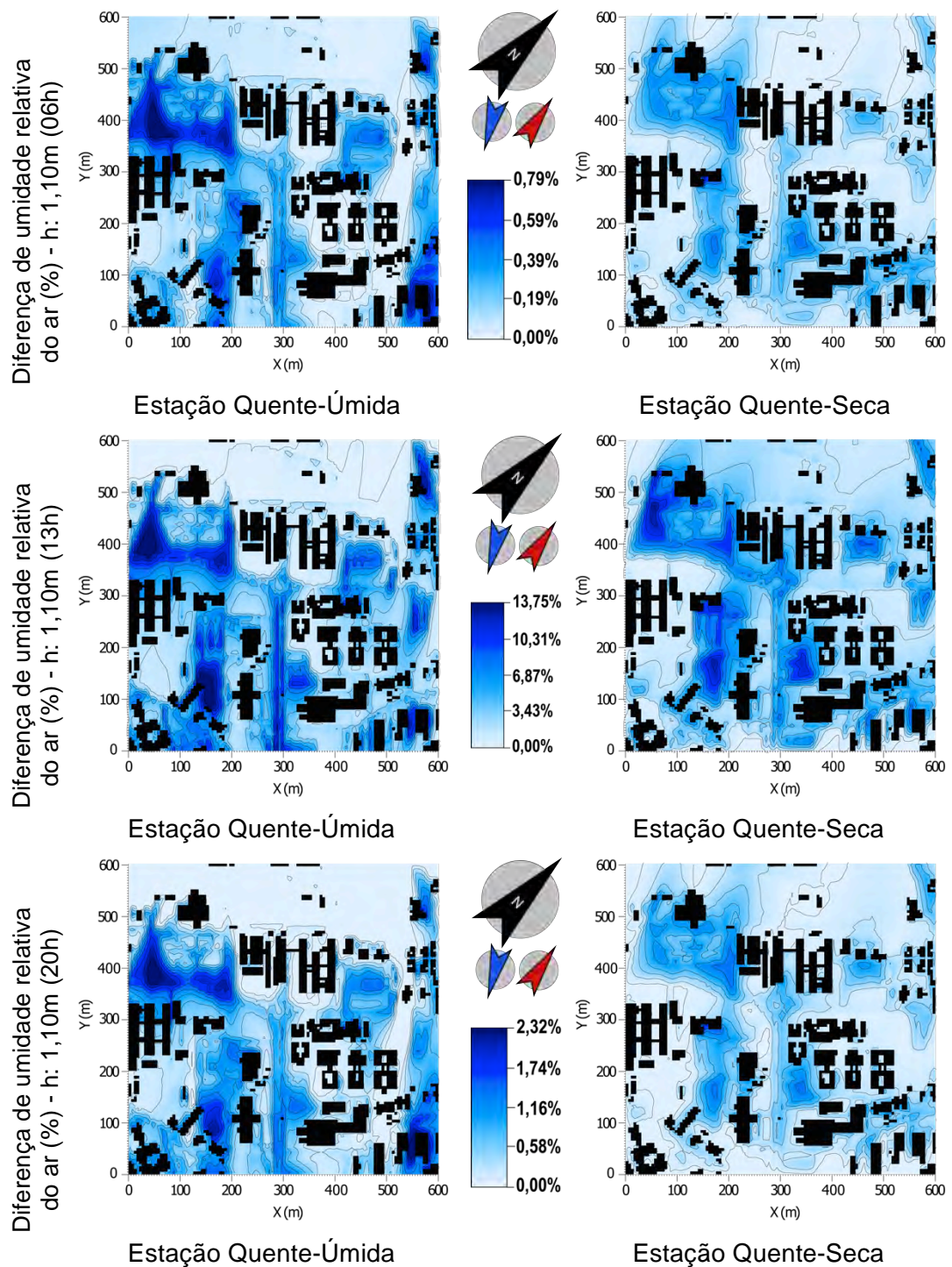


Figura 26 – Efeito da adoção da estratégia 3 - pavimento fresco - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

4.3.4 Estratégia 4 - Incremento de áreas verdes

O efeito da aplicação da estratégia 4 - incremento de áreas verdes, pode ser observado nas figuras 27 e 28, a seguir.

4.3.4.1 Temperatura do ar

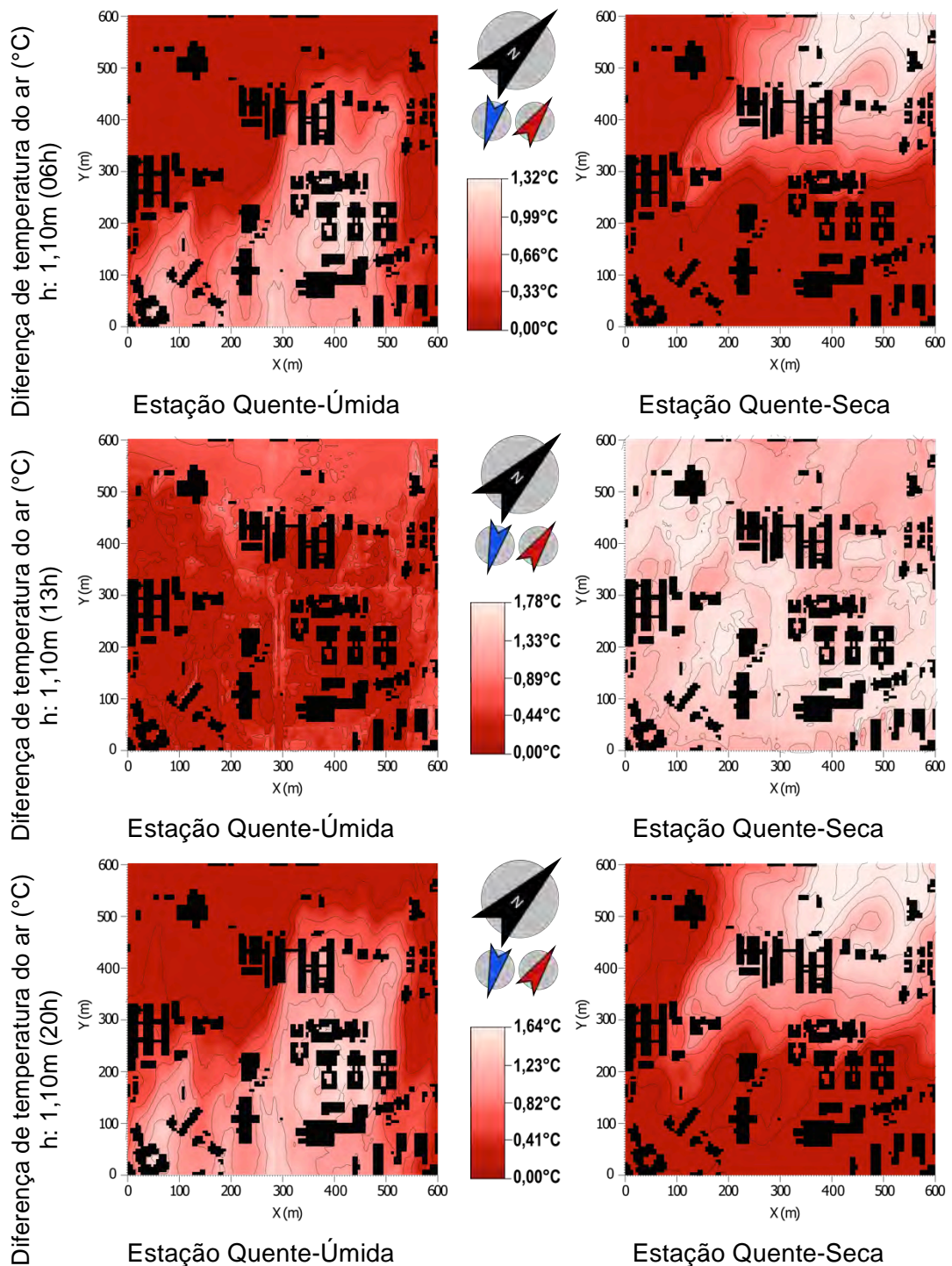


Figura 27 – Efeito da adoção da estratégia 4 - incremento de áreas verdes - sobre a temperatura do ar (°C) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

Para a estratégia incremento das áreas vegetadas, o mapa cromático evidencia, para o período matutino (6h), alterações expressivas na temperatura do ar, registrando uma diminuição na temperatura média da área de 0,11°C para o período úmido e 0,19°C para o

período seco. Pontualmente esta diminuição foi de até $1,15^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e até $1,32^{\circ}\text{C}$ para o período seco.

Observa-se que, as variações espaciais de temperatura dentro de cada área estão diretamente relacionadas à direção predominante dos ventos, para cada estação analisada. Desta forma, é destacada a concentração do efeito a sotavento, na região sul da área de estudo durante período úmido e região norte/nordeste durante estação seca.

Às 13h o efeito do incremento das áreas verdes é bastante diluído, não apresentando concentração do efeito em regiões delimitadas como nos outros horários. É apresentado uma tonalidade um pouco mais clara, devido ao efeito dos ventos, que resulta em um ligeiro aumento do efeito na região de entrada de ventilação do modelo.

No horário vespertino, foi registrada uma redução na temperatura do ar média da área de $0,74^{\circ}\text{C}$ para o período úmido e de $1,18^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Em relação aos valores pontuais, o maior resultado visível é confirmado por uma redução na temperatura mais expressiva durante a estação seca, de até $1,78^{\circ}\text{C}$, em comparação com a estação úmida, que apresentou redução pontual de até $1,12^{\circ}\text{C}$.

No período noturno (20h), é observado um comportamento similar ao verificado às 6h, quando é a concentração do efeito é concentrada na região sul da área de estudo durante período úmido e região norte/nordeste durante estação seca.

Para este período, as reduções na temperatura média da área atingem $0,33^{\circ}\text{C}$ para o período úmido, e $0,53^{\circ}\text{C}$ para o período seco. Pontualmente, a variável temperatura do ar sofre uma redução de até $1,36^{\circ}\text{C}$ durante a estação úmida, e até $1,64^{\circ}\text{C}$ durante a estação seca.

Estes valores encontrados estão em consonância com experimentos similares, como desenvolvido por Shinzato (2009), que analisou o efeito da vegetação nas condições microclimáticas urbanas, estudando diferentes formas de distribuição das áreas verdes na cidade. A autora demonstrou que, em relação à intensidade do efeito da vegetação, a diferença média entre as temperaturas do ar nas áreas verdes arborizadas e as ruas adjacentes chega a $1,5^{\circ}\text{C}$.

Já Wong et al. (2007) encontraram valores mais elevados, com uma diferença de até 4°C na redução da temperatura do ar quando incrementada a quantidade de vegetação.

Assim como nas outras estratégias, é preciso atenção ao comparar os valores descritos por outros autores, devido ao fato de existirem diversas formas de variação e aplicação possíveis de uma mesma estratégia, resultando em valores diferentes para uma determinada área de estudo e condição climática considerada.

4.3.4.2 Umidade relativa do ar

Os efeitos da incorporação do telhado verde na variável umidade relativa do ar (%) podem ser observados na figura 28, a seguir.

Durante o período matutino, medido às 6h, o mapa cromático apresenta diferenças expressivas devido ao incremento de áreas verdes. Observam-se as manchas azuis destacadas, que assinalam o aumento de umidade relativa do ar a sotavento, com valores médios de 1,42% para o período úmido e 1,95% para o período seco. De maneira localizada, o efeito é mais intenso, registrando 8,25 para estação úmida e 8,17% para estação seca.

Às 14h, de forma similar à variável temperatura de ar, é observado um efeito mais diluído, ou seja, menos marcado pela influência do vento do que nos outros horários. Foi identificado um aumento de umidade relativa média, na área como um todo, de 3,88% para o período úmido e 5,32% para o período seco. Pontualmente, esse efeito marcou 7,6% de aumento de umidade para a estação úmida e 7,61% para estação seca.

Durante o período noturno, o efeito é similar ao início do dia (6h), ou seja, o efeito da estratégia é marcado claramente pelas manchas de cor azul, com formato e extensão influenciado pela ventilação do modelo, tanto no período úmido, como no período seco.

Para este horário, a magnitude do efeito foi um aumento de 1,08% e 1,48% na umidade relativa média, para as estações úmida e seca, respectivamente. De forma localizada, o efeito foi mais expressivo, registrando 7,92% para o período úmido e 8,19% de aumento no valor na variável para o período seco.

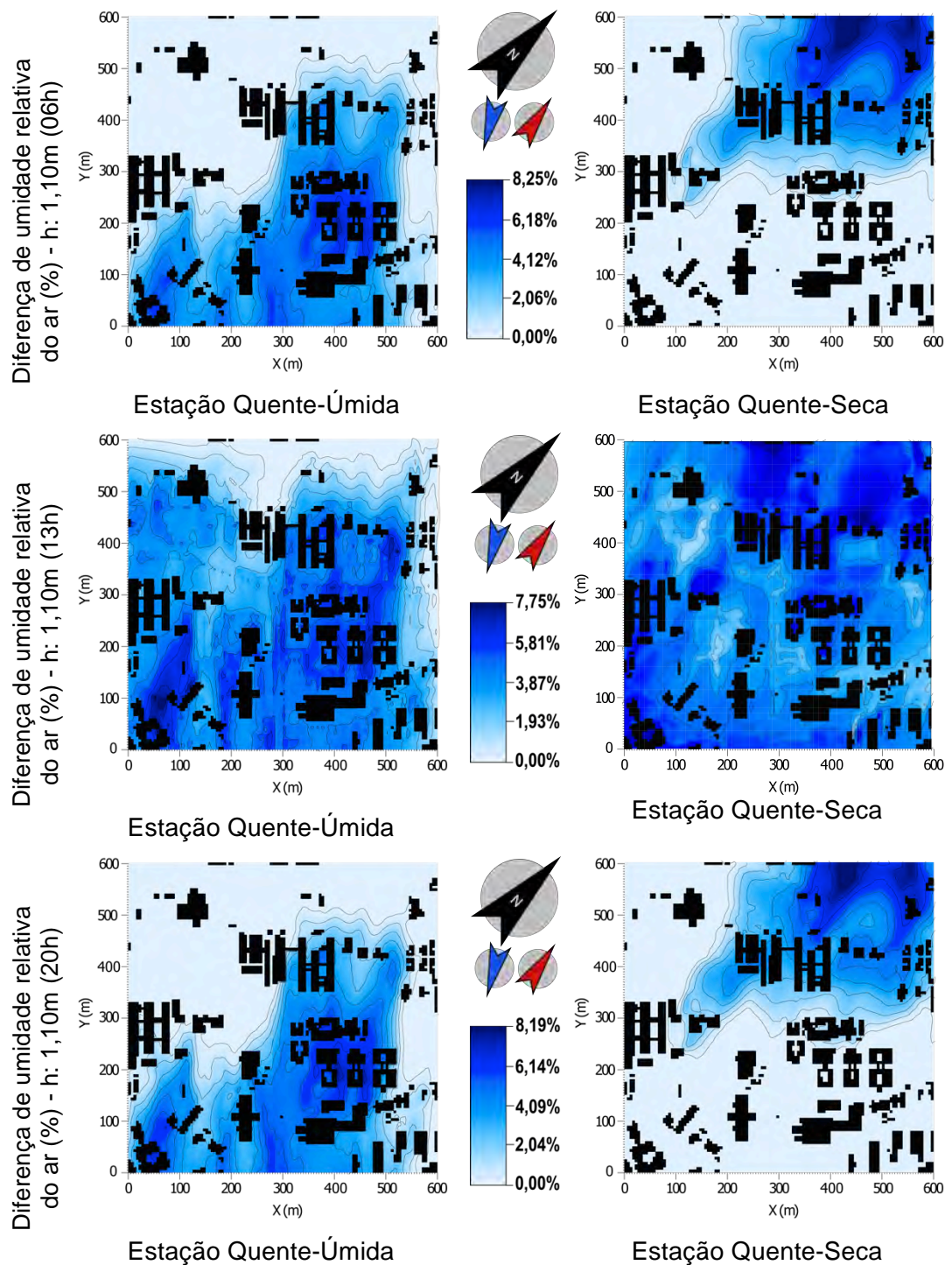


Figura 28 – Efeito da adoção da estratégia 4 - incremento de áreas verdes - sobre a umidade relativa do ar (%) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,1m do solo

4.4 COMPARAÇÃO DOS EFEITOS DAS ESTRATÉGIAS

A seguir, será avaliado, de forma comparativa, o efeito de cada estratégia, para as variáveis estudadas, em cada uma das estações climáticas.

Para isso, foram desenvolvidos gráficos descrevendo o comportamento horário de cada estratégia ao longo do dia. Os valores representam o efeito médio que determinada estratégia apresentou, ou seja, seu impacto sobre o valor médio da variável considerada, para todos os pontos da área de estudo, ao longo do dia.

4.4.1 Temperatura do ar

4.4.1.1 Estação quente-úmida

O efeito das diferentes estratégias de mitigação de ilha de calor sobre a temperatura do ar, durante a estação quente-úmida, pode ser observado a seguir, na figura 29.

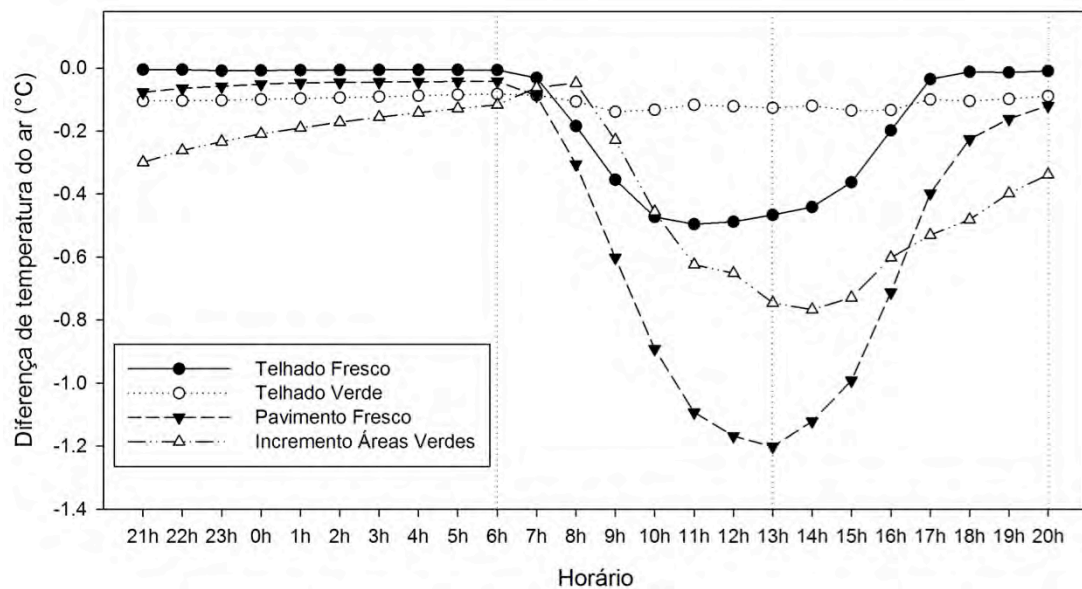


Figura 29 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a temperatura média do ar, estação quente-úmida, ao longo do dia

Todas as estratégias avaliadas na presente pesquisa, apresentaram redução, em maior ou menor grau, na temperatura média da área de estudo durante o período úmido.

Para as 6h, o cenário que apresentou maior redução na temperatura média foi o que incorporava maior quantidade de áreas verdes, a estratégia 4, com 0,11°C.

Já no período vespertino (13h), todos os cenários apresentaram aumento no efeito de redução de temperatura, com exceção da estratégia 2, que mantém seu valor praticamente constante ao longo das 24h.

Neste horário, a estratégia que apresentou maior redução, na temperatura do ar, foi a estratégia 3, uso de pavimentos frescos, com média de 1,2°C de redução na temperatura média da área de estudo, durante o período úmido. Os outros cenários apresentam redução média de 0,46°C, para o uso de telhado fresco (estratégia 1), 0,12°C para o uso de telhado verde (estratégia 2) e 0,74°C para o incremento de áreas verdes (estratégia 4).

No período noturno (20h), a estratégia que apresentou maior redução, na temperatura média da área em estudo, foi a estratégia incremento de áreas vegetadas, com 0,33°C.

4.4.1.2 Estação quente-seca

O efeito das diferentes estratégias de mitigação de ilha de calor sobre a temperatura do ar, durante a estação quente-seca, pode ser observado a seguir, na figura 30.

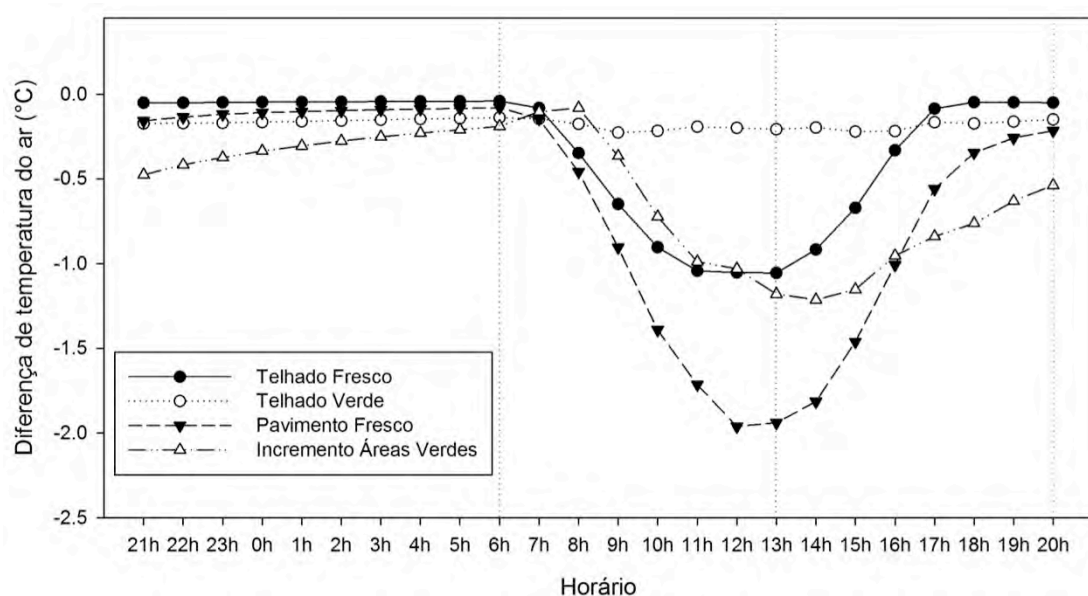


Figura 30 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a temperatura média do ar, estação quente-seca, ao longo do dia

Todas as estratégias avaliadas na presente pesquisa, apresentaram redução, em maior ou menor grau, na temperatura média da área de estudo durante o período seco. Para este período, em geral, é observada uma dinâmica parecida com a estação úmida, porém com valores mais elevados de redução na temperatura do ar.

Para o horário de 6h, a estratégia que apresentou maior redução também foi a estratégia 4 - incremento de áreas verdes, com 0,19°C.

No período vespertino, observa-se o maior efeito apresentado pela estratégia 3 - pavimentos frescos, com redução de 1,94°C na temperatura média da área. A estratégia de telhados fresco apresentou redução de 1,05°C, enquanto que, as estratégias de telhado verde e incremento de áreas verdes, apresentaram, 0,20°C e 1,18°C.

No período noturno (20h), a estratégia que apresentou maior redução, na temperatura média da área em estudo, foi a estratégia incremento de áreas vegetadas, com 0,53°C. Os outros cenários apresentam redução média de 0,05°C, para o uso de telhado fresco (estratégia 1), 0,20°C para o uso de telhado verde (estratégia 2) e 0,21°C para o uso de pavimentos frescos (estratégia 3).

É preciso lembrar também que, estes resultados são influenciados, diretamente, pela composição da área de estudo selecionada. O maior efeito de redução da temperatura média do ar, ao longo do dia, durante os dois períodos estudados foi registrado pela estratégia 3 - pavimentos frescos, com 1,20°C no período úmido (13h) e 1,96°C (12h) para o período seco.

Este resultado pode dever-se ao fato de, no caso da presente pesquisa, a área selecionada para o estudo possui 34,9% da superfície ocupada por pavimentos impermeáveis, o que pode ter resultado em um efeito maior verificado para esta estratégia.

A área de telhados, usados para implantação da estratégia 1, por sua vez, ocupa 18,8% e as áreas verdes, usadas para implantação da estratégia 4, possuem 17% da superfície total da área de estudo.

Observou-se também, uma tendência das estratégias que utilizam materiais frescos, em apresentarem um efeito mais expressivo durante as horas com presença de radiação solar (7h-17h), tendo o valor do seu efeito reduzido a quase zero após o pôr do sol.

Já para as estratégias fazendo uso de vegetação, foi identificado uma dinâmica menos marcada temporalmente, mantendo, inclusive, seu efeito resfriativo ao longo das 24h, como o caso da estratégia 4 (incremento de áreas vegetadas).

4.4.2 Umidade relativa do ar

4.4.2.1 Estação quente-úmida

O efeito das diferentes estratégias de mitigação de ilha de calor sobre a umidade relativa do ar, durante a estação quente-úmida, pode ser observado a seguir, na figura 31.

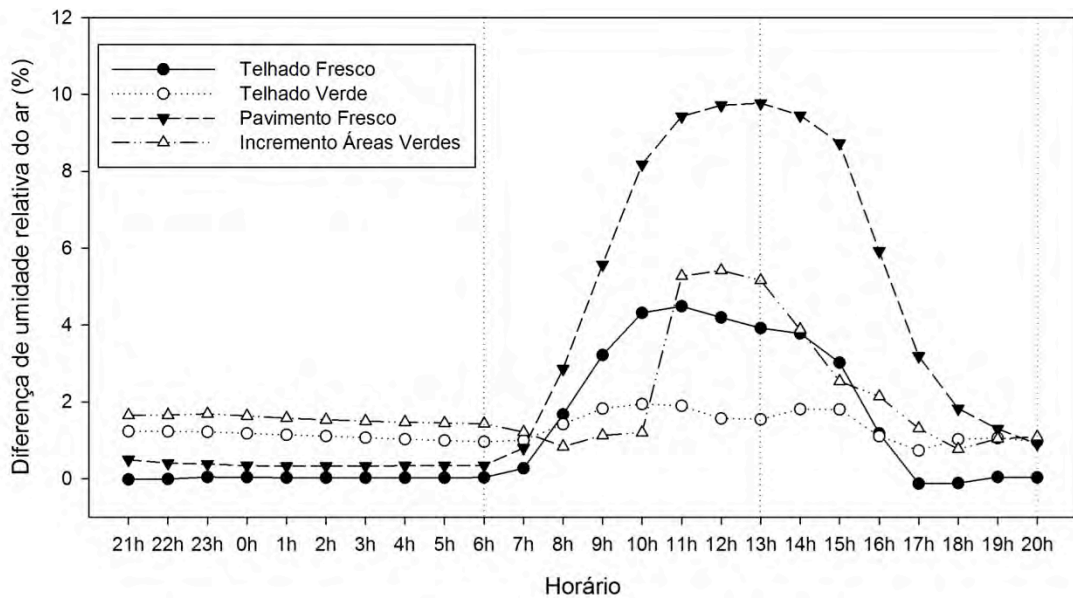


Figura 31 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a umidade relativa média do ar, estação quente-úmida, ao longo do dia

Todas as estratégias avaliadas na presente pesquisa, apresentaram aumento, em maior ou menor grau, na umidade relativa média da área de estudo durante o período úmido.

Para as 6h, o cenário que apresentou maior aumento na umidade relativa do ar, para o período úmido, foi o que incorporava maior quantidade de áreas verdes, a estratégia 4, com 1,42%.

Já no período vespertino (13h), todos os cenários apresentaram aumento no efeito de umidificação da área. Neste horário, a estratégia que apresentou maior aumento no valor da umidade relativa do ar, foi a estratégia 3, uso de pavimentos frescos, com média de 9,76%, durante o período úmido. Os outros cenários apresentam aumento médio de 3,91%, para o uso de telhado fresco (estratégia 1), 1,54% para o uso de telhado verde (estratégia 2) e 5,15% para o incremento de áreas verdes (estratégia 4).

No período noturno (20h), foi registrado um aumento pouco expressivo, sendo o maior valor registrado pelo incremento de áreas vegetadas, com 1,08%.

4.4.2.2 Estação quente-seca

O efeito das diferentes estratégias de mitigação de ilha de calor sobre a umidade relativa do ar, durante a estação quente-seca, pode ser observado a seguir, na figura 32.

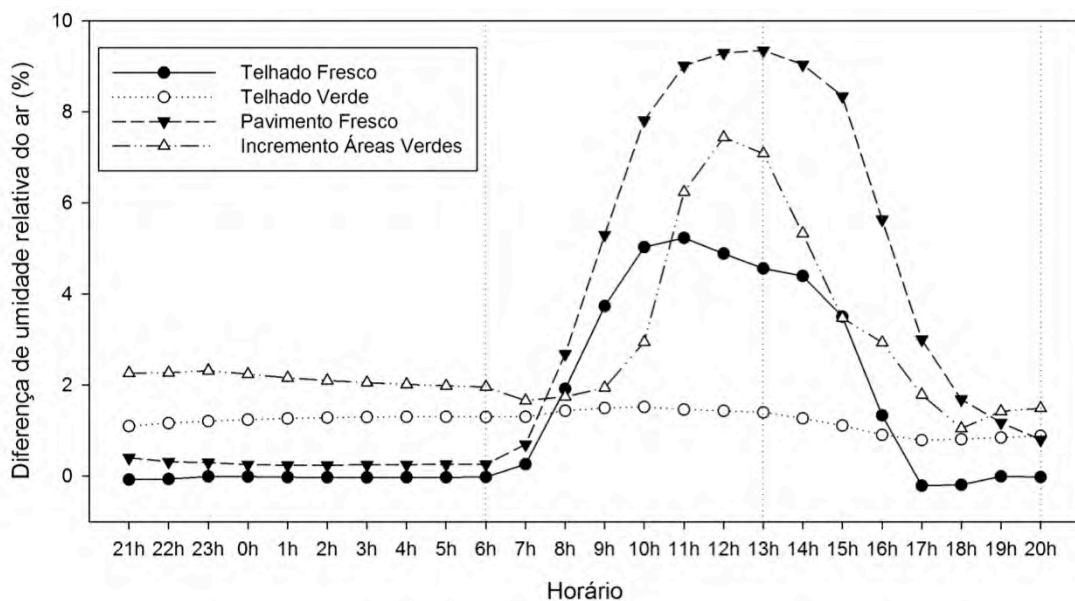


Figura 32 – Comparação entre estratégias do efeito sobre a umidade relativa média do ar, estação quente-seca, ao longo do dia

Todas as estratégias avaliadas na presente pesquisa, apresentaram aumento, em maior ou menor grau, na umidade relativa média da área de estudo durante o período seco.

A dinâmica do efeito de aumento da umidade relativa do ar, durante a estação seca, apresenta similaridades com o efeito durante a estação úmida, porém, registrando valores inferiores deste efeito.

Para às 6h, o cenário que apresentou maior aumento na umidade relativa do ar, para o período seco, foi o que incorporava maior quantidade de áreas verdes, a estratégia 4, com 1,95%.

Já no período vespertino (13h), todos os cenários apresentaram aumento no efeito de umidificação da área. Neste horário, a estratégia que apresentou maior aumento no valor da

umidade relativa do ar, foi a estratégia 3, uso de pavimentos frescos, com média de 9,34%. Os outros cenários apresentam aumento médio de 4,55%, para o uso de telhado fresco (estratégia 1), 1,39% para o uso de telhado verde (estratégia 2) e 7,08% para o incremento de áreas verdes (estratégia 4).

No período noturno (20h), foi registrado um aumento pouco expressivo, sendo o maior valor registrado pelo incremento de áreas vegetadas, com 1,48%.

Observou-se que, os maiores efeitos de aumento umidade relativa do ar, foram registrados nos pontos onde houve maior efeito de redução da temperatura do ar.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que a porção urbana do campus da UFMT mostrou-se adequada para o desenvolvimento do estudo, oferecendo condição de incorporação das estratégias avaliadas. O mesmo foi reproduzido adequadamente no software ENVI-met, comprovado pela consonância entre os resultados gerados pelo modelo para o cenário de referência.

O software ENVI-met revelou-se uma ferramenta poderosa para o estudo do microclima urbano, que, após etapas de validação, permitiu a simulação de cenários hipotéticos para análise de diferentes propostas de modificações visando a mitigar os efeitos das ilhas de calor nos espaços abertos.

Todas as estratégias avaliadas apresentaram efeitos sobre a temperatura do ar (redução) e umidade do ar (aumento), em maior ou menor grau, durante as duas estações climáticas consideradas. Isto ressalta o potencial de aplicação destas estratégias como forma de mitigação de ilhas de calor.

O maior efeito de redução da temperatura média do ar, ao longo do dia, durante os dois períodos estudados foi registrado pela estratégia 3 - pavimentos frescos, com 1,20°C no período úmido (13h) e 1,96°C (12h) para o período seco. Este resultado, porém, deve ser lido no contexto da área de estudo, que possui uma composição de 34,9% de superfícies impermeáveis, passíveis, portanto, da aplicação desta estratégia.

O mesmo resultado foi encontrado para a variável umidade relativa do ar, que teve o maior efeito verificado também na estratégia 3. Foram registrados valores de aumento de 9,76% para o período úmido e de 9,34% para o período seco.

Quando comparado o desempenho das estratégias avaliadas nesta pesquisa, com valores encontrados na literatura, é preciso considerar não só o tipo de estratégia, como

também as variações nos parâmetros utilizados para implantação e o contexto climático no qual está inserido.

Observou-se, por parte das estratégias que utilizam materiais frescos, a maior intensidade do efeito durante as horas com presença de radiação solar, enquanto que estratégias que utilizam vegetação não têm seu efeito limitado somente à este período.

Espera-se que com os resultados desta pesquisa, o estudo do conforto ambiental para o estado do Mato Grosso e da região Centro-Oeste seja enriquecido, atentando para o papel das estratégias de mitigação de ilhas de calor como agentes amenizadores do rigor climático imposto pelo clima das cidades de porte médio, como é o caso de Cuiabá.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A pesquisa realizada neste trabalho é uma contribuição para a linha de pesquisa da Análise Microclimática de Sistemas Urbanos, de forma a disseminar tanto o uso do software ENVI-met como ferramenta de previsão microclimática, como o uso de estratégias para a mitigação de ilhas de calor para a cidade de Cuiabá.

Desta forma, recomenda-se investigar com maior detalhe as seguintes questões:

a) Estudo mais aprofundado acerca do comportamento de estratégias utilizando materiais frescos, explorando variações resultantes de diferentes valores de albedo e seu efeito em diferentes alturas;

b) Investigar o impacto que as estratégias descritas podem vir a ter na temperatura do interior das edificações;

c) Investigar qual seria o impacto se considerada a aplicação das estratégias de forma combinada, como por exemplo, telhado fresco juntamente com incremento de áreas verdes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

6.1 BIBLIOGRAFIAS CITADAS

ALVES, E. D. L. **Caracterização Microclimática do Campus de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso**. Cuiabá, 2010. 91 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

ANDERSON, D. R.; SWEENEY, D. J.; WILLIAMS, T. A. **Estatística aplicada à administração e economia**. 2ed, São Paulo: Thomson Learning, 2007.

ANDRADE, H. O Clima Urbano – Natureza, Escalas de Análises e Aplicabilidade. **Finesterra – Revista Portuguesa de Geografia**, Lisboa, v. XL, n.80, 2005. Disponível em: <http://www.ceg.ul.pt/finisterra/numeros/2005-80/80_05.pdf>.

ASAEDA, T.; CA, V. T. **Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere**. *Atmospheric Environment*. v. 30, p. 413-427, 1996.

ASSIS, E. S. Aplicações da climatologia urbana no planejamento da cidade: revisão dos estudos brasileiros. **Revista de Arquitetura e Urbanismo**, v.9, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220- 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social**. Rio de Janeiro, 2005.

AYOADE. J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. 9 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2003.

BARBIRATO, G. M.; SOUZA, L. C. L. ; TORRES, S. C.; **Clima e cidade – Abordagem climática como subsídio para estudos**. EdUfal, 2007.

BRUSE, M., H. FLEER. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environ. Modell. Softw.** 13, 373-384, 2008.

CAMPOS NETO, A. A. **Estudo bioclimático no campus da Universidade Federal de Mato Grosso.** Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – UFMT, Cuiabá, 2006.

CARFAN, A.C. **Análise do conforto térmico em áreas abertas no município de Ourinhos- SP.** 2011. F. Tese (Doutorado) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo, 2011.

CECÍLIO, R. A., & PRUSKI, F. F. Interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas com uso do inverso de potências da distância. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 7(3), 501-504, 2003.

CUIABÁ. Prefeitura Municipal de Cuiabá / **Perfil Socioeconômico dos Bairros de Cuiabá.** IPDU – Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. Cuiabá: 2007.

CUIABÁ. Prefeitura Municipal de Cuiabá / **Plano Diretor de Desenvolvimento Estratégico de Cuiabá.** IPDU – Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. Adriana Bussiki Santos (Org.) Cuiabá, MT: Entrelinhas, 2008.

CUIABÁ. Prefeitura Municipal de Cuiabá / **Evolução Urbana de Cuiabá.** IPDU – Instituto de Planejamento e Desenvolvimento Urbano. Cuiabá, 2010.

DA SILVA, G. G. C., DE SOUZA, J. R. S., DA SILVA, S. N. R., COHEN, J. C. P., DE SOUZA, E. B., & DOS SANTOS, A. P. P. Estimativas da radiação de onda longa incidente sobre floresta tropical úmida do leste da Amazônia. In **11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society**, 2009.

DINIZ, G. L. ; FONSECA, M. ; CAMPELO JÚNIOR, J. H. . **Análise harmônica do regime de precipitação em duas localidades da baixada cuiabana.** Biomatemática (UNICAMP), v. 18, p. 37-48, 2008.

DUARTE, D. H. S. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental**. Tese (Doutorado em Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

DUARTE, D. H. S.; SERRA, G. G. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental brasileira: correlação e proposta de um indicador. **Ambiente Construído**. v.3, n.2, p.7-20, abr./jun.2003. ISSN 1415-8876. Porto Alegre, 2003.

D'SOUZA, U. J. **The thermal performance of green roofs in the hot, humid microclimate**. Dissertation (MSc Sustainable Design of the Built Environment), Faculty of Engineering & IT. British University of Dubai, 191p, 2012.

EMMANUEL, R.; ROSENLUND, H.; JOHANSSON, E. **Urban shading: A design option for the tropics? A study in Colombo, Sri Lanka**. *Int. J. Climatol*. v. 27, p1995–2004, 2007.

FRANCISCO, R.C.A. **Clima urbano: um estudo aplicado a Belo Horizonte, MG**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Escola de Arquitetura da UFMG, 2012.

GARCÍA, M. C. M. **Climatologia Urbana**. Barcelona: Universitat de Barcelona, Textos Docents – 160p, 1999.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**, Applied Science Publishers, London, 2nd. 1976.

GONÇALVES, C.E.C. **Ruas confortáveis, ruas com vida - Proposição de diretrizes de desenho urbano bioclimático para vias públicas**. Dissertação – Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília, 2009.

HEISLER, G. M. Energy savings with trees. **J. Arboricult**. 12, 113–25, 1986.

HUANG, H. C., Seasonal simulation of tropospheric ozone over the midwestern and northeastern United States: An application of a coupled regional climate and air quality modeling system, **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, 46, 945-960. 2008.

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Censo Demográfico**: Brasil, Rio de Janeiro, 2010.

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - **Síntese de indicadores sociais**: Brasil, Rio de Janeiro, 2012.

INMET -: Instituto Nacional De Meteorologia. **Climatologia**. 2003. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/html/clima.php>. Acesso em: 03/11/2010.

ISO 7726. **Ergonomics of the thermal environment – Instruments for measuring physical quantities**. Geneva, 1998.

JOHANSSON, E. **Urban design and outdoor thermal comfort in warm climates**. – studies in Fez and Colombo, 2006. Thesis (PhD in architecture), Housing Development & Management, Lund University, Sweden, 2006.

JUSUF, S. K. **Development Of Estate Level Climate Related Impact Assessment Framework And Air Temperature Prediction Within Urban Climatic Mapping Method In Singapore**, 2009. Thesis (PhD in Buildings), National University of Singapore, 2009.

KOLOKOTRONI, M., GOWREESUNKAR, B.L., GIRIDHARAN, R. (2013). Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. **Journal of Energy and Buildings** 67 pp 658-667, 2013.

KOLOKOTSA, D., MARAVELAKI-KALAITZAKI, P., PAPANTONIOU, S., VANGELOGLOU, E., SALIARI, M., KARLESSI, T. & SANTAMOURIS, M. Development and analysis of mineral based coatings for buildings and urban structures, **Solar Energy**, vol. 86, no. 5, pp. 1648-1659, 2013.

KOLOKOTSA, D., TSOUTSOS, T. & PAPANTONIOU, S. Energy conservation techniques for hospital buildings, **Advances in Building Energy Research**, vol. 6, no. 1, pp. 159-172, 2012.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. Nova York: Academic Press, 1981.

LOMBARDO, M. **Ilha de calor nas metrópoles**. São Paulo: Hucitec, 1985.

MACIEL, C. R. **Análise da relação entre características do ambiente urbano e comportamento de variáveis microclimáticas: Estudo de caso em Cuiabá-MT**. 127f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

MAITELLI, G.T. **Uma abordagem tridimensional de clima urbano em área tropical continental: o exemplo de Cuiabá-MT**. 1994. 220f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.

MASCARÓ, L. **Ambiência Urbana**. 1 ed. Porto Alegre: Sagra – DC Luzzatto, 1996.

MENDONÇA, R.S.R. de; ASSIS, E.S. **Conforto térmico urbano: estudo de caso do bairro Floresta de Belo Horizonte – MG**. In: Ambiente Construído, Porto Alegre, v.3, n.3, p. 45-63, jul./set. 2003.

MINELLA, F.C.O. **Avaliação da influência de aspectos da geometria urbana sobre os níveis de conforto térmico em ruas de pedestres de Curitiba**. Dissertação – Mestrado em Tecnologia – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: Universidade de São Paulo, Série Teses e Monografias, n.25 – 1976.

MONTEIRO, C. A. F.; MENDONÇA, F. **Clima urbano**. São Paulo: Contexto, 2003.

MOURA, R. G.; HERDIES, D. L.; MENDES, D.; MENDES, M. C. D. Avaliação do modelo regional et utilizando as análises do CPTEC e NCEP. **Rev. bras. meteorol.**, São Paulo , v. 25, n. 1, Mar. 2010.

MURAKAMI, P.F.; TURNER, M.R.; VAN DEN BERG, A.K.; SCHABERG, P.G. **An Instructional Guide for Leaf Color Analysis Using Digital Imaging Software.** USDAFS, Northeastern Research Station: Newtown Square, PA, 2005, p. 37.

NAKATA, C. M. **Comportamento do Pedestre e Ambiente Térmico Urbano**, 2010. 132p. Dissertação (Mestrado em Design) – Programa de Pós-graduação Stricto-sensu em Design, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2010.

NERY, J. **Temperatura do ar e padrões de ocupação em Salvador.** In: VI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 05 a 07 de novembro de 2003, Curitiba-PR. Anais do VII ENCAC; 2003.

NICODEMO, M. L. F.; PRIMAVERSI, O. **Por que manter árvores na área urbana?** – Dados eletrônicos. – São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2009.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** Londres: Methuen, 1978.

OKE, T. R. Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. **Journal of Climatology**, v.1, 1981.

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

OKE, T. R. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites. In: **Air Pollution Modeling and its Application XVII**, Borrego, C. and A. L. Norman (eds), Springer, 2004.

OKE, T. R. Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. **IOM Report, TD.** World Meteorological Organization, Geneva, 2006.

ONU – **Organização das Nações Unidas. Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas**, 2008. Disponível em: <<http://www.ipcc.com/>>. Acesso em: 21 set. 2010.

ONU – Organização das Nações Unidas. Quinto Relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, 2012. Disponível em: <<http://www.ipcc.com/>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

ONG, B. L. Green plot ratio: an ecological measure for architecture and urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 63, n. 4, p197-211, 2003.

ORLANSKI, I. Rational subdivision of scales for atmospheric process. **Bull. Amer. Met. Soc.**, v.56, 1975.

PENG, L. L. H.; JIM, C. Y. Green-Roof Effects on Neighborhood Microclimate and Human Thermal Sensation. **Energies**, v. 6, n. 2, p598-618, 2013.

PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; ABREU, S. L.; COUTO, P.; STUHLMANN, R.; COLLE, S. Effects of burning of biomass on satellite estimations of solar irradiation in Brazil. **Solar Energy**, V. 68 (1), p. 91- 107, 2000.

PEZZUTO, C. C.; LABAKI, L. C.; FRANCISCO FILHO, L. L. Conforto térmico nos espaços urbanos abertos: a morfologia urbana e a relação com as condições climáticas. In: **VII ENCAC e 3ª Conferência Latino-Americana Sobre Conforto E Desempenho Energético De Edificações**, 2003, Curitiba.

PRIMAVESI, O.; ARZABE, C.; PEDREIRA, M. S. **Aquecimento global e mudanças climáticas: uma visão integrada tropical**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2007.

ROBINSON, S.C.; LAKS, P.E.; TURNQUIST, E.J. A Method for Digital Color Analysis of Spalted Wood Using Scion Image Software. **Materials** 2009, 2, 62-75.

ROMEO, C. ZINZI, M. Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study. **Energy and Buildings**, p 647-657, 2013.

ROMERO, M. A. B.; *Princípios Bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo, Proeditores, 1988.

ROMERO, M. A. B. - *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. São Paulo:

Projeto, 2000, 2ª edição, 128 p.

ROSSETI, K.A.C. **Efeitos do uso de telhados vegetados em ilhas de calor urbanas com simulação pelo software ENVI-Met**. 2013. 273f. Tese (Doutorado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.

SAILOR, D.J.; FAN, H. Modeling the diurnal variability of effective albedo for cities. *Atmos. Environ.*, v.36, p.713-725, 2002.

SANTAMOURIS, M.; ASIMAKOPOULOS, D. N. *Energy and Climate in the urban built environment*. London: James & James, 2001, 402p.

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*, v5. 3085-3102, 2011.

SANTOS, I. G. Influencia da geometria urbana e da inércia térmica na alteração do clima urbano: uma abordagem preditiva. In: **VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 05 a 07 de novembro de 2003, Curitiba-PR. Anais do VII ENCAC; 2003.

SANTOS, R. .; COSTA, L. C.; SEDIYAMA, G. C.; LEAL, B. G.; OLIVEIRA, R. A.; JUSTINO, F. B. Avaliação da relação seca/produtividade agrícola em cenário de mudanças climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(2), 313-321, 2011.

SILVA, J. A. *Crescimento Populacional e Ocupação Recente em Mato Grosso*. Artigo científico, CEDEPLAR/UFMG, Belo Horizonte, 2000.

SILVA, C. F. **Caminhos bioclimáticos - Desempenho ambiental de vias públicas na cidade de Teresina - PI**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura), UnB, 2009.

SHAHIDAN, P.J. JONES, J. GWILLIAM, E. SALLEH An evaluation of outdoor and building environment cooling achieved through combination modification of

trees with ground materials. **Building and Environment**, 58 (0) (2012), pp. 245–257, 2012.

SHINZATO, P. **Impacto da Vegetação nos Microclimas Urbanos**. São Paulo, 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SOUZA, L. C. L. **Influência da Geometria Urbana na Temperatura do Ar ao Nível do Pedestre**. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. (Tese de Doutorado). São Carlos, 1996.

SYNNEFA, A. SANTAMOURIS, M. APOSTOLAKIS. On the development, optical properties and thermal performance of cool colored coatings for the urban environment. **Solar Energy**, v81, p488-497, 2006.

STONE, R.J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**. v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.

ULGEN K., HEPBASLI A. Diffuse solar radiation estimation models for Turkey's big cities. **Energy Conversion and Management** 50: 149–156, 2009.

UNGER, J. *Intra-urban relationship between surface geometry and urban heat island: review and new approach*. **Clim Res**, v. 27, p. 253–264, 2004.

WATKINS, R. KOLOKOTRONI, M. **The London Urban Heat Island – upwind vegetation effects on local temperatures**. PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture, 2012.

WONG, N.H. JUSUF, S. K. WIN, A. A. L. XUCHAO, W. Environmental study of the impact of greenery in an institutional campus in the tropics. **Building and Environment**, v42, 2949-2970, 2007.

6.2 BIBLIOGRAFIAS CONSULTADAS

BARBIRATO, G. M. ; MATTOS, A. . Análise do conforto térmico em ambientes urbanos através da aplicação de modelo climático de balanço de energia. In: *XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM, 1999*, Águas de Lindóia - SP. Anais do COBEM 99. Águas de Lindóia : COBEM, 1999.

CALLEJAS, I. J. A. ; DURANTE, L. C. ; MACIEL, C. R. ; NINCE, P. C. C. ; NOGUEIRA, M. C. J. A. . Padrões de uso do solo urbano e suas implicações microclimáticas em ambiente escolar. In: DE MUSIS, C. R.; NOGUEIRA, M. C. J. A. (Org.). **Contribuições ao estudo de conforto ambiental e sistemas urbanos na grande Cuiabá-MT**. 1 ed. Cuiabá: EdUNIC, v. 2, p. 67-82, 2010.

CAMPOS NETO, A. A. ; MACIEL, C. R. ; SANTOS, F. M. M. ; OLIVEIRA, A. S. ; DURANTE, L.C. ; NOGUEIRA, M. C. J. A. . **Análise macroclimática em função da ocupação do solo em região de clima tropical continental**. Engenharia Ambiental (UNIPINHAL), v. 6, p. 1-10, 2009.

CAVALCANTI, F. A. M. S. ; BARBIRATO, G. M. . Avaliação da qualidade climática de espaços de uso público em União dos Palmares, na Zona da Mata alagoana. In: **Eco Building - Fórum Internacional de Arquitetura e Tecnologias para a Construção Sustentável**, 2008, São Paulo. Eco Building Anais, 2008.

CORREIA, W. F. B. ; BARBIRATO, G. M. . Avaliações De Estratégias Bioclimáticas Presentes Na Arquitetura Habitacional Unifamiliar Do Trópico Úmido: A Casa Aldeia Verde Em Maceió - AL. In: **XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Entac 2010**, 2010, Canela - RS. Anais do III Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído - Entac, 2010.

OLIVEIRA, P.M.P. **Cidade apropriada ao clima: a forma urbana como instrumento de controle do clima urbano**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 1988.

RORIZ, M.; BARBUGLI, R. A. Mapeamento e análise de Micro-climas Urbanos. In: **VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído**, 05 a 07 de novembro de 2003, Curitiba-PR. Anais do VII ENCAC; p. 592-599, 2003.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, 2000.