

AValiação DO IMPACTO DO USO DE SUPERFÍCIES FRIAS EM ESPAÇOS URBANOS POR MEIO DO SOFTWARE ENVI-MET

Carolina de Rezende Maciel (1); Karyna de Andrade Carvalho Rosseti (2); Flávia Maria de Moura Santos (3); José de Souza Nogueira (4); Marta Cristina de Jesus Albuquerque Nogueira (5);

(1) PhD, Arquiteta e Urbanista, arq.carolinamaciel@gmail.com

(2) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, karyna.rosseti@gmail.com

(3) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, flavia_mms@hotmail.com

(4) PhD, Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, nogueira@ufmt.br

(5) PhD, Professora do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, mcjanp@gmail.com

Universidade Federal de Mato Grosso, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Instituto de Física
Avenida Fernando Corrêa s/n, Cuiabá-MT, 78060-900, Tel.: (65) 3615 8000

RESUMO

O objetivo deste artigo é avaliar o impacto do uso de superfícies frias no ambiente térmico de espaços urbanos a partir de simulações computacionais com o software ENVI-met por meio do estudo de caso do campus da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado em Cuiabá-MT. A aplicação das superfícies frias foi avaliada em dois cenários hipotéticos, considerando seu uso em telhados (*cool roof*) e pavimentos (*cool pavement*), que tiveram seus valores de temperatura do ar comparados com o cenário de referência. O método consistiu em três etapas: fase preparatória (aquisição e compilação de dados), fase de simulação numérica (modelagem no software ENVI-met) e validação do modelo e calibração dos dados, para análise comparativa. Como resultado, foi registrada uma diferença na temperatura do ar de até 7,02°C (pontualmente) e de até 1,94°C (média), quando adotado o uso de superfícies frias sob forma de pavimento. Já para aplicação de superfície fria na cobertura, foi registrada uma diferença de até 3,52°C (pontualmente) e de até 1,05°C (média). Pode-se inferir, portanto, que, para a definição da estratégia mais adequada para mitigação de ilhas de calor em determinado local, é preciso considerar, além do tipo da estratégia, a composição da área existente, pois esta será determinante no resultado final obtido.

Palavras-chave: superfícies frias, telhado, pavimento, ENVI-met, temperatura do ar.

ABSTRACT

The purpose of this paper is to evaluate the impact of using cool surfaces in the thermal environment of urban spaces, with ENVI-met computer simulations through the case study of the campus of the Federal University of Mato Grosso, located in Cuiabá-MT. The application of cool surfaces was evaluated in two hypothetical scenarios, considering its use on roofs (*cool roof*) and pavements (*cool pavement*), which air temperature values were compared to the reference scenario. The method consisted of three stages: preparatory phase (data acquisition and compilation), numerical simulation stage (modeling in ENVI-met software) and model validation and calibration, following a data comparative analysis. As a result, was found a difference in air temperature up to 7.02 °C (at the point) and up to 1.94 °C (average) when used the cool surfaces as pavement. As roof, the use of cool surfaces resulted in a difference of up to 3.52°C (at the point) and up to 1.05 °C (average). It can be inferred, therefore, for specification of the most appropriate strategy to mitigate heat islands in a certain place, is needed to consider the composition of the existing area, once this will have high influence in the resultant thermal environment.

Keywords: Cool surfaces, roof, pavement, ENVI-met, air temperature.

1. INTRODUÇÃO

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 outros recursos.

Recortando para a América Latina, de acordo com dados da ONU-Habitat (2012), 80% da população ocupam áreas urbanas. No Brasil, este contingente soma cerca de 87% da população, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2012). Em termos de projeção, estima-se que, para o ano de 2050, 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, crescimento este que será absorvido, principalmente, por países em desenvolvimento (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.

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 às obstruções locais (OKE, 1978; SOUZA, 1996).

Estas características dos materiais usualmente encontrados em meio urbano são a principal causa das ilhas de calor urbanas, conceito que tem por definição o registro de temperaturas mais elevadas em espaços urbanos em comparação com suas regiões vizinhas menos urbanizadas. Em cidades de clima tropical este fenômeno pode ter consequências negativas como, por exemplo, desconforto térmico experimentado pelos habitantes e consequente aumento do consumo de energia para alcançar condições de conforto dentro das edificações (uso de condicionadores de ar), acarretando em impactos financeiros e ambientais elevados.

Desta forma, 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, dentre as quais está o uso de superfícies frias (*cool materials*) como revestimentos em pavimentos e telhados, afirma Gartland (2010).

Superfícies frias são coberturas e revestimentos externos que, de acordo com Santamouris (2011), têm seu comportamento diferenciado em relação aos materiais urbanos principalmente em virtude de duas propriedades: alta refletância solar (albedo, geralmente acima de 0,6) 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.

Trata-se de um tema atual, explorado mais profundamente em estudos desenvolvidos em países da Europa e da América do Norte. Os benefícios e potencial de economia destes materiais em regiões tropicais começou recentemente a ser investigado, levando ao lançamento, em março deste ano, do Consórcio Brasileiro de Superfícies Frias, iniciativa que reúne empresas, universidades e entidades setoriais com o objetivo de pesquisar as propriedades, além de desenvolver metodologias para a avaliação de desempenho dos materiais e sistemas construtivos usados com esse propósito. Neste artigo serão discutidos resultados de um estudo de caso que avaliou o impacto do uso de superfícies frias na cidade de Cuiabá-MT.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o impacto do uso de superfícies frias no ambiente térmico de espaços urbanos a partir de simulações computacionais com o software ENVI-met por meio do estudo de caso do campus da Universidade Federal de Mato Grosso, localizado em Cuiabá-MT.

3. MÉTODO

Para avaliação do impacto do uso de superfícies frias na área de estudo por meio de simulação com o software ENVI-met, foi modelado um cenário real (características atuais) e adicionalmente dois cenários hipotéticos. Nestes cenários hipotéticos foi considerado o uso de superfícies frias na forma de telhado (*cool roof*) e pavimento (*cool pavement*). O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Fase preparatória, que abrangeu os passos necessários para aquisição dos dados e informações para preparação dos arquivos a serem simulados, sendo elas: definição e caracterização da área de estudo e medição *in loco* das variáveis microclimáticas e variáveis espaciais, considerando condicionantes do software a ser utilizado para a simulação, ENVI-met.

2. Fase de simulação numérica, que englobou a composição, dentro do software ENVI-met, dos arquivos de área (situação atual e cenários hipotéticos considerando a estratégia de uso de superfícies frias) e de configuração das condições micrometeorológicas (para estações características de Cuiabá, quente-seca e quente-úmida).

3. Validação do modelo e calibração dos dados: Para validar o 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). 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.

3.1. Fase preparatória

O estudo foi conduzido na cidade de Cuiabá (figura 1a), capital do estado de Mato Grosso, 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).

3.1.1. Definição da área de estudo

A definição da área a ser simulada no software ENVI-met obedeceu às seguintes condicionantes, a saber: apresentar baixa variação topográfica, dimensões compatíveis com o software e possuir elementos passíveis de aplicação das estratégias a serem estudadas.

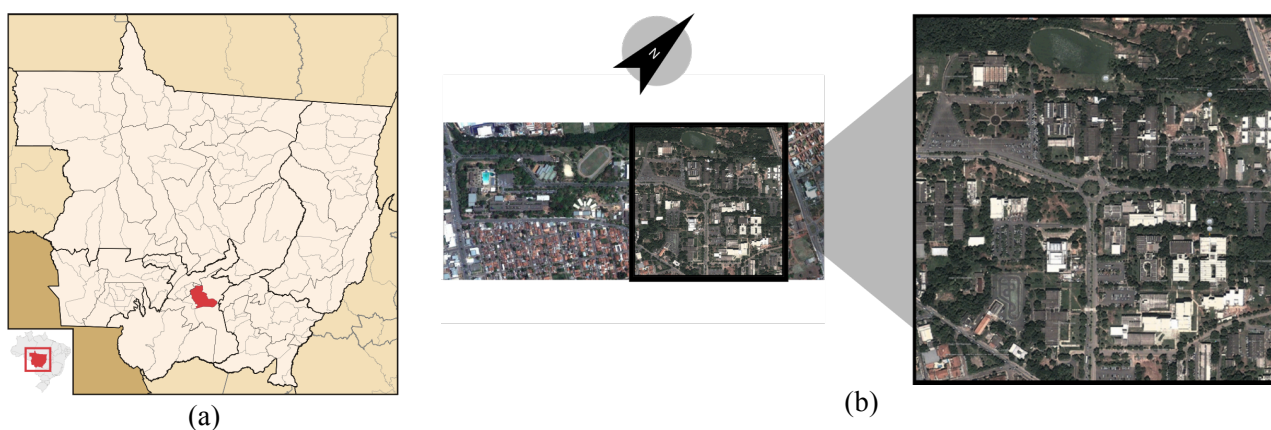


Figura 1 – (a) Localização de Cuiabá em Mato Grosso; (b) Área selecionada para simulação no software ENVI-met
Fonte: Adaptado de Wikipédia (2015) e Google Earth (2014)

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

Em relação à dimensão da área a ser simulada, a versão do software ENVI-met utilizada neste estudo (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 permitiu cobrir uma área de 600mx600m. Valores maiores de grid (5x5m, por exemplo), simplificaria demais o desenho e valores menores de grid (1x1m, por exemplo) limitaria em muito as dimensões da área total a ser simulada.

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. 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 1b, compreendendo um total de 36ha.

3.1.2. Medição das variáveis microclimáticas

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, disponível 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 (frequência 1h em 1h) de 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 (Onset modelo U30 Wi-Fi) fixada acima do telhado a uma altura aproximada de 7,00 m, pertencente ao Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, inserida dentro do campus da Universidade Federal de Mato Grosso, em Cuiabá-MT. Esta estação fixa forneceu dados, a frequência de 5 minutos em 5 minutos, de temperatura do ar (°C) utilizados na etapa de calibração dos dados.

A determinação do intervalo de tempo 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

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.



Figura 2 – Caracterização da área em software CAD.



Figura 3 – Modelo da área de estudo no software ENVI-met.

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. Adicionalmente, foram identificados detalhes, como por exemplo altura das edificações, por meio de visitas *in loco*. A definição dos valores de albedo para as diferentes categorias baseou-se no trabalho de Sailor e Fan (2002).

Em seguida, uma imagem com alta resolução, tal como a figura 1, (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, resultando na figura 2.

Esta figura serviu para inserção das informações da área de estudo dentro do modelo da área no software ENVI-met, conforme figura 3.

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 1.

Tabela 1– Contabilização das áreas das superfícies que constituem a área de estudo.

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

Para a caracterização arbórea da área de estudo foi adotada a metodologia de Watkins & Kolokotroni (2012), que utilizaram o software Scion Image©, que trabalha com a interpretação dos tons de cinza da imagem (figura 4 e figura 5). 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).



Figura 4 – Fragmento da área de estudo.

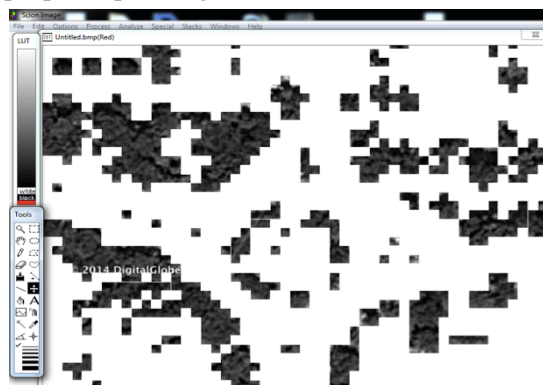


Figura 5 – Análise do fragmento por meio do Scion Image©.

3.2. Fase de simulação numérica

Os experimentos de simulação com o software ENVI-met realizados para a área de estudo selecionada tiveram o objetivo de analisar o efeito que o uso de superfícies frias tem sobre a temperatura do ar no espaço urbano. Foram definidas duas formas de adoção desta estratégia, o cenário 1, onde o uso é feito na cobertura (*cool roof*) e o cenário 2, onde o uso é feito na área de pavimentos (*cool pavement*).

3.2.1. Configuração dos arquivos de entrada

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 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). 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 pela 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 Ig para o mesmo horário (w/m²), 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 avaliação do impacto da adoção de superfícies frias na área de estudo, inicialmente é necessário a modelagem do cenário real, contendo as características encontradas na área de estudo. Em seguida, foram simulados dois cenários hipotéticos, com a aplicação de superfícies frias, de acordo com valores usualmente encontrados para a forma de telhado e pavimento, descritos por Gartland (2010). O impacto é calculado, portanto, pela diferença de temperatura entre o cenário atual e cada cenário hipotético.

1. Cenário 1 - Estratégia telhado (*Cool roof*): Para esta estratégia, 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 67.731,25m², constituindo 18,8% da superfície total. A estratégia de utilização de superfícies frias 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 como superfície fria).

2. Cenário 2 - Estratégia pavimentos (*Cool pavement*): Para esta estratégia, 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 telhado, 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 superfície fria) e albedo das superfícies asfálticas, passando de 0,05 (valores descritos por Oke, 1987), para 0,80 (condição superfície fria).

3.3. Calibração do modelo - análises de sensibilidade

Para validar o 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, enquanto que os dados gerados pelo software foram registrados através de 5 sensores dispostos nas proximidades do bloco, dentro do ambiente virtual ENVI-met. Foi calculado o valor médio horário de temperatura do ar (°C) destes 5 sensores, para a altura de sete metros.

Tabela 2 - 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

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, conforme Tabela 2.

Desta forma, foram plotados em um gráfico de dispersão os dados estimados X dados observados, resultando nos indicadores de desempenho apresentados na tabela 3.

Tabela 3 - Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met para 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

Observa-se que, o valor do R², apresenta-se acima de 0,95 para os dois períodos do ano, demonstrando que o modelo ENVI-met simulou adequadamente a dinâmica da variável em estudo para os períodos definidos, comprovado também pelos indicadores de desempenho apresentados.

A fim de possibilitar a inferência a partir dos dados estimados, é necessária a correção dos dados gerados pelo software por meio do ajuste por meio de equações de calibração. Para tal, foram comparados, 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 respectivos indicadores de desempenho são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Indicadores de desempenho do modelo ENVI-met para 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

Desta forma, foram definidas as equações de calibração (Equação 1 e Equação 2) a seguir para corrigir os valores nos dados de saída das variáveis simuladas, para os dois períodos estudados.

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

Onde:

T_u representa a temperatura do ar ajustada para o período úmido (°C)

t_u a temperatura do ar estimada pelo modelo - período úmido (°C)

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

Onde:

T_s representa a temperatura do ar ajustada para o período seco (°C)

t_s a temperatura do ar estimada pelo modelo - período seco (°C)

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados serão expostos por meio de mapas cromáticos, do efeito de cada estratégia, ou seja, os valores apresentados são a diferença entre o cenário com a estratégia aplicada e o cenário de referência. Foram considerados os horários que caracterizam o fenômeno de ilha de calor, ou seja, às 6h para manhã, 13h para tarde e 20h para noite.

Os resultados serão comentados em forma de valor pontual e média geral, já corrigidos por meio das equações de calibração, para os dois períodos. 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.

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.

4.1. Cenário 1 - Telhado como superfície fria

No período matutino (6h) os mapas térmicos (figura 6) não apresentam alterações expressivas na temperatura do ar, registrando uma alteração pontual de 0,04°C para o período úmido e de 0,06°C, para o período seco.

Às 13h o impacto da estratégia 1 é mais pronunciado, registrando uma redução na temperatura média da área de 0,46°C para o período quente-úmido e de 1,05°C para o período quente-seco. Neste horário, o efeito pontual da estratégia chega a reduzir a temperatura em até 3,10°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°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°C para o período úmido e até 0,12°C para o período seco. A ventilação, também neste horário, é responsável por espalhar o efeito ao longo da sua direção predominante.

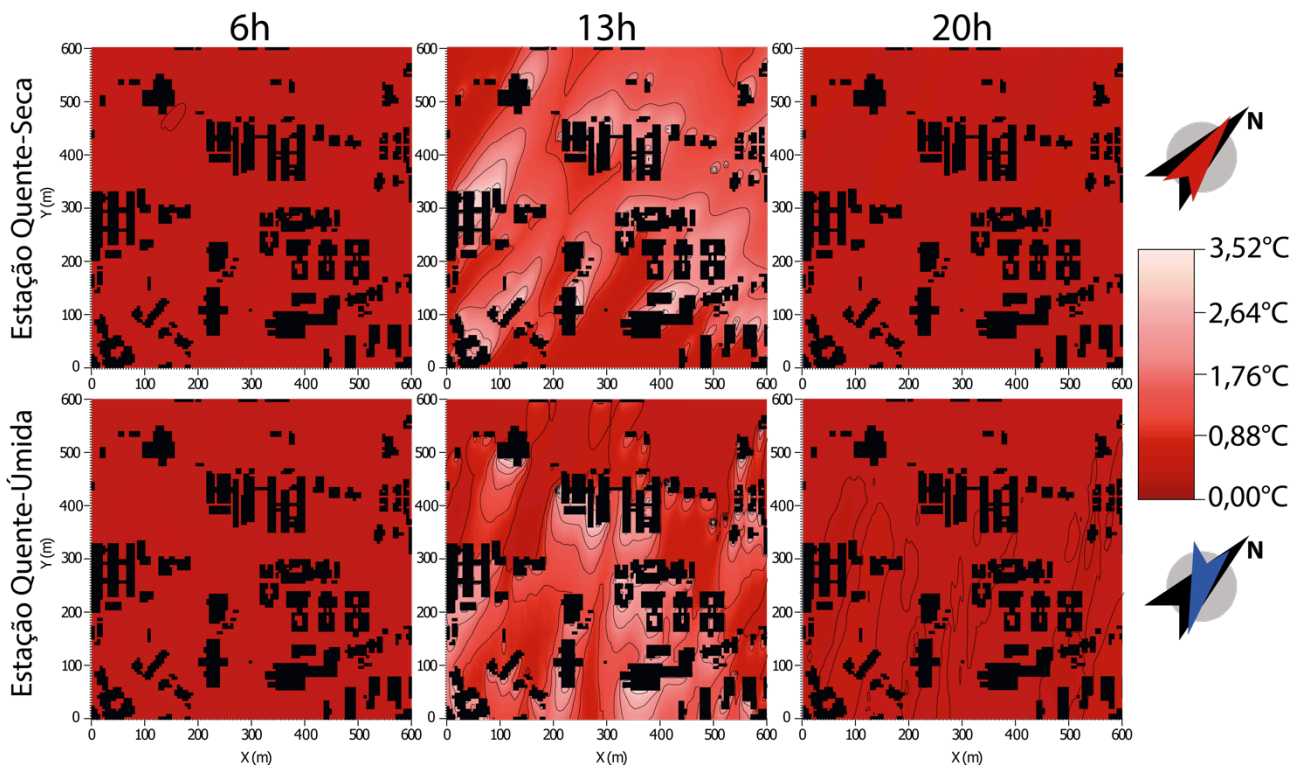


Figura 6 – Telhado como superfície fria - Diferença entre valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,10m do solo

O efeito desta estratégia apresenta valor máximo durante o pico solar (entre 11h-13h), explicado pelo fato desta estratégia atuar como superfície fria, que resultando 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 somente o intervalo marcado pela presença de radiação solar (7h-17h), a estratégia de superfícies frias em cobertura resultou num valor médio de 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 superfícies frias 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). Já Romeo & Zinzi (2012) em estudo abordando o impacto do uso de superfícies frias 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.

4.2. Cenário 2 - Pavimento como superfície fria

Para a estratégia pavimentos, em todos os horários analisados pelos mapas térmicos (figura 7) é identificado o efeito marcado de redução da temperatura do ar nas extensas áreas de estacionamento presentes no campus.

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 seca.

Para o período noturno (20h), o efeito também é marcado nas área de 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 superfícies frias sob forma de pavimentos, 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.

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

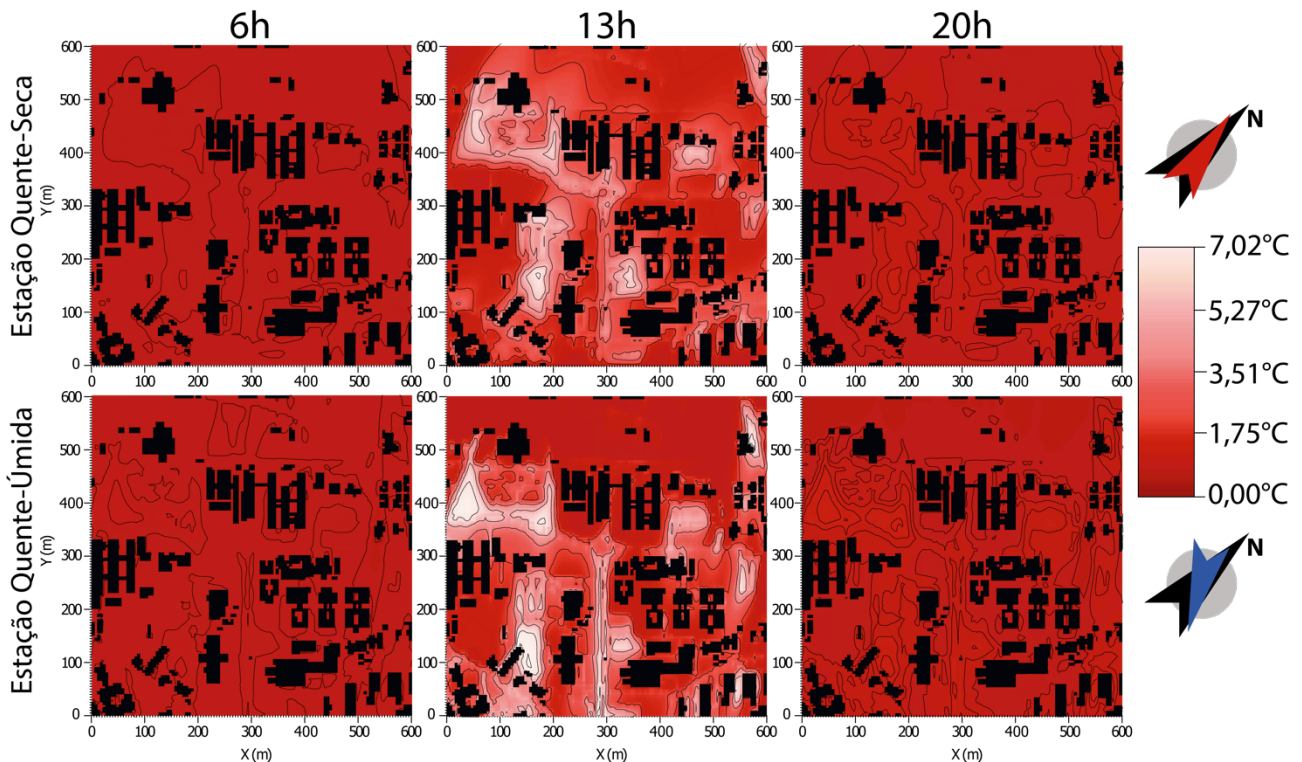


Figura 7 – Pavimento como superfície fria - Diferença entre valores de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) para os períodos seco e úmido, distribuição horizontal a 1,10m do solo

As diferenças encontradas na literatura devem-se, possivelmente, à variações entre os experimentos, podendo ser devido à diferenças na condições climáticas e em valores de albedo (antes ou depois do experimento), área relativa dos elementos passíveis de receberem o tratamento de superfície fria, entre outros.

4.3. Comparativo entre estratégias

A adoção de superfícies frias em meio urbano, avaliada neste trabalho por meio das estratégias telhado e pavimento, apresentaram redução, em maior ou menor grau, na temperatura média da área de estudo tanto durante o período seco quanto durante o período úmido, (figura 8).

Conforme já comentado, devido ao fato das superfícies frias possuírem um valor alto de albedo, seu efeito acompanha de perto o comportamento da incidência solar na área. Desta forma, é registrado o início do efeito ao nascer do sol (por volta de 7h), atingindo a maior diferença logo após o horário de pico solar (entre 12h e 13h) e cessado ao final das horas de luz (por volta de 18h).

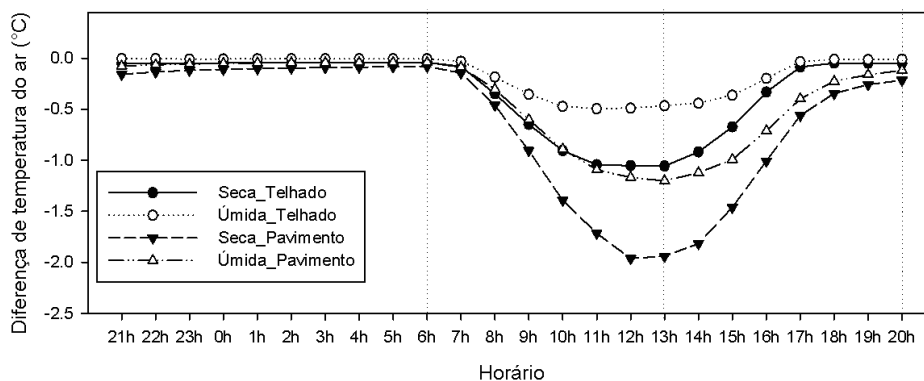


Figura 8 – Gráfico comparativo dos efeitos gerais do uso de superfícies frias, durante os dois períodos estudados

Entre estações, foi observado o maior efeito de resfriamento durante a estação seca, com valores de redução de $1,94^{\circ}\text{C}$ para o caso do pavimento e $1,05^{\circ}\text{C}$ para o caso da estratégia de telhado. Já entre estratégias, foi observado que a estratégia de pavimento como superfície fria ($1,94^{\circ}\text{C}$ e $1,20^{\circ}\text{C}$) resultou em maior redução média que do telhado ($1,05^{\circ}\text{C}$ e $0,46^{\circ}\text{C}$), nas estações seca e úmida, respectivamente. É preciso lembrar também que, estes resultados são influenciados diretamente pela composição da área de

estudo. 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, quando comparado ao efeito da estratégia 1, cuja área de telhados ocupa 18,8% da superfície total.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o software ENVI-met revelou-se uma ferramenta poderosa para o estudo do microclima urbano. A estratégia de uso de superfícies frias se mostrou eficaz em reduzir as temperaturas locais, chegando à uma diferença pontual de até 7,02°C entre o cenário real e o cenário com aplicação de superfícies frias sob forma de pavimento.

Observou-se que a maior intensidade do efeito do uso de superfícies frias foi registrada durante as horas com presença de radiação solar, sendo a estratégia de pavimento foi responsável por uma maior redução na temperatura média do ar, durante os dois períodos climáticos simulados. Este resultado foi condicionado pela composição da área estudada, formada em 34,9% de pavimentos, contra 18,8% de coberturas (telhado).

Pode-se inferir, portanto, que, para a definição da estratégia mais adequada para mitigação de ilhas de calor em determinado local, é preciso considerar, além do tipo da estratégia, a composição da área existente, pois esta será determinante no resultado final obtido.

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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, E. D. L. **Caracterização Microclimática do Campus de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso**. Cuiabá, 91 f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, 2010.
- 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.
- 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.
- GARTLAND, L. **Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas**. São Paulo: Oficina de textos, 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>.
- KOLOKOTRONI, M., GOWREESUNKAR, B.L., GIRIDHARAN, R. Cool roof technology in London: An experimental and modelling study. **Journal of Energy and Buildings** 67 pp 658-667, 2013.
- 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), UFMT, Cuiabá, 2011.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. Londres: Methuen, 1978.
- OKE, T.R. **Boundary layer climates**. 2.ed. New York: Routledge, 1996.
- 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.
- 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.
- 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. 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.
- 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 ground materials. **Building and Environment**, 58 (0) (2012), pp. 245–257, 2012.
- 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.
- 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES (Processo BEX: 1462/12-1) pelas bolsas concedidas que permitiram o desenvolvimento desta pesquisa.