ReGeo ISSN: 2177-3246

# SIMULAÇÃO MICROCLIMÁTICA DO REFLORESTAMENTO COMO ESTRATÉGIA DE MITIGAÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO EM UMA GRANDE ÁREA INSTITUCIONAL DE CUIABÁ, BRASIL

# MICROCLIMATIC SIMULATION OF REFORESTATION AS A STRATEGY FOR THERMAL STRESS MITIGATION IN A LARGE INSTITUTIONAL AREA IN CUIABÁ, BRAZIL

# SIMULACIÓN MICROCLIMÁTICA DE LA REFORESTACIÓN COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO EN UNA GRAN ÁREA INSTITUCIONAL EN CUIABÁ, BRASIL

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-078

**Data de submissão:** 13/07/2026 **Data de publicação:** 14/10/2026

**Maicon Secchi**
Doutorando em Física Ambiental
Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)
E-mail: maiconsecchi@hotmail.com

**Flávia Maria de Moura Santos**
Doutora em Física Ambiental
Instituição: Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)
E-mail: flavia_mms@hotmail.com

## RESUMO

As discussões sobre mudanças climáticas e seu impacto nas áreas urbanas se somam à preocupação de um futuro sustentável. Este estudo, utilizando simulações com o software ENVI-met, avaliou o comportamento microclimático uma área institucional de grande porte na cidade de Cuiabá. Consideraram-se dois períodos climáticos que são característicos da região, um período quente-seco e outro quente-úmido, permitindo analisar a influência da sazonalidade nas variáveis microclimáticas e no conforto térmico. Foi analisado o incremento de áreas reflorestadas como estratégia de mitigação de desconforto. Realizou-se a análise qualitativa e quantitativa do Uso e Ocupação do Solo, com posterior modelagem tridimensional da área e, para aceitação dos modelos, foi feita a análise estatística entre as simulações e as medições de campo, seguido por simulações de cenários correspondentes à situação atual e outra com reflorestamento de uma área próxima de 25% do total da instituição. Compararam-se os cenários através da temperatura do ar, umidade relativa do ar e ITCU. Ficou demonstrado que as condições mais severas acontecem no período quente e seco, sendo que o período quente e úmido apresentou condições mais amenas principalmente pela maior disponibilidade hídrica. O horário das 14h concentrou os resultados críticos, sendo que o reflorestamento promoveu resultados localizados. A distribuição espacial da vegetação arbórea exerceu mais influência no desempenho microclimático do que simplesmente grandes áreas permeáveis ou com vegetação rasteira, principalmente perene. Os resultados reforçam a premissa do potencial da arborização planejada como estratégia de mitigação e adaptação climática em grandes áreas urbanas de clima tropical.

**Palavras-chave:** Biometeorologia. Planejamento Urbano. Infraestrutura Ecológica.

**ABSTRACT**
Discussions regarding climate change and its impact on urban areas are coupled with concerns about a sustainable future. This study used ENVI-met software simulations to evaluate the microclimatic behavior of a large institutional site in the city of Cuiabá. Two climatic periods characteristic of the region—hot-dry and hot-humid—were considered, allowing for an analysis of how seasonality influences microclimatic variables and thermal comfort. The study analyzed the expansion of reforested areas as a strategy to mitigate thermal discomfort. Qualitative and quantitative analyses of land use and land cover were conducted, followed by three-dimensional modeling of the site. Model validation involved statistical analysis comparing simulation results with field measurements. Subsequently, simulations were run for two scenarios: the current situation and a scenario involving the reforestation of an area equivalent to approximately 25% of the institution's total grounds. The scenarios were compared based on air temperature, relative humidity, and the ITCU (Urban Thermal Comfort Index). The results demonstrated that the most severe conditions occur during the hot-dry period, whereas the hot-humid period presented milder conditions, primarily due to greater water availability. Critical results were concentrated at 2:00 PM, and reforestation efforts yielded localized effects. The spatial distribution of tree vegetation had a greater influence on microclimatic performance than simply the presence of large permeable areas or low-lying vegetation (such as ground cover). These findings reinforce the potential of planned tree planting as a strategy for climate mitigation and adaptation in large urban areas within tropical climates.

**Keywords:** Biometeorology. Urban Planning. Ecological Infrastructure.

**RESUMEN**
Las discusiones sobre el cambio climático y su impacto en las áreas urbanas se suman a la preocupación por un futuro sostenible. Este estudio, mediante simulaciones con el software ENVI-met, evaluó el comportamiento microclimático de una gran área institucional en la ciudad de Cuiabá. Se consideraron dos períodos climáticos característicos de la región —uno cálido-seco y otro cálido-húmedo—, lo que permitió analizar la influencia de la estacionalidad en las variables microclimáticas y en el confort térmico. Se analizó el incremento de áreas reforestadas como estrategia de mitigación del disconfort. Se llevó a cabo un análisis cualitativo y cuantitativo del uso y ocupación del suelo, seguido de la modelización tridimensional del área; para validar los modelos, se realizó un análisis estadístico comparando las simulaciones con mediciones de campo. Posteriormente, se simularon escenarios correspondientes a la situación actual y a una reforestación que abarcaba cerca del 25 % de la superficie total de la institución. Los escenarios se compararon mediante la temperatura del aire, la humedad relativa y el ITCU. Se demostró que las condiciones más severas se producen durante el período cálido-seco, mientras que el período cálido-húmedo presentó condiciones más moderadas, principalmente debido a una mayor disponibilidad hídrica. La franja horaria de las 14:00 horas concentró los resultados críticos, observándose que la reforestación generó efectos localizados. La distribución espacial de la vegetación arbórea influyó más en el desempeño microclimático que la simple presencia de grandes áreas permeables o con vegetación rastrera (especialmente perenne). Los resultados refuerzan la premisa sobre el potencial de la arborización planificada como estrategia de mitigación y adaptación climática en grandes áreas urbanas de clima tropical.

**Palabras clave:** Biometeorología. Planificación Urbana. Infraestructura Ecológica.

## 1 INTRODUÇÃO

Mudanças climáticas ganharam espaço nas discussões científicas, políticas e sociais ao redor do mundo nos últimos tempos, tendo como marcadores o aumento de eventos climáticos extremos, como as ondas de calor, períodos de seca prolongada, precipitações intensas e variações de padrões atmosféricos. Os eventos de aquecimento global já começaram a afetar a percepção das pessoas vivendo em ambientes urbanos, aumentando a vulnerabilidade dos centros populacionais frente às climatologias extremas.

No Brasil, os impactos gerados pelas mudanças climáticas já vêm sendo percebidos por regiões distintas do país, com alguns lugares sofrendo com as chuvas intensas, enchentes e outros com a sua falta. Esse cenário se torna particular no centro-oeste do país, quando se considera que, devido ao crescimento urbano e expansão de áreas impermeáveis, aliado ao clima naturalmente quente, surgem ambientes urbanos que proporcionam maiores índices de desconforto térmico.

Dentro desta situação, o estado de Mato Grosso aparece como uma região que apresenta temperaturas elevadas em comparação com o restante do país. Apresentando características de alternância entre uma estação quente e chuvosa, com outra quente e seca, o estado conta com alta incidência de radiação solar e grandes amplitudes térmicas sazonais. Na capital Mato-grossense, Cuiabá, as características climáticas típicas de altas temperaturas e baixos valores de umidade relativa do ar são ampliadas, pela sua posição geográfica.

Assim sendo, cada vez mais se faz necessário o estudo sobre a relação entre os elementos urbanos com as variáveis que interferem na condição microclimática local. É possível que a cobertura vegetal, superficial, densidade construtiva e geometria urbana influenciem nos balanços de energia. Há uma grande quantidade de pesquisas que demonstraram que as áreas vegetadas conseguem diminuir de maneira muito expressiva as temperaturas do ar e da temperatura radiante média através do sombreamento e evapotranspiração, sendo uma das medidas mais simples e eficazes na mitigação do efeito de calor nas cidades.

O 9º Batalhão de Engenharia de Construção (9º BEC), localizado na cidade de Cuiabá, possui áreas relevantes ao estudo da diversidade de uso do solo, com presença de áreas edificadas, pavimentadas e vegetadas, bem como espaços abertos disponíveis para intervenções ambientais. Embora o batalhão seja uma unidade militar, ela conta com elementos semelhantes aos que são encontrados em quaisquer cidades, até mesmo em Cuiabá, tornando-a um lugar adequado para estudos voltados à mitigação de calor em regiões de clima tropical continental.

Considerando todos esses elementos, o objetivo geral deste trabalho consiste no mapeamento e simulação microclimática do 9º BEC durante as estações quente-úmida e quente-seca, utilizando-se

de simulações de modelos com a ferramenta ENVI-met. Junto a essa análise, ainda será realizado um cenário de intervenção no ambiente a partir da simulação do reflorestamento de áreas de terra não são ocupadas pela instituição e não causem problemas de funcionalidade fundamental para o batalhão, sendo esse procedimento realizado a fim de testar a eficiência desta estratégia de mitigação térmica.

Especificamente, busca-se: a caracterização do comportamento espacial das variáveis microclimáticas nos períodos quente-úmido e quente-seco; a comparação dos padrões de temperaturas do ar e umidade relativa e índices de conforto térmico entre os períodos analisados; a simulação do cenário de incremento da cobertura arbórea, a partir da introdução de novas áreas reflorestadas e a quantificação dos efeitos dessa intervenção sobre o ambiente microclimático local.

Dentro do foco da pesquisa, espera-se colaborar com os seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável: ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis; e ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta revisão de literatura destaca o estado atual da arte sobre simulação microclimática urbana, mais precisamente sobre a utilização do software ENVI-met, para embasar os trabalhos de acerca do conforto térmico e da função dos espaços verdes no urbanismo.

### 2.1 MUDANÇAS CLIMÁTICAS, ILHAS DE CALOR E MICROCLIMA URBANO

A mudanças climáticas globais resultam na intensificação de eventos tanto em amplas áreas como em efeitos localizados, como a Ilha de Calor Urbana (ICU), que consiste na ocorrência de um efeito de calor significativamente maior em áreas urbanas em relação circunvizinhas (Faragallah; Ragheb, 2022). O fenômeno ocorre devido à troca de coberturas e superfícies naturais pelos edifícios densamente construídos, áreas pavimentadas, assim como pelas características da morfologia urbana, o que altera o balanço energético, diminui a ventilação e altera completamente os efeitos de sombreamento (De Carvalho et al., 2026).

O aquecimento das cidades provoca inúmeros problemas relacionados à saúde humana, incluindo insolação, desidratação e até aumento de índices de mortalidade. Além disso, o aquecimento urbano tem um efeito negativo na qualidade do ambiente construído, pois eleva a necessidade de refrigeração artificial, aumento do consumo de energia, aumentando os níveis de emissão de gases de efeito estufa. A degradação do microclima também dificulta caminhadas pelas cidades devido ao estresse térmico, o que desestimula a atividade física ao ar livre (Chen, Yunhao et al., 2020; Zheng et al., 2024).

## 2.2 VEGETAÇÃO URBANA COMO INSTRUMENTO DE MITIGAÇÃO TÉRMICA

A vegetação urbana representa um dos melhores mecanismos para lidar com o problema das ICU's, pois existem dois mecanismos principais de ação: o sombreamento e a evapotranspiração (Lopez-Cabeza et al., 2024). O sombreamento impede a radiação de ondas curtas do sol de alcançar as edificações e o solo pela cobertura destas áreas, o que ajuda a diminuir a Temperatura Radiante Média (MRT). A evapotranspiração realiza conversão do calor sensível no calor latente, aumentando a umidade relativa. Ambos mecanismos são imprescindíveis para o cálculo de índices de conforto térmico (Lam et al., 2025; Morakinyo et al., 2020).

Alguns estudos demonstraram que a eficácia desse mecanismo de mitigação está ligada à forma de organização geométrica do arranjo e à densidade arbórea. Árvores com copas altas e grande quantidade de área foliar são eficientes para alcançar certo grau de mitigação. Em João Pessoa, por exemplo, foi constatado que a manutenção do percentil de vegetação não inferior a 30% em cada propriedade é importante para o balanceamento da verticalização (De Carvalho et al., 2026). Em regiões áridas, o cultivo de vegetação de forma estratégica, aumentando a cobertura e sombreamento, colabora para redução da temperatura do ar (Behzad; Guilandoust, 2024).

## 2.3 APLICAÇÕES DO ENVI-MET PARA A SIMULAÇÃO MICROCLIMATOLÓGICA

O ENVI-met tornou-se um dos modelos de Dinâmica de Fluidos 3D mais precisos, completos e de simples utilização, sendo capaz de simular a dinâmica da superfície, plantas e atmosfera em microclimas. No processo de simulação, o software utiliza equações de Navier-Stokes e considera as teorias vindas da termodinâmica, realizando simulações da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, fluxos de radiação, assim como vários outros elementos que fazem parte do microclima local, tanto urbano como rural (Kotharkar; Dongarsane, 2024).

A validação do modelo é realizada através da comparação dos resultados simulados com medições in-situ, utilizando métodos como o Erro Quadrático Médio (RMSE) e coeficiente de determinação ($R^2$). Os coeficientes de determinação das simulações comumente ficam acima de 0,85, desde que devidamente ajustados. Os principais benefícios do software envolvem a simulação de mecanismos de vegetação, água, superfícies de alto albedo e várias outras variáveis que podem ser incrementadas, sendo então a simulação considerada como um "corpo ativo". As limitações do método estão ligadas com a alta taxa de consumo computacional, exigindo máquinas potentes. (Montero-Gutiérrez et al., 2024; Schibuola; Tambani, 2022).

## 2.4 ESTRATÉGIAS DE MITIGAÇÃO AVALIADAS PELO ENVI-MET

O software ENVI-met permite uma variada quantidade de simulações, tanto quanto o conhecimento do usuário permitir. Porém, algumas táticas são mais comuns, como:

- Arborização/Reflorestamento: Representa a medida mais eficiente no âmbito de conforto para o pedestre, devido ao aumento do sombreamento e a evapotranspiração que acontece durante o dia. Com a utilização de árvores em calçadas de Hong Kong, chegou-se à redução da Temperatura Média Radiante (MRT) de 4,23°C (Jia; Wang, 2021).
- Telhados e fachadas verdes: São situações eficientes para resfriamento de superfícies dos edifícios, porém menos eficientes que plantas arbóreas quando se trata do conforto de pedestres (Schibuola; Tambani, 2022).
- Materiais de alto Albedo: estes materiais são eficientes em termos de resfriamento da superfície, mas pode gerar desconforto quando se leva em consideração os pedestres, devido o reflexo dos raios solares. São mais indicados para a cobertura de edificações (Chen, Yaping; Zheng; Hu, 2020; Montero-Gutiérrez et al., 2024).
- Infraestrutura Azul: Os corpos de água resfriam o microclima e é uma das táticas com melhores resultados quando se trata de conforto, ainda mais quando combinada com vegetação. A desvantagem fica somente na dificuldade de aplicação do método, pois normalmente exigem grandes obras para implantação da solução (Cruz et al., 2021; Liu et al., 2021).

## 2.5 RESULTADOS OBTIDOS PARA CIDADES TROPICAIS E SUBTROPICAIS

Estudos em cidades situadas em latitudes mais baixas demonstraram alguns desafios, como em João Pessoa, com clima tropical úmido, onde a verticalização da cidade diminui a visibilidade do céu (fator SVF), implicando na diminuição da ventilação e aumento da Ta em cenários mais compactos (De Carvalho et al., 2026). Outro caso é Nagpur, na Índia, onde áreas com edificações próximas e compactas retém maior volume de calor durante à noite na comparação com áreas abertas ou vegetadas (Kotharkar; Dongarsane, 2024).

Alguns casos apresentaram algumas peculiaridades, como o caso de Manta, no Equador, onde umidade do ar muito elevada e o excessivo crescimento vegetativo gerava desconforto ao reduzir a velocidade do vento, retendo a umidade (Lopez-Cabeza et al., 2024). Já em Bekasi, na Indonésia, como consequência da verticalização, houve a conversão de espaços verdes em áreas pavimentadas, que acabou contribuindo para o aquecimento urbano e que, com o passar do tempo, iniciou-se a conscientização da importância da manutenção de jardins (Michelle; Satwiko, 2025).

De acordo com boa parte da literatura científica, a arborização estratégica representa a solução

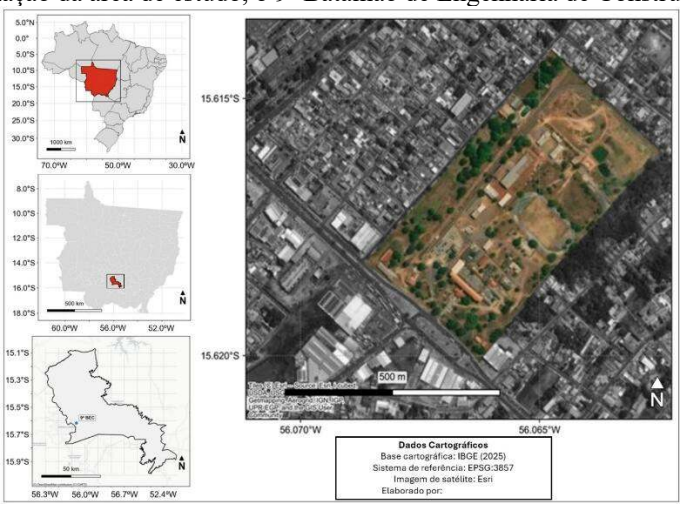
mais eficiente para mitigar o aquecimento das cidades, enquanto outros, como alta-refletividade de materiais e telhados verdes, representam benefícios variáveis, dependendo da escala de aplicação e dificuldade de implantação e manutenção. Porém, existem divergências entre estudos que envolvem os mecanismos da mitigação em climas tropicais úmidos, principalmente quando reduzem a ventilação dos espaços (Lopez-Cabeza et al., 2024).

## 3 METODOLOGIA

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

Com o intuito de expandir a cobertura arbórea em propriedades públicas nos centros de grandes cidades, escolheu-se para o estudo o 9º Batalhão de Engenharia de Construção (9º BEC), dado seu valor histórico para a capital e sua localização privilegiada dentro do espaço urbano da capital. Suas coordenadas aproximadas são 15°37'08"S e 56°04'01"W e possui aproximadamente 200.000 m², com dimensões de 330 m × 620 m. Caracteriza-se por um relevo predominantemente plano, com desníveis inferiores a 10m quando considerando suas extremidades, e altitude média de aproximadamente 165 m acima do nível do mar. Sua localização pode ser observada na figura 1.

Figura 1. Localização da área de estudo, o 9º Batalhão de Engenharia de Construção, Cuiabá-MT.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

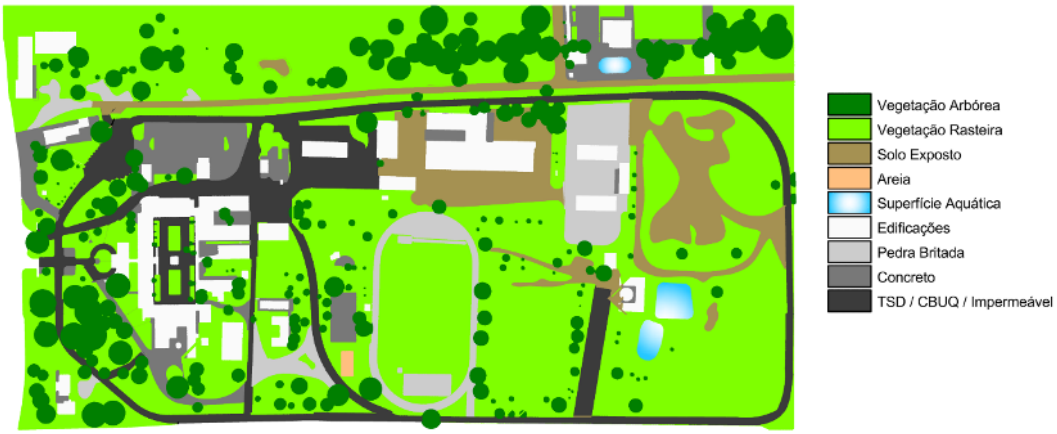
O uso e ocupação do solo na instituição acontece de maneira bastante diversificada, incluindo edificações administrativas e operacionais, vias pavimentadas, estacionamentos, áreas de treinamento e manobras, solos expostos, vegetação rasteira, vegetação arbórea, piscinas e dois lagos artificiais.

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, Cuiabá apresenta clima do tipo Aw (Tropical de Savana), caracterizado por duas estações bem definidas: uma estação quente e chuvosa, entre os meses de novembro e abril, e uma estação quente e seca, entre maio e outubro. De acordo com

as Normais Climatológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o período de 1991 a 2020, a temperatura média anual de Cuiabá é de 26,3 °C e a precipitação média anual é de aproximadamente 1.516 mm.

O levantamento do uso e ocupação do solo foi realizado por meio da interpretação visual de imagens de satélite de alta resolução, complementada por verificações em campo e, com o auxílio de ferramenta de CAD, foram delimitadas estas áreas e verificadas suas dimensões. Foram identificadas as seguintes classes de cobertura: vegetação arbórea, vegetação rasteira, solo exposto, areia, superfície aquática, edificações, pedra britada, concreto e superfícies impermeáveis pavimentadas (TSD e CBUQ). A Figura 2 apresenta a distribuição espacial dessas classes no interior da área de estudo, assim como a tabela 1 traz numericamente a ocupação de cada uma delas.

Figura 2. Uso e ocupação do solo da área de estudo.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Tabela 1. Quantitativo do Uso e ocupação do solo da área de estudo

| Uso do Solo | Área (m²) | Área (%) |
|---|---|---|
| Vegetação Arbórea | 26.356,28 | 13,16 |
| Vegetação Rasteira | 83.643,11 | 41,78 |
| Solo Exposto | 15.600,79 | 7,79 |
| Areia | 165,44 | 0,08 |
| Superfície Aquática | 1.508,45 | 0,75 |
| Edificações | 32.288,55 | 16,13 |
| Pedra Britada | 10.138,97 | 5,06 |
| Concreto | 10.507,76 | 5,25 |
| TSD/CBUQ | 19.996,84 | 9,99 |
| **Total** | **200.206,20** | **100,00** |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

## 3.2 MONITORAMENTO MICROCLIMÁTICO

Para a caracterização das condições microclimáticas locais e posterior validação das simulações numéricas, foram coletados dados de temperatura do ar e umidade relativa utilizando um Data Logger Akrom KA440, com acurácia de ±1°C para temperatura do ar e ±3% para umidade relativa do ar. O

equipamento foi instalado no barracão de formaturas, uma área coberta mas com ventilação natural já que não existem paredes, para que ficasse protegido da incidência direta de sol ou chuva.

O equipamento foi instalado a altura de 1,80 m em relação ao solo, registrando dados de Ta e UR em intervalos de 5 minutos durante períodos contínuos de 24 horas. Os registros de dados foram realizados em duas datas distintas, sendo consideradas representativas das condições sazonais do clima: 21 de março de 2025, representando o período quente e úmido, e 09 de outubro de 2025, representando o período quente e seco.Os dados obtidos foram utilizados para base de comparação e ajustes das condições atmosféricas de entrada do modelo simulado pelo software ENVI-met e, posteriormente, para a avaliação da consistência dos resultados gerados.

## 3.3 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi estruturada de tal forma que fosse possível avaliar os efeitos do aumento da cobertura arbórea no microclima local e no conforto térmico ao ar livre nas dependências do 9º BEC.

Foram introduzidos no software, através do módulo Spaces, quatro cenários, obtidos através da combinação entre as duas condições sazonais já definidas e dois cenários de cobertura vegetal arbórea, que constam na Tabela 2.

Embora as áreas de reflorestamento tenham sido definidas separadamente, para fins de modelagem e posterior planejamento de execução real, este trabalho considerou exclusivamente a comparação entre o cenário original e o cenário completamente reflorestado, representando a implantação simultânea de três áreas possíveis. As simulações foi feita para avaliar simultaneamente os efeitos da sazonalidade climática e a influência da ampliação da cobertura arbórea no microclima local da instituição.

Tabela 2. Delineamento dos cenários simulados no ENVI-met

| Cenário | Condição de cobertura vegetal | Período Climático |
|---|---|---|
| C1 | Original | Quente-úmido (21/03/2025) |
| C2 | Reflorestado | Quente-úmido (21/03/2025) |
| C3 | Original | Quente-seco (09/10/2025) |
| C4 | Reflorestado | Quente-seco (09/10/2025) |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

A hipótese da pesquisa leva em consideração que a ampliação da cobertura vegetal arbórea em grandes áreas subutilizadas do batalhão promova melhorias microclimáticas significativas ao ar livre, reduzindo a temperatura do ar, a carga térmica radiante e aumentando a UR, resultando em melhores condições de conforto térmico aos usuários do espaço.

## 3.4 CENÁRIO DE REFLORESTAMENTO

O cenário de reflorestamento foi elaborado a partir da identificação de áreas livres ou subutilizadas dentro do batalhão, considerando a ocupação de áreas que não interferissem na operacionalidade e segurança e, por serem extensas, poderem gerar grande potencial de mitigação térmica.

Foram definidas três áreas para incremento da cobertura arbórea da instituição, sob denominação de A1, A2 e A3. O somatório destas áreas é de 49.881,21 m², correspondendo a aproximadamente 25% da área total do imóvel. Ou seja, por se tratar de uma área expressiva, considerou-se o aumento da quantidade de árvores como, de fato, um reflorestamento.

A Figura 3 apresenta a localização das áreas denominadas e propostas para reflorestamento, ao passo que a tabela 3 mostra o quantitativo destas áreas individualmente, assim como o número de elementos arbóreos inseridos em cada área na modelagem.

Figura 3. Áreas propostas para reflorestamento (A1, A2 e A3) no 9º BEC.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Tabela 3. Dimensionamento das áreas de reflorestamento propostas

| Área | Área (m²) | Árvores inseridas |
|---|---|---|
| A1 | 23.434,92 | 215 |
| A2 | 21.200,15 | 225 |
| A3 | 5.246,14 | 50 |
| Total | 49.881,21 | 490 |

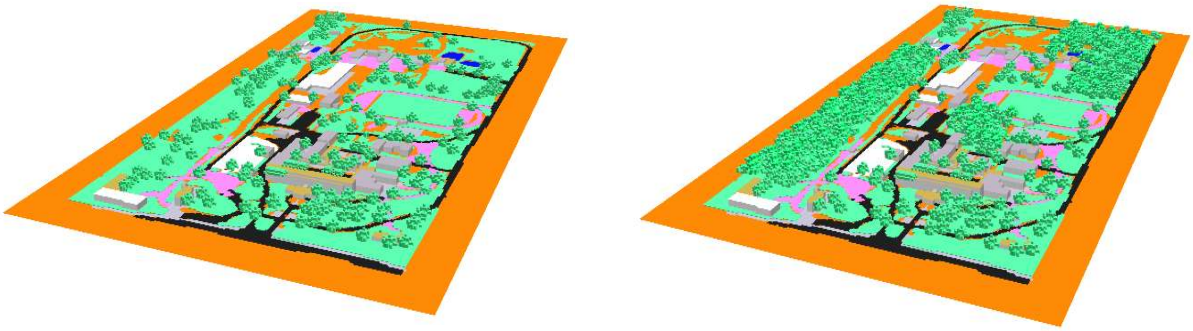
Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

O cenário original encontrado in loco apresentava 200 árvores de tamanhos e espécies variados, tanto originárias da região como trazidas de outros locais, de fora dos biomas de Cerrado/Pantanal onde se encontra o batalhão, enquanto o cenário reflorestado passou a totalizar 690 indivíduos

arbóreos. A perspectiva da área de estudo original e reflorestada moldadas no Space podem ser vistas nas figuras 4a e 4b, respectivamente.

Figura 4. Simulações da área de estudo no módulo Spaces do ENVI-met, sendo (a) o cenário original e (b) o cenário reflorestado.

(a) (b)

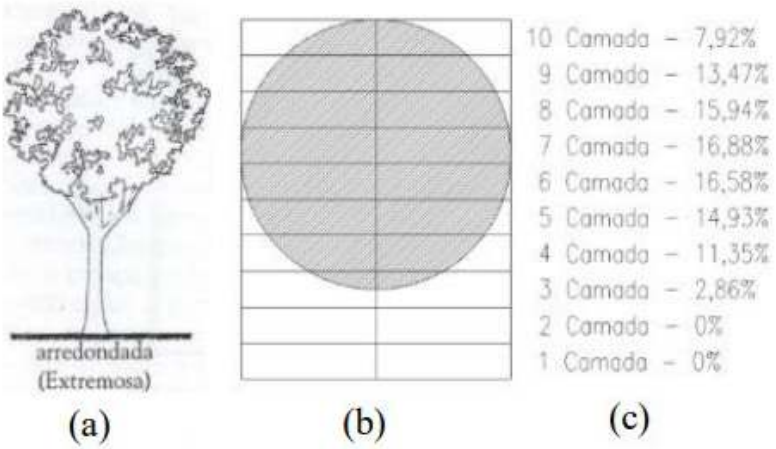


Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

As árvores foram inseridas no modelo por meio de espécies genéricas editadas no banco de dados do ENVI-met (Tree Library), representando indivíduos de pequeno, médio e grande porte, com alturas de 5 m, 10 m e 15 m, respectivamente. Embora a literatura sobre restauração ecológica da EMBRAPA (Fowler, 2011) recomende espaçamentos de malha iniciais entre 2 × 2 m e 2 × 3 m, tais configurações referem-se à fase de implantação de mudas. Neste estudo, representou-se uma condição futura de cobertura arbórea, já adulta e consolidada.

O software Envi-met considera a Densidade de Área Folear (DAF), que é caracterizado por meio da divisão da altura do indivíduo arbóreo em dez camadas, contadas acima do solo até o topo da copa, conforme figura 5, assim sendo inserida no módulo Tree Library. Assumiu-se a homogeneidade da DAF no interior das camadas para as 3 espécies genéricas igual a 2, variando apenas sua altura/copa.

Figura 5. Exemplo de geometrias de copa arredondada, (b) distribuição da DAF em 10 camadas (c) e seus fatores de distribuição.




Fonte: adaptado de Gusson e Shinzato (2015).

Dessa forma, considerando os exemplares já em fase adulta, chegou-se em uma densidade próxima de uma árvore para cada 100 m², sem contar as árvores já existentes. A distribuição espacial foi feita alternando indivíduos de diferentes portes, buscando ampliar o sombreamento sem comprometer excessivamente a ventilação natural da área.

## 3.5 MODELAGEM MICROCLIMÁTICA NO ENVI-MET

As simulações numéricas foram realizadas utilizando o software ENVI-met, versão 5.9, sob licença acadêmica Student PhD. O modelo tridimensional foi desenvolvido a partir da representação detalhada das edificações, pavimentos, áreas vegetadas, superfícies aquáticas e demais elementos presentes na área de estudo, verificados in loco.

O modelo foi rotacionado em -42,10° em relação ao norte verdadeiro, de modo a facilitar a ilustração dos resultados e alinhar o imóvel aos eixos cartesianos, deixando a entrada principal e maior índice de ocupação por edificações ao sul. A malha computacional foi configurada com grid uniforme de 2 m × 2 m × 2 m, composta por 206 células no eixo X, 350 células no eixo Y e 30 células no eixo Z, totalizando um grid de 412m no eixo X, 700m no eixo Y e 60m no eixo Z.

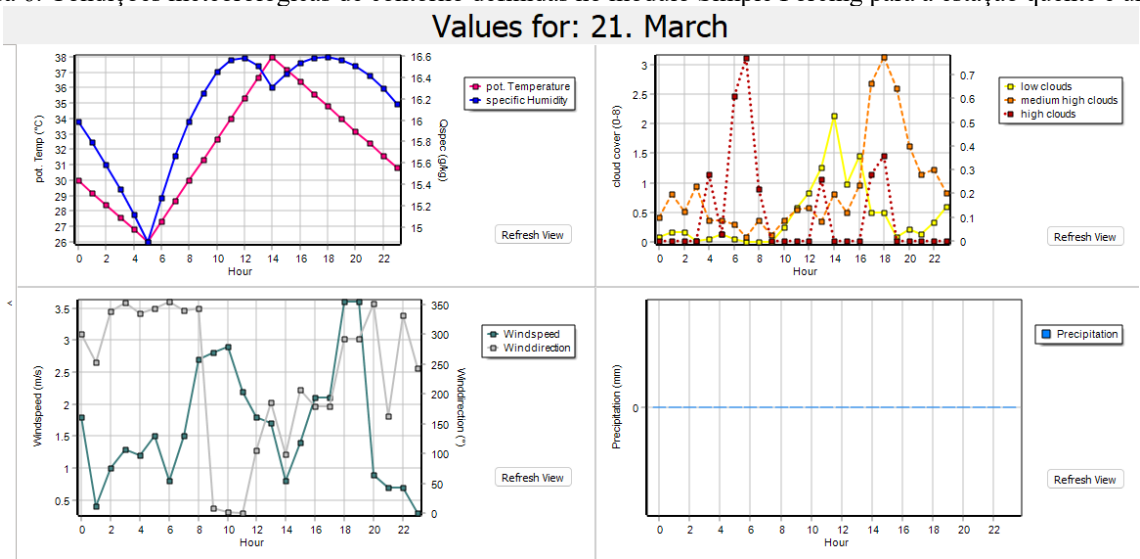
Destaca-se que fora deixada uma faixa de 20 células (40m) em cada uma das quatro laterais do imóvel base do estudo, para amortizar os efeitos de borda e melhorar os fluxos atmosféricos simulados (Tan et al., 2022; Wang et al., 2024). A primeira camada vertical foi subdividida em cinco subcélulas para melhorar a representação dos processos atmosféricos próximos à superfície. Não foi utilizada expansão telescópica da malha vertical.

As condições meteorológicas de entrada foram definidas no módulo Simulation Settings – Envi Guide – Advanced Meteorology, a partir de dados de reanálise climática ERA5/Copernicus,

principalmente na incidência de nuvens, complementados por informações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) da Estação A901 (Cuiabá). Posteriormente, para calibragem do modelo, foram levados em conta os valores coletados in loco, conforme monitoramento microclimático.

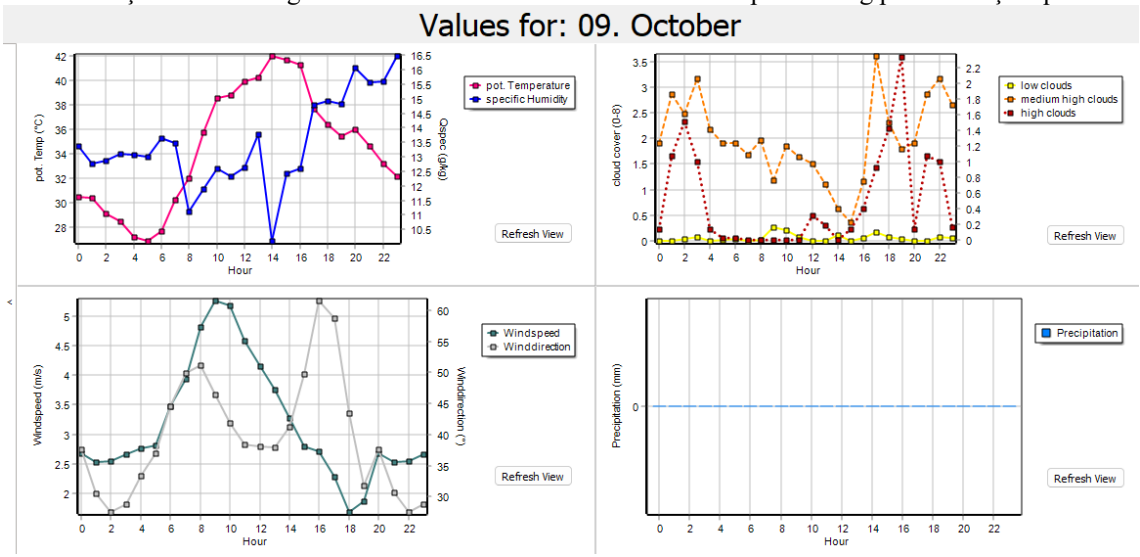
As condições atmosféricas de contorno foram definidas por meio do módulo Simple Forcing do ENVI-met, utilizando séries horárias de temperatura potencial do ar, umidade específica, velocidade e direção do vento, cobertura de nuvens e precipitação. As condições de entrada foram configuradas individualmente para os dias representativos do período quente-úmido (21 de março de 2025, conforme figura 6), para os cenários C1 e C2, e do período quente-seco (09 de outubro de 2025, conforme figura 7), para os cenários C3 e C4, permitindo reproduzir as características atmosféricas observadas em cada estação.

Figura 6. Condições meteorológicas de contorno definidas no módulo Simple Forcing para a estação quente e úmida.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 7. Condições meteorológicas de contorno definidas no módulo Simple Forcing para a estação quente e seca.



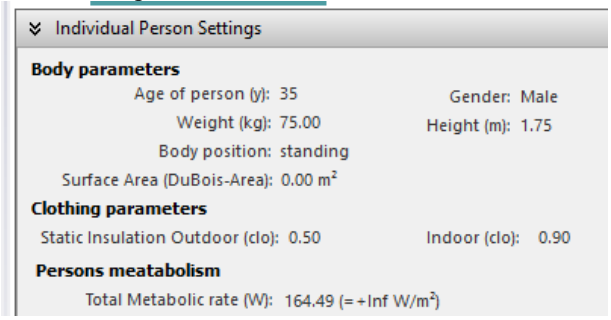

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

## 3.6 VARIÁVEIS ANALISADAS

As simulações permitiram a obtenção de variáveis microclimáticas e índices de conforto térmico amplamente empregados em estudos urbanos. Para este estudo, foram analisadas as seguintes variáveis: Temperatura do ar (Ta); Umidade relativa do ar (UR) e Índice Universal de Clima Térmico (UTCI).

O UTCI foi adotado como principal indicador de conforto térmico por integrar os efeitos combinados da temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação térmica, fornecendo uma avaliação abrangente das condições térmicas percebidas pelos usuários do espaço. Os parâmetros humanos utilizado podem ser visto na figura 8, onde foi considerado um homem de 35 anos de pé, com massa de 75 kg e 1,75m de altura. Como o estudo só levou em conta as condições em ambiente aberto, utilizou-se o índice “clo” de 0,5, que consiste aproximadamente ao uniforme militar.

Figura 8. Condições utilizadas para o cálculo do UTCI no módulo Simulate Thermal Confort.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

As análises foram realizadas para os horários de: 08h00; 14h00 e 20h00, considerando o horário local de Cuiabá (UTC −04:00), de acordo com as orientações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM).

### 3.7 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA E ESPACIAL DAS SIMULAÇÕES

A validação do modelo ENVI-met foi realizada por meio da comparação entre os dados observados em campo e os resultados simulados para o cenário original (cenários C1 e C3), utilizando as variáveis temperatura do ar (Ta) e umidade relativa do ar (UR).

A normalidade dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk. Para conjuntos de dados normais, aplicou-se o teste t de Student para situações paramétrias e, quando a hipótese de normalidade não foi atendida, empregou-se o teste U de Mann-Whitney, adotando-se nível de significância de 5% para ambos os casos ($p < 0,05$).

O desempenho do modelo foi avaliado por meio da Raiz Quadrada do Erro Médio (RMSE), do Coeficiente de Determinação ($R^2$) e do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), indicadores empregados na validação de simulações microclimáticas.

Após a validação estatística, os cenários original e reflorestado foram comparados espacialmente, considerando os períodos quente-úmido e quente-seco, nos horários de 08h00, 14h00 e 20h00. As análises contemplaram as variáveis temperatura do ar (Ta), umidade relativa (UR) e Índice Universal de Clima Térmico (UTCI), sendo os resultados apresentados por meio de mapas temáticos, com valores totais e diferenças absolutas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

No período seco, os dados atenderam aos pressupostos dos testes de normalidade, enquanto no período chuvoso não apresentaram distribuição normal. Desta forma, as diferenças estatisticamente significativas entre as medidas foram verificadas, com significância de 5%, aplicando o test-t para o período seco (paramétrico), ao passo que para o período úmido foi utilizado teste U de Mann-Whitney (não-paramétrico). Os resultados obtidos para os cenários originais, sendo o cenário C1 quente e úmido e o cenário C3 quente e seco, podem ser vistos na tabela 4.

Tabela 4. Validação dos cenários C1 e C3 pelos testes estatísticos: Raiz quadrada média do erro (RMSE), coeficientes de determinação ($R^2$) e correlação (r), teste t ao período seco, e de U Mann-Whitney para o período chuvoso.

| Cenário | Indicador Estatístico | Ta | UR |
|---|---|---|---|
| C1 (Quente e úmido) | RMSE | 1,046 | 4,412 |
| | $R^2$ | 0,979 | 0,956 |
| | r | 0,986 | 0,968 |
| | U Mann-Whitney | 0,403 | 0,426 |
| C3 (Quente e Seco) | RMSE | 1,396 | 2,813 |
| | $R^2$ | 0,958 | 0,975 |
| | r | 0,949 | 0,988 |
| | Test t | 0,672 | 0,379 |

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Diante dos resultados estatísticos encontrados, demonstra-se que os modelos do ENVI-met apresentaram bom desempenho na reprodução das condições climáticas observadas em ambos os períodos avaliados. Levando-se em consideração somente a Ta, o cenário C1 obteve-se melhor ajuste, correspondente ao período quente e úmido, com RMSE de 1,046 °C, $R^2$ de 0,979 e coeficiente de correlação (r) de 0,986, indicando que há concordância entre os valores observados e simulados. Ao se considerar a UR, o desempenho foi superior no cenário C3 (quente e seco), apresentando RMSE de 2,813%, $R^2$ de 0,975 e r de 0,988. No geral, em ambas as características meteorológicas, os cenários apresentaram correspondência satisfatória entre simulação e realidade.

Observando apenas os valores de RMSE entre os cenários, tem-se que a Ta apresentou valores menores no período úmido, ao passo que a UR teve valores mais aproximados das medições no período seco. Há relatos de que o ENVI-met tendencia valores de Ta superestimada, enquanto subestima a UR, como nos resultados encontrados por Vatani et al., (2024) e Zheng et al., (2024), que apresentaram erros de Ta variando de 0,35 °C a 1,43 ºC, enquanto os valores de UR chegaram a 2%.

Apesar da existência de diferenças, os testes estatísticos aplicados não indicaram diferenças significativas entre os valores observados e simulados em ambas as variáveis analisadas ($p > 0,05$). Considera-se, então, que não houve diferenças estaticamente significativas entre os dados de Temperatura do Ar e Umidade Relativa do Ar coletados em campo e os dados gerados pelas simulações do ENVI-met, corroborando com estudos de validação descritos na literatura e fornecendo confiabilidade para os outros cenários que foram simulados.

## 4.2 TEMPERATURA DO AR

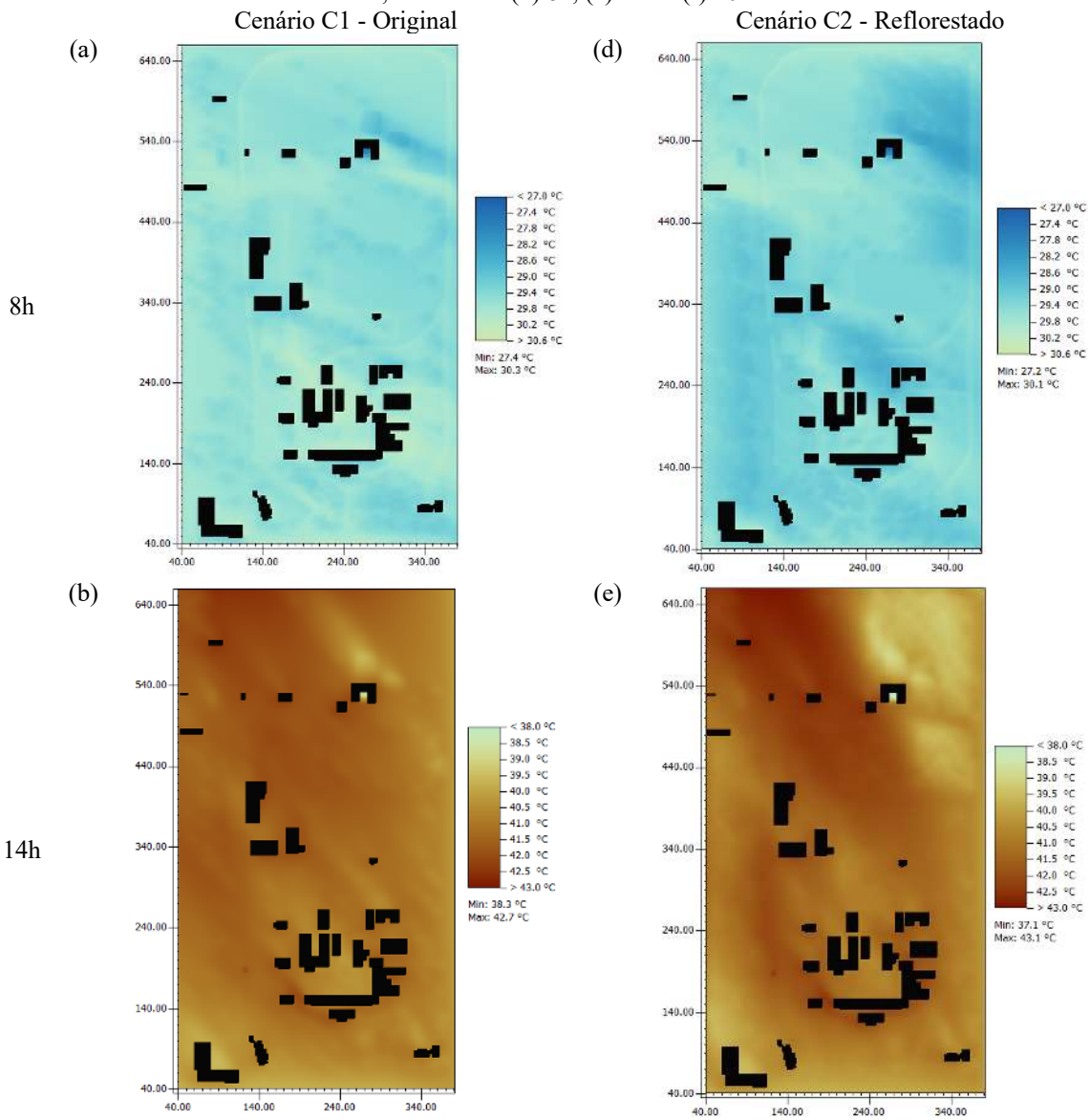
### 4.2.1 Período quente e úmido

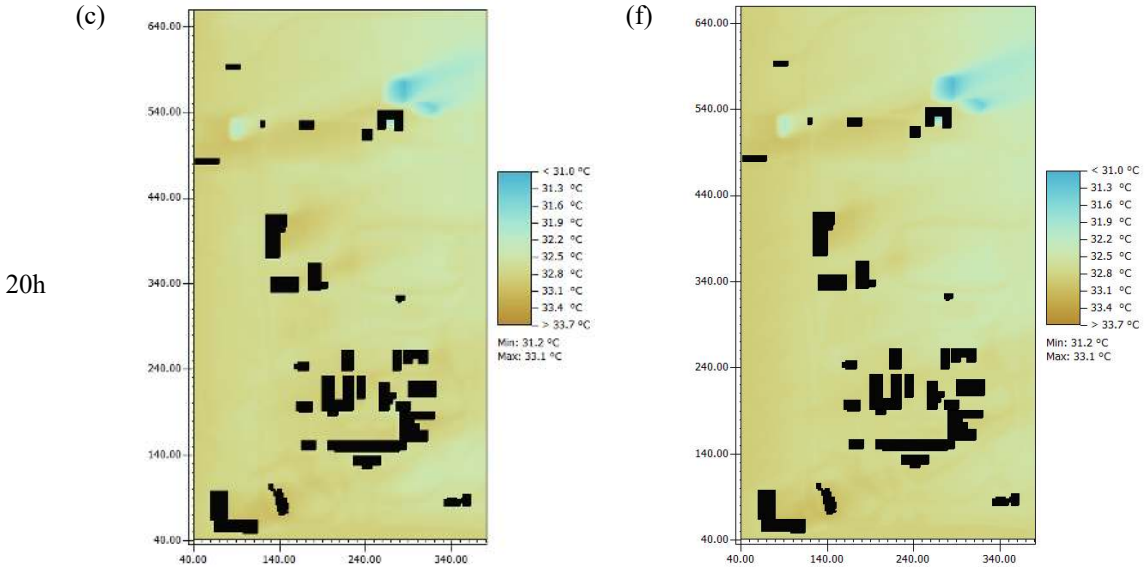
A Figura 9 apresenta a distribuição espacial da temperatura do ar gerada pelo módulo Leonard à altura de 1,80m, para os cenários original C1, às 8h (figura 9a), às 14h (figura 9b), 20h (figura 9c) e reflorestado C2 nos mesmos horários (figuras 9d, 9e e 9f, respectivamente) no período quente-úmido.

Em ambos os cenários se observa a evolução do aquecimento superficial ao longo do dia, com temperaturas mais amenas no período da manhã, intensificação do aquecimento às 14h e redução gradual durante o período noturno.

No cenário reflorestado, a distribuição térmica evidencia a formação de áreas mais extensas com temperaturas inferiores nas regiões destinadas à implantação das novas manchas arbóreas, sobretudo nas áreas reflorestada A1. Esse comportamento torna-se mais evidente às 14h (figura 9e), quando a maior incidência de radiação solar potencializa os efeitos do sombreamento promovido pela cobertura vegetal, reduzindo o aquecimento das superfícies expostas.

Figura 9. Mapas do 9º BEC de Temperatura do ar no período quente e úmido, nos cenários C1 às (a) 8h, (b) 14h, (c) 20h e C2, também às (d) 8h, (e) 14h e (f) 20h.





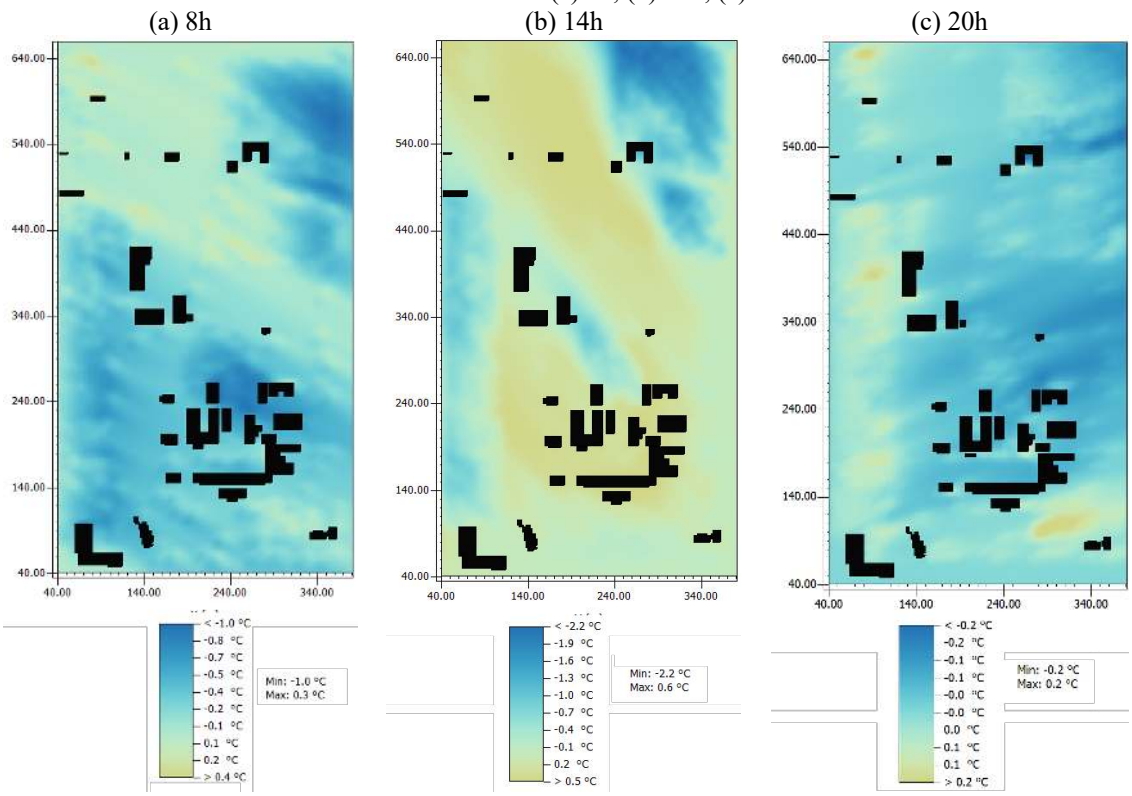

Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Às 20h, a diferença entre os cenários foi pequena em razão da ausência de radiação solar direta, conforme figuras 9c e 9f. Esse comportamento sugere menor armazenamento de calor durante o período diurno, refletindo na redução da energia liberada pelas superfícies ao longo da noite.

De forma geral, os mapas indicam que o incremento da cobertura arbórea modifica a distribuição espacial da temperatura do ar, concentrando os maiores benefícios nas áreas diretamente reflorestadas e em seu entorno próximo. A magnitude dessas alterações é apresentada e discutida a partir dos mapas de diferença absoluta, apresentados na Figura 10.

A Figura 10 apresenta as diferenças absolutas da temperatura do ar entre os cenários original (C1) e reflorestado (C2) para o período quente-úmido às 8h (figura 10a), 14h (figura 10b) e 20h (figura 10c), revelando que a resposta térmica da área de estudo à implantação das manchas arbóreas ao longo do dia é variada.

Figura 10. Mapas do 9º BEC de diferenças absolutas de Temperatura do ar no período quente e úmido, que comparam os cenários C1 e C2 às (a) 8h, (b) 14h, (c) 20h.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Às 08h, as diferenças de temperatura foram discretas e concentradas nas áreas destinadas ao reflorestamento, com reduções de até 1,0 °C. Nesse horário, com a velocidade do vento elevada (3,5 m/s) e oriundo da direção norte, ocorre a renovação do ar na área, enquanto o aquecimento superficial ainda era incipiente, limitando a magnitude das alterações promovidas pela arborização.

Às 14h, registraram-se reduções de até 2,2 °C, concentradas nas áreas reflorestadas. Nesse período, a baixa velocidade do vento (0,8 m/s) e direção de 100°. Em contrapartida, áreas não reflorestadas apresentaram aumentos de até 0,6 °C, possivelmente associados à redistribuição dos fluxos de calor e privação de ventilação provocada pela nova configuração da cobertura arbórea, apontando que os benefícios da intervenção permaneceram predominantemente nas áreas alteradas.

Às 20h, as diferenças tornaram-se pouco expressivas, com reduções máximas de aproximadamente 0,2 °C. A ausência de radiação solar direta diminuiu a influência da vegetação sobre a temperatura do ar, provavelmente pela baixa ocupação do solo com áreas impermeáveis (próximo a 35% da área), que diminui a capacidade de absorção de calor.

### 4.2.2 Período quente e seco

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial da temperatura do ar gerada pelo módulo Leonard à altura de 1,80m, para os cenários original C3, às 8h (figura 11a), às 14h (figura 11b), 20h (figura 11c) e reflorestado C4 nos mesmos horários (figuras 11d, 11e e 11f, respectivamente) no período quente-úmido. Observa-se um padrão de aquecimento mais intenso em comparação ao período quente-úmido, refletindo as condições atmosféricas características da estação seca, caracterizadas por menor umidade do ar e maior disponibilidade de energia, aquecendo mais as superfícies.

No cenário reflorestado, as áreas correspondentes às novas áreas arbóreas apresentam temperaturas inferiores às observadas no cenário original, efeito que se torna mais evidente às 14h, quando ocorre o pico do aquecimento diário. Assim como observado no período quente-úmido, os benefícios concentram-se nas áreas diretamente revegetadas, enquanto as demais regiões mantêm comportamento térmico semelhante ou até leve aquecimento.

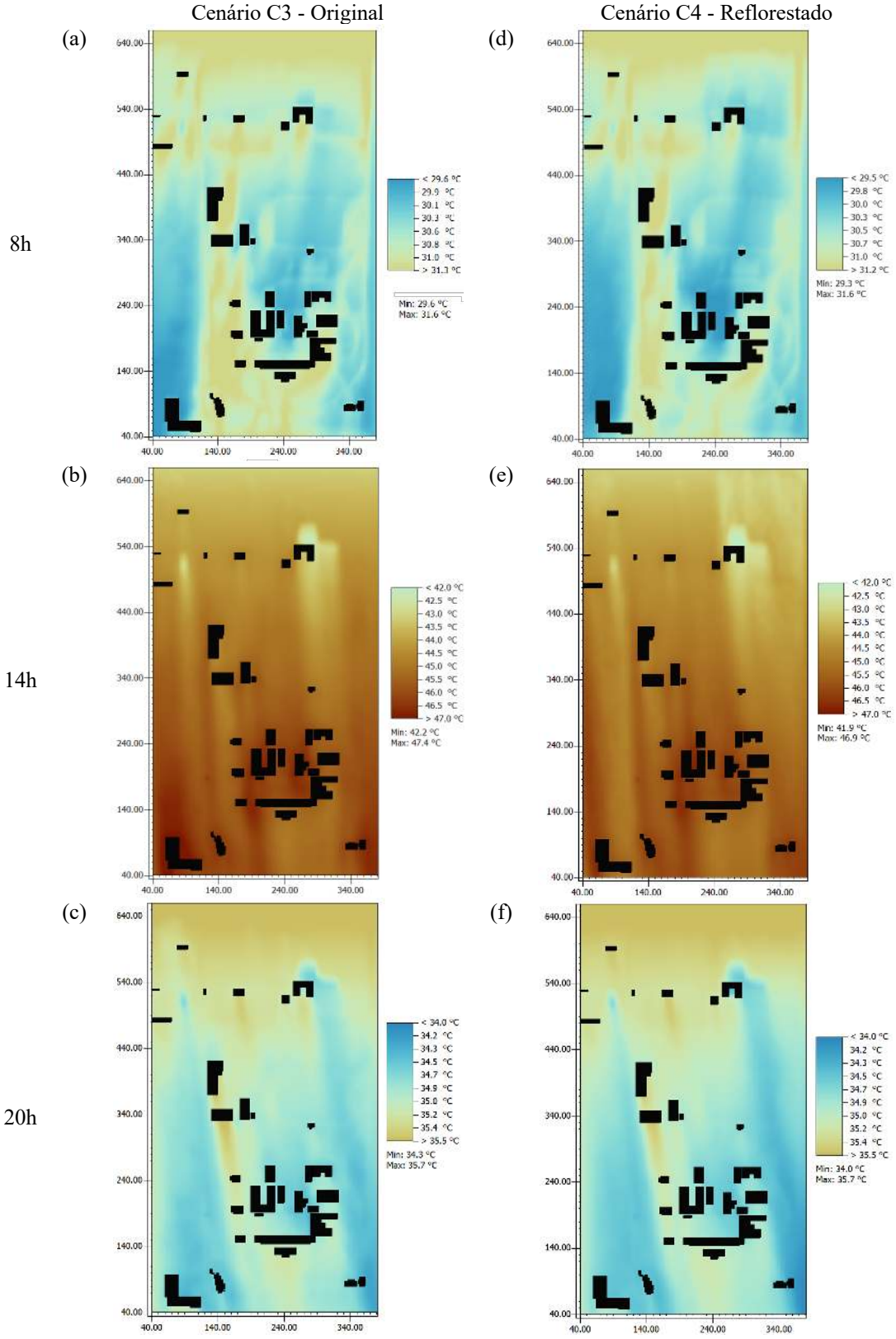
As Figuras 12a, 12b e 12c apresentam as diferenças absolutas da temperatura do ar entre os cenários C3 e C4. De maneira geral, o reflorestamento promoveu reduções localizadas da temperatura do ar, confirmando a influência da cobertura arbórea sobre o microclima local.

Às 08h, as diferenças ainda foram pouco expressivas, refletindo o estágio inicial do aquecimento das superfícies. Nesse horário, a velocidade do vento era de aproximadamente 4,8 m/s, com direção predominante próxima de 50°, condição que favorece a mistura do ar e reduz o contraste térmico entre os cenários.

Às 14h, observaram-se as maiores reduções de temperatura, concentradas nas áreas reflorestadas. Embora a velocidade do vento permanecesse relativamente elevada e com direção predominante próxima de 40°, o período corresponde ao pico da carga radiativa diária, intensificando os efeitos do sombreamento das copas e da evapotranspiração.

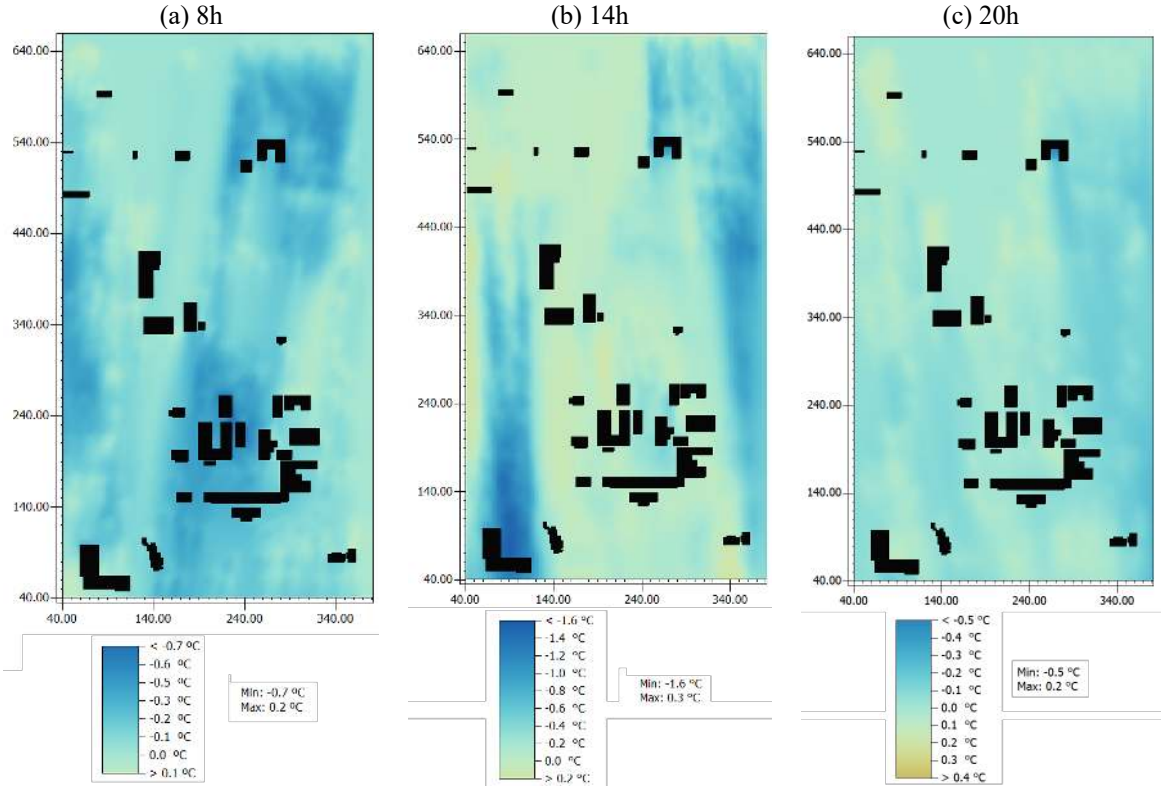
Assim como encontrado por Wang et al. (2024), os resultados indicam que, assim como no período quente-úmido, o reflorestamento exerceu influência maior durante o período de máxima incidência solar, porém com benefícios concentrados nas áreas diretamente arborizadas, evidenciando que a configuração espacial da vegetação é determinante para a mitigação do aquecimento em grandes áreas.

Figura 11. Mapas do 9º BEC de Temperatura do ar no período quente e seco, nos cenários C3 às (a) 8h, (b) 14h, (c) 20h e C4, também às (d) 8h, (e) 14h e (f) 20h.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

Figura 12. Mapas do 9º BEC de diferença absoluta de temperatura do ar, que comparam os cenários C3 e C4 às (a) 8h, (b) 14h, (c) 20h.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

## 4.3 UMIDADE RELATIVA DO AR

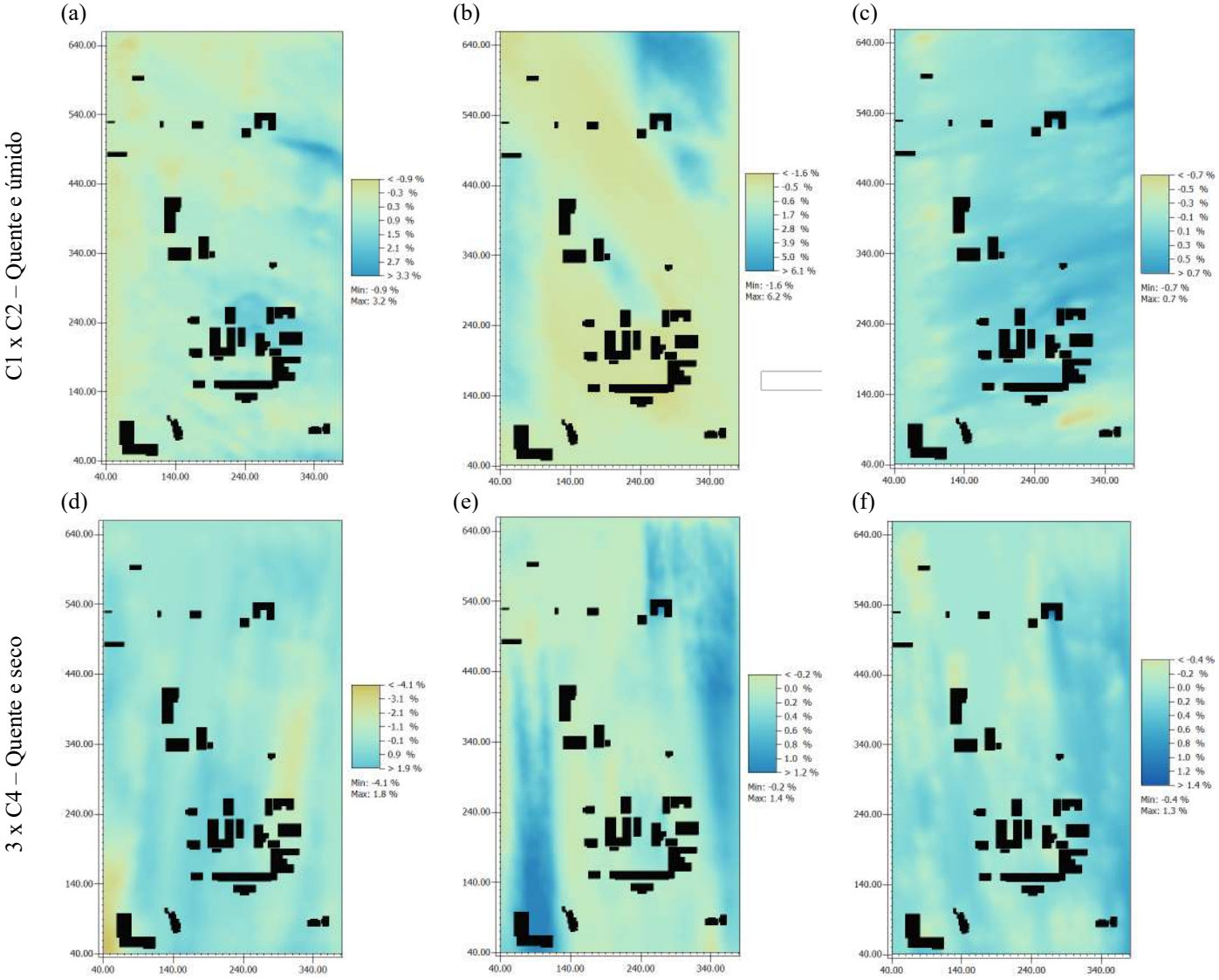
A Figura 13 apresenta as diferenças absolutas da umidade relativa do ar entre os cenários original e reflorestado para os períodos quente-úmido (C1 e C2) às 8h (figura 13a), 14h (figura 13b) e 20h (figura 13c) e quente-seco (C3 e C4), às 8h (figura 13d), 14h (figura 13e) e 20h (figura 13f). Observa-se que o incremento da cobertura arbórea promoveu aumento localizado da umidade relativa, com maior concentração nas áreas destinadas ao reflorestamento, refletindo o efeito da evapotranspiração associado às novas manchas arbóreas.

Em ambos os períodos, as alterações foram mais evidentes às 14h, coincidindo com o horário de maior aquecimento superficial e maior demanda evaporativa da vegetação. Nos horários de 08h e 20h, as diferenças foram menos expressivas, indicando que a influência da arborização sobre a umidade relativa diminui quando a carga radiativa incidente é reduzida.

Assim como observado para a temperatura do ar, os efeitos permaneceram predominantemente restritos às áreas revegetadas, indicando que a influência da evapotranspiração diminui com o afastamento das manchas arbóreas. Embora o aumento da umidade relativa esteja diretamente ligado para a melhoria das condições microclimáticas, sua influência foi menos expressiva que a redução da

temperatura do ar, mostrando que o sombreamento representou o principal mecanismo de mitigação térmica proporcionado pelo reflorestamento.

Figura 13. Mapas do 9º BEC de Umidade Relativa do ar, que comparam os cenários C1 e C2 às (a) 8h, (b) 14h, (c) 20h e cenários C3 e C4, também às (d) 8h, (e) 14h, (f) 20h.




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

## 4.4 UTCI

A análise do UTCI foi focada no horário das 14h, por corresponder ao período de maior carga térmica diária e incidência solar, portanto, é o momento mais crítico para avaliação do conforto térmico em ambientes externos. Nesse horário, a combinação entre elevada incidência de radiação, aquecimento das superfícies e maiores temperaturas do ar tende a intensificar o estresse térmico, tornando mais evidente a resposta microclimática das estratégias de mitigação utilizadas neste estudo. Assim, a escolha das 14h permite avaliar o desempenho do reflorestamento sob a condição mais

desconfortável do dia, quando a demanda por sombreamento e resfriamento é mais relevante, para ambos os períodos do ano.

A Figura 14 apresenta a distribuição espacial do UTCI nos cenários original e reflorestado para os períodos quente-úmido e quente-seco. No cenário original (figuras 14a e 14b) , observa-se a predominância de valores elevados de UTCI em praticamente toda a área do 9º BEC, especialmente nas porções com maior presença de superfícies pavimentadas, solo exposto e baixa cobertura arbórea, sendo que este efeito é ainda maior no período quente e seco. Esse padrão indica que, mesmo em uma área institucional com presença de vegetação rasteira, a ausência de sombreamento arbóreo contribui para a manutenção de condições de forte desconforto térmico, ultrapassando até mesmo valores considerados extremos.

Com a implantação dos cenários reflorestados (figuras 14c e 14d), verifica-se uma redução expressiva do UTCI nas áreas onde fora implantada a vegetação arbórea, mostrando a importância da cobertura para melhoria das condições térmicas ao nível do pedestre. A redução do índice ocorre principalmente nas áreas diretamente ocupadas pelas novas árvores, indicando que o sombreamento das copas exerceu papel central na diminuição do índice. Esse resultado reforça que, para o conforto térmico humano, a presença de vegetação arbórea tende a ser mais relevante do que a simples existência de áreas verdes rasteiras.

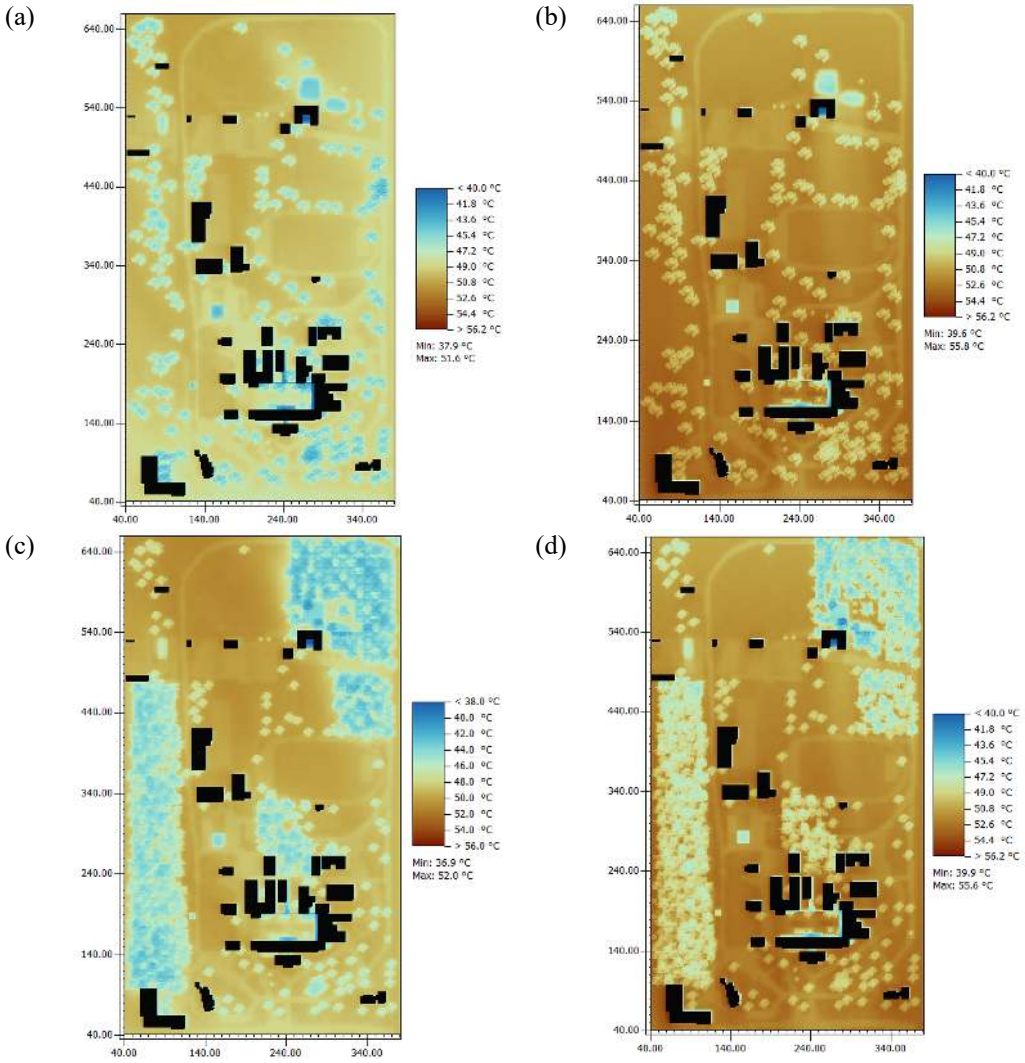
Os mapas de diferença (figuras 14d e 14e) mostram que o efeito do reflorestamento foi espacialmente heterogêneo. As maiores reduções do UTCI concentraram-se nas áreas reflorestadas, enquanto áreas afastadas dessas intervenções apresentaram alterações menores o, até mesmo, aumento da percepção de aquecimento. Esse comportamento demonstra que o reflorestamento não promoveu uma melhoria uniforme em toda a área do batalhão, mas criou zonas de maior alívio térmico. Portanto, a configuração espacial das árvores mostrou-se determinante para a distribuição dos benefícios microclimáticos. O mesmo resultado foi encontrado no estudo de Vatani et al. (2024).

Os aumentos pontuais podem estar relacionados à reorganização dos fluxos de ventilação e radiação causada pela nova configuração da vegetação, mas sua extensão espacial foi limitada quando comparada às áreas onde houve redução do índice. Esse resultado é relevante, pois demonstra que grandes áreas podem atuar como espaços estratégicos para implantação de infraestrutura verde voltada à redução do estresse térmico urbano.

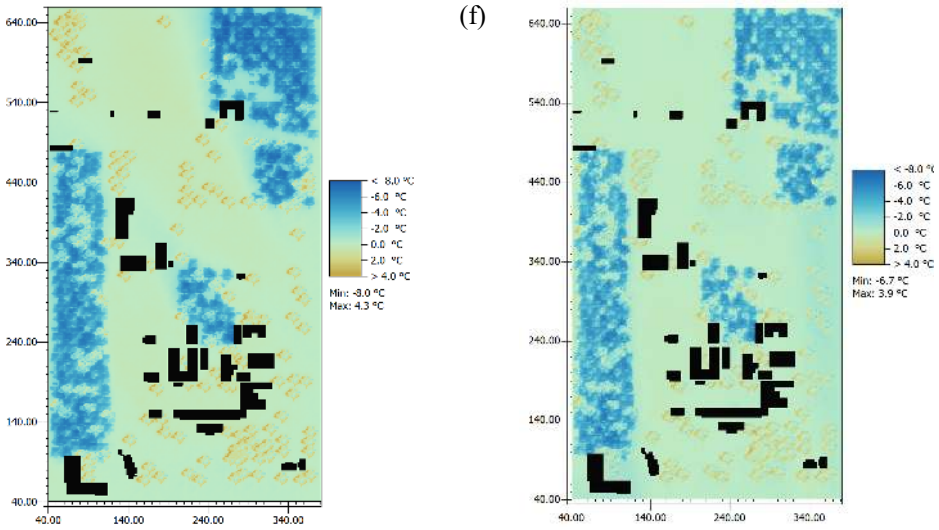
Ressalta-se que o ITCU é um índice de conforto que leva em consideração a temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do vento e umidade relativa, é possível observar que locais com vegetação rasteira em áreas abertas, em ocasiões de elevada carga radiante, podem apresentar ITCU maior do que em áreas impermeáveis, já que o índice é calculado a 1,80m e gramados ressecados

podem aquecer bastante pela redução da evapotranspiração. Tem-se então que simplesmente a presença de áreas verdes rasteiras não garantem melhorias no conforto térmico. O mesmo aconteceu nos estudos de Park et al. (2022), Zheng et al. (2024) e Lopez-Cabeza et al.(2024).

Figura 14. Mapas do 9º BEC de UTCI às 14h, nos cenários (a) C1, (b) C3, (c) C2, (d) C4 e as diferenças absolutas entre os cenários (e) C1 e C2 e (f) C3 e C4.



(e) (f)




Fonte: Elaborada pelos próprios autores.

## 5 CONCLUSÕES

A avaliação do comportamento microclimático do 9º Batalhão de Engenharia de Construção, em Cuiabá, atingiu o objetivo de analisar os efeitos de reflorestamento de áreas previamente escolhidas como uma das possíveis medidas de mitigação térmica por meio de simulações no ENVI-met, levando em consideração os dois períodos do ano bem distintos: período quente e úmido e período quente e seco.

As variáveis microclimáticas mostraram diferenças significativas entre os períodos analisados, sendo que o período quente-seco é marcado por condições térmicas mais severas, que refletem nos índices de conforto. O período quente-úmido é mais ameno, principalmente pela existência de maiores quantidades de umidade relativa do ar. Porém, mesmo com as diferenças entre os períodos, o horário das 14h concentra a combinação que gera maiores índices de desconforto térmico, o que justifica sua escolha para uma análise mais detalhada.

Ficou demonstrado que o aumento da área de cobertura arbórea levou a reduções localizadas de temperatura do ar, principalmente no horário de 14h, que o momento em que a instituição recebe a maior parte da carga radiativa. Também, houve aumentos pontuais de umidade relativa do ar e diminuição do desconforto térmico analisado através do UTCI. Os melhores resultados foram apresentados justamente abaixo das áreas reflorestadas, mostrando que a melhoria dos índices depende da distribuição espacial da vegetação e não somente do aumento da área verde ou permeável.

Embora a instituição possua próximo de 55% de sua área permeável e coberta por vegetação, a predominância são de vegetações rasteiras e perenes, cuja contribuição para o conforto térmico é bastante inferior àquela proporcionada pela cobertura arbórea. Conclui-se, então, que a estrutura da

vegetação exerce influência superior às condições microclimáticas do que simplesmente a área ocupada por vegetação em geral.

Enfim, o reflorestamento planejado de áreas subutilizadas se torna uma estratégia válida e eficaz para reduzir o estresse térmico em áreas de clima tropical. Estes dados fornecem subsídio para o planejamento ambiental em áreas centrais das cidades, mostrando que a distribuição espacial da arborização é um fator determinante para a eficiência da solução escolhida e possível, pensando sempre na adaptação climática.

## REFERÊNCIAS

BEHZAD, Z.; GUILANDOUST, A. Enhancing outdoor thermal comfort in a historic site in a hot dry climate (Case study: Naghsh-e-Jahan Square, Isfahan). **Sustainable Cities and Society**, [S.l.], v. 102, p. 105209, mar. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105209.

CHEN, Yaping; ZHENG, B.; HU, Y. Numerical Simulation of Local Climate Zone Cooling Achieved through Modification of Trees, Albedo and Green Roofs—A Case Study of Changsha, China. **Sustainability**, [S.l.], v. 12, n. 7, p. 2752, 1 abr. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su12072752.

CHEN, Yunhao; WU, J.; YU, K.; WANG, D. Evaluating the impact of the building density and height on the block surface temperature. **Building and Environment**, [S.l.], v. 168, p. 106493, jan. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106493.

CRUZ, J. A.; BLANCO, A. C.; GARCIA, J. J.; SANTOS, J. A.; MOSCOSO, A. D. Evaluation of the cooling effect of green and blue spaces on urban microclimate through numerical simulation: A case study of Iloilo River Esplanade, Philippines. **Sustainable Cities and Society**, [S.l.], v. 74, p. 103184, nov. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103184.

DE CARVALHO, G. B. M.; DA SILVA, L. B.; BARBOSA, R. V. R.; DE SOUZA, E. L. Verticalization and microclimatic dynamics: Impacts on environmental conditions in open public spaces of a Tropical Coastal City, João Pessoa, Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, [S.l.], 9 abr. 2026. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-026-07530-y. Disponível em: https://link.springer.com/10.1007/s10668-026-07530-y. Acesso em: 26 jun. 2026.

FARAGALLAH, R. N.; RAGHEB, R. A. Evaluation of thermal comfort and urban heat island through cool paving materials using ENVI-Met. **Ain Shams Engineering Journal**, [S.l.], v. 13, n. 3, p. 101609, maio 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.10.004.

FOWLER, J. A. P. Guia para plantios florestais com espécies nativas. **Embrapa Florestas**, [S.l.], n. 1, p. 24, 2011.

JIA, S.; WANG, Y. Effect of heat mitigation strategies on thermal environment, thermal comfort, and walkability: A case study in Hong Kong. **Building and Environment**, [S.l.], v. 201, p. 107988, ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107988.

KOTHARKAR, R.; DONGARSANE, P. Investigating outdoor thermal comfort variations across Local Climate Zones in Nagpur, India, using ENVI-met. **Building and Environment**, [S.l.], v. 249, p. 111122, fev. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.111122.

LAM, C. K. C.; ALNAQSHABANDY, H.; LEWIN, S.; MOREWOOD, J.; XIE, X.; GOODHEW, S. Making intra-urban monitoring 'a walk in the park': A mobile monitoring approach for assessing pedestrians' environmental conditions. **Building and Environment**, [S.l.], v. 284, p. 113487, out. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113487.

LIU, Z.; CHENG, W.; JIM, C. Y.; MORAKINYO, T. E.; SHI, Y.; NG, E. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and

scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, [S.l.], v. 200, p. 107939, 1 ago. 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107939.

LOPEZ-CABEZA, V. P.; LOOR-VERA, M. J.; DIZ-MELLADO, E.; RIVERA-GOMEZ, C.; GALAN-MARIN, C. Decoding outdoor thermal comfort: The role of location in urban canyon microclimate. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, [S.l.], v. 72, p. 104095, dez. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.seta.2024.104095.

MICHELLE, B.; SATWIKO, P. Striking a Balance Between Nature and Development: Investigating Private Green Spaces using ENVI-met. **Journal of Regional and City Planning**, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 305–321, 1 jan. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.5614/jpwk.2024.35.3.4.

MONTERO-GUTIÉRREZ, P.; PALOMO AMORES, T.; GUERRERO DELGADO, Mc.; MOLINA FÉLIX, J. L.; SÁNCHEZ RAMOS, J.; ÁLVAREZ DOMÍNGUEZ, S. Improving urban resilience and habitability by an effective regeneration of the streets: A comprehensive approach step-by-step validated in a real case. **Building and Environment**, [S.l.], v. 256, p. 111471, maio 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111471.

MORAKINYO, T. E.; OUYANG, W.; LAU, K. K.-L.; REN, C.; NG, E. Right tree, right place (urban canyon): Tree species selection approach for optimum urban heat mitigation - development and evaluation**. Science of The Total Environment**, [S.l.], v. 719, p. 137461, jun. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137461.

PARK, J.; SHIN, Y.; KIM, S.; LEE, S.-W.; AN, K. Efficient Plant Types and Coverage Rates for Optimal Green Roof to Reduce Urban Heat Island Effect. **Sustainability**, [S.l.], v. 14, n. 4, p. 2146, 14 fev. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su14042146.

SCHIBUOLA, L.; TAMBANI, C. A monthly performance comparison of green infrastructures enhancing urban outdoor thermal comfort. **Energy and Buildings**, [S.l.], v. 273, p. 112368, out. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112368.

TAN, X.; LIAO, J.; BEDRA, K. B.; LI, J. Evaluating the 3D cooling performances of different vegetation combinations in the urban area. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, [S.l.], v. 21, n. 3, p. 1124–1136, 4 maio 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1080/13467581.2021.1903905.

VATANI, M.; KIANI, K.; MAHDAVINEJAD, M.; GEORGESCU, M. Evaluating the effects of different tree species on enhancing outdoor thermal comfort in a post-industrial landscape. **Environmental Research Letters**, [S.l.], v. 19, n. 6, p. 064051, 1 jun. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad49b7.

WANG, Q.; PENG, L. L. H.; JIANG, W.; YIN, S.; FENG, N.; YAO, L. Urban form affects the cool island effect of urban greenery via building shadows. **Building and Environment**, [S.l.], v. 254, p. 111398, abr. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111398.

ZHENG, G.; XU, H.; LIU, F.; LIN, X.; WANG, S.; DONG, J. Study Roadmap Selection Based on the Thermal Comfort of Street Trees in Summer: A Case Study from a University Campus in China. **Sustainability**, [S.l.], v. 16, n. 11, p. 4407, 23 maio 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su16114407.