Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO DESCONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTE URBANO TROPICAL: ANÁLISE POR TRANSECTO MÓVEL NAS DEPENDÊNCIAS DO 9° BATALHÃO DE ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO EM CUIABÁ, BRASIL

Spatiotemporal analysis of thermal discomfort in a tropical urban environment: a mobile transect study at the 9th Construction Engineering Battalion in Cuiabá, Brazil

Análisis espacio-temporal del disconfort térmico en un entorno urbano tropical: estudio mediante transecto móvil en las instalaciones del 9.º Batallón de Ingeniería de Construcción en Cuiabá, Brasil

Maicon Secchi
Pós-Graduação em Física Ambiental
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT
Cuiabá, MT, Brasil
maiconsecchi@hotmail.com

Flávia Maria de Moura Santos
Pós-Graduação em Física Ambiental
Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT
Cuiabá, MT, Brasil
flavia_mms@hotmail.com

Resumo: O estudo avaliou a variabilidade espacial e temporal do conforto térmico em ambiente urbano tropical, por meio de transecto móvel a pé realizado nas dependências do 9º Batalhão de Engenharia de Construção em Cuiabá/MT. O objetivo foi caracterizar os impactos sazonais das estações na temperatura e umidade relativa do ar, avaliando o conforto térmico através do Índice de

Calor (HI). Os dados de temperatura e umidade relativa do ar foram coletados em duas estações distintas, estação quente e úmida (março) e estação quente e seca (outubro) no ano de 2025, nos horários de 08:00, 14:00 e 20:00 (UTC -04:00). Com eles, calculou-se o índice de Calor (HI), além das diferenças entre as estações, horários e superfícies (ΔT, ΔUR e ΔHI). Os resultados mostraram aumento significativo da temperatura e diminuição da umidade relativa na estação seca, que culminou com a intensificação do estresse térmico, especialmente às 14h, período considerado crítico. Na análise espacial, observou-se maior desconforto em ambientes com superfícies impermeabilizadas, como pavimentos asfálticos e concreto, ao passo que áreas vegetadas, principalmente com sombreamento, atuaram como agente mitigador. Os testes estatísticos comprovaram diferenças significativas entre estações, horários e pontos do transecto. Concluiu-se que, nesta área, a sazonalidade e as características de cobertura do solo desempenham papel fundamental na moldagem do microclima urbano, destacando a importância da incrementação da vegetação como estratégia de alívio no estresse térmico em áreas urbanas tropicais.
Palavras-chave: Microclima urbano. Índice de calor. Ilha de calor urbana.

Abstract: The study evaluated the spatial and temporal variability of thermal comfort in a tropical urban environment through a pedestrian mobile transect conducted within the 9th Construction Engineering Battalion in Cuiabá, Mato Grosso, Brazil. The objective was to characterize the seasonal impacts on air temperature and relative humidity, assessing thermal comfort using the Heat Index (HI). Air temperature and relative humidity data were collected during two distinct seasons, the hot and humid season (March) and the hot and dry season (October) in 2025, at 08:00, 14:00, and 20:00 (UTC -04:00). Based on these data, the Heat Index (HI) was calculated, along with the differences between seasons, times of day, and surface types (ΔT, ΔUR, and ΔHI). The results showed a significant increase in temperature and a decrease in relative humidity during the dry season, resulting in intensified thermal stress, especially at 14:00, considered the most critical period. Spatial analysis revealed higher discomfort in areas with impermeable surfaces, such as asphalt and concrete pavements, whereas vegetated areas, particularly those providing shading, acted as mitigating factors. Statistical tests confirmed significant differences between seasons, times, and transect points. It was concluded that, in this area, seasonality and land cover characteristics play a fundamental role in shaping the urban microclimate, highlighting the importance of increasing vegetation as a strategy to alleviate thermal stress in tropical urban environments.
Keywords: Urban microclimate. Heat Index. Urban heat island.

Resumen: El estudio evaluó la variabilidad espacial y temporal del confort térmico en un entorno urbano tropical mediante un transecto móvil a pie realizado en las instalaciones del 9º Batallón de Ingeniería de Construcción en Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. El objetivo fue caracterizar los impactos estacionales sobre la temperatura del aire y la humedad relativa, evaluando el confort térmico a través del Índice de Calor (HI). Los datos de temperatura y humedad relativa del aire fueron recolectados en dos estaciones distintas, la estación cálida y húmeda (marzo) y la estación cálida y seca (octubre) del año 2025, en los horarios de 08:00, 14:00 y 20:00 (UTC -04:00). A partir de estos datos, se calculó el Índice de Calor (HI), así como las diferencias entre estaciones, horarios y tipos de superficie (ΔT, ΔUR y ΔHI). Los resultados mostraron un aumento significativo de la temperatura y una disminución de la humedad relativa durante la estación seca, lo que resultó en una intensificación del estrés térmico, especialmente a las 14:00, considerado el período más crítico. El análisis espacial evidenció mayor disconfort en áreas con superficies impermeables, como pavimentos asfálticos y de concreto, mientras que las áreas vegetadas, especialmente aquellas con sombra, actuaron como factores mitigadores. Las pruebas estadísticas confirmaron diferencias significativas entre estaciones, horarios y puntos del transecto. Se concluye que, en esta área, la estacionalidad y las características de cobertura del suelo desempeñan un papel fundamental en la conFiguración del microclima urbano, destacando la

importancia de incrementar la vegetación como estrategia para reducir el estrés térmico en entornos urbanos tropicales.
Palabras clave: Microclima urbano. Índice de Calor. Isla de calor urbana.

Submetido em: 04/04/2026
Aceito para publicação em: 07/11/2026
Publicado em: 15/11/2026

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas e consequentes intensificações dos eventos de calor extremo têm ampliado o foco na preocupação relacionada às condições térmicas dos ambientes urbanos e seus impactos sobre a população. Com o avanço da urbanização e consequente alterações na cobertura e uso do solo, o balanço energético das superfícies são alterados e podem intensificar o aquecimento local, especialmente se tratando de regiões tropicais.

No Brasil, graças a sua extensão continental, a diversidade das condições climáticas resulta em diferentes padrões de temperatura e precipitações, que acabam por influenciar as condições térmicas dos ambientes urbanos. Em regiões tropicais, características de temperaturas elevadas, sazonalidade das chuvas e características do ambiente construído tornam relevante a investigação da variabilidade microclimática e suas implicações para o desconforto térmico da população ao ar livre (MOREIRA et al., 2024).

O estado do Mato Grosso, sito na região Centro-Oeste do país, apresenta vários ecossistemas e climas, graças à sua extensão territorial. Mesmo assim, há predominância de temperaturas elevadas ao longo do ano todo e sazonalidade nas precipitações, com período seco e chuvoso bem definido. Em Cuiabá, sua capital, essas características são associados a diferentes formas de ocupação urbana, quase sempre desorganizada, o que pode contribuir para a variabilidade espacial e temporal da temperatura e umidade relativa do ar, influenciando diretamente nas condições de conforto térmico de sua população.

A urbanização acelerada e sem critérios técnicos norteando as decisões acarreta grandes mudanças superficiais naturais existentes, transformando o que antes era permeabilidade e vegetação em superfícies que alteram o balanço de energia superficial, sendo utilizados principalmente materiais com baixo potencial de refletividade e alta capacidade térmica, como é o caso do asfalto e do concreto. Isso acaba absorvendo o calor advindo do sol durante o período do dia e, durante a noite, este calor acaba sendo liberado lentamente. Construções que adensam ambientes e a quase inexistência de vegetação colaboram com a retenção do calor, decido à redução dos fluxos de calor latente via evapotranspiração. Isso transforma cidades em ambientes de alto estresse térmico para seus habitantes e ajuda a caracterizar o conceito de Ilha de Calor Urbana (ICU) (ROBINSON et al., 2026; ZOU et al., 2021).

Se levar em consideração apenas a temperatura do ar, a percepção térmica do ser humano não será refletida de maneira adequada, pois não leva em consideração a capacidade do corpo em dissipar calor por meio da transpiração, principalmente em ambientes com alta umidade. Para que a análise desta percepção seja mais assertiva, existe o Índice de Calor (ou Heat Index – HI), também chamada de temperatura aparente, que leva em consideração tanto a temperatura do ar como a umidade relativa para quantificar o estresse térmico que o ser humano sente em determinado local (MOREIRA et al., 2024; XU et al., 2025).

Em áreas urbanas, principalmente em grandes centros, como é o caso de Cuiabá e do 9º Batalhão de Engenharia com seus mais de 200.000m² de área, existe a coexistência de inúmeros microclimas. Áreas com maior quantidade de vegetação exercem resfriamento significativo pelo sombreamento e através da evapotranspiração, que em casos como o estudo de (CHÀFER et al., 2022) chegaram a reduzir a temperatura até 4,8ºC na comparação com áreas abertas e sem cobertura vegetal. Ainda, áreas com superfícies impermeáveis e revestidas com concreto possuem a capacidade de reter radiação de onda longa, aumentando o IC mesmo no período noturno (VIEIJRA et al., 2023).

Nesse contexto, a investigação das condições em escala microclimática torna-se relevante para a compreensão de como diferentes características de uso e cobertura do solo se relacionam com a variação térmica e as condições de exposição ao calor em ambientes tropicais urbanos. A escolha do 9º Batalhão de Engenharia de Construção (9º BEC), em Cuiabá, justifica-se pela coexistência de superfícies asfaltadas, concretadas, espaços vegetados e solo exposto coexistentes em uma mesma área, o que permite avaliar condições micro ambientais diversas sob um mesmo contexto climático. A realização de transectos móveis a pé em diferentes horários e períodos sazonais possibilita caracterizar a variabilidade espacial e temporal da temperatura do ar, da umidade relativa e do Índice de Calor, contribuindo para a compreensão das condições de estresse térmico em espaço aberto, em escala local. Além da contribuição prática para a climatologia urbana, o estudo oferece subsídios para locais prioritários para intervenção e planejamento de estratégicas de mitigação térmica.

Com esta proposição, este artigo buscou caracterizar o comportamento térmico, de umidade relativa e Índice de Calor ao longo do trajeto do transecto móvel nos horários de 8h, 14h e 20h (UTC -04:00), considerando a estação quente e úmida (março de 2025) e quente e seca (outubro de 2025); quantificar as diferenças termo higrométricas (ΔT e ΔUR) entre as

duas estações; fazer a avaliação do conforto térmico ao longo do percurso utilizando o Índice de Calor (Heat Index), identificando cenários de estresse térmico; analisar estatisticamente as diferenças observadas entre as estações, horários e pontos de transecto e, ao fim, identificar as áreas críticas de desconforto térmico, fazendo a relação entre o índice e a cobertura superficial encontrada.

Ressalta-se a contribuição direta deste estudo aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), com destaque ao ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis, visando elementos para o planejamento urbano baseado na comodidade térmica; e ODS 13 - Ação Contra a Mudança Global do Clima, com a avaliação de variáveis climáticas sazonais no ambiente urbano, como contribuição indireta à adaptação ao calor.

2. METODOLOGIA

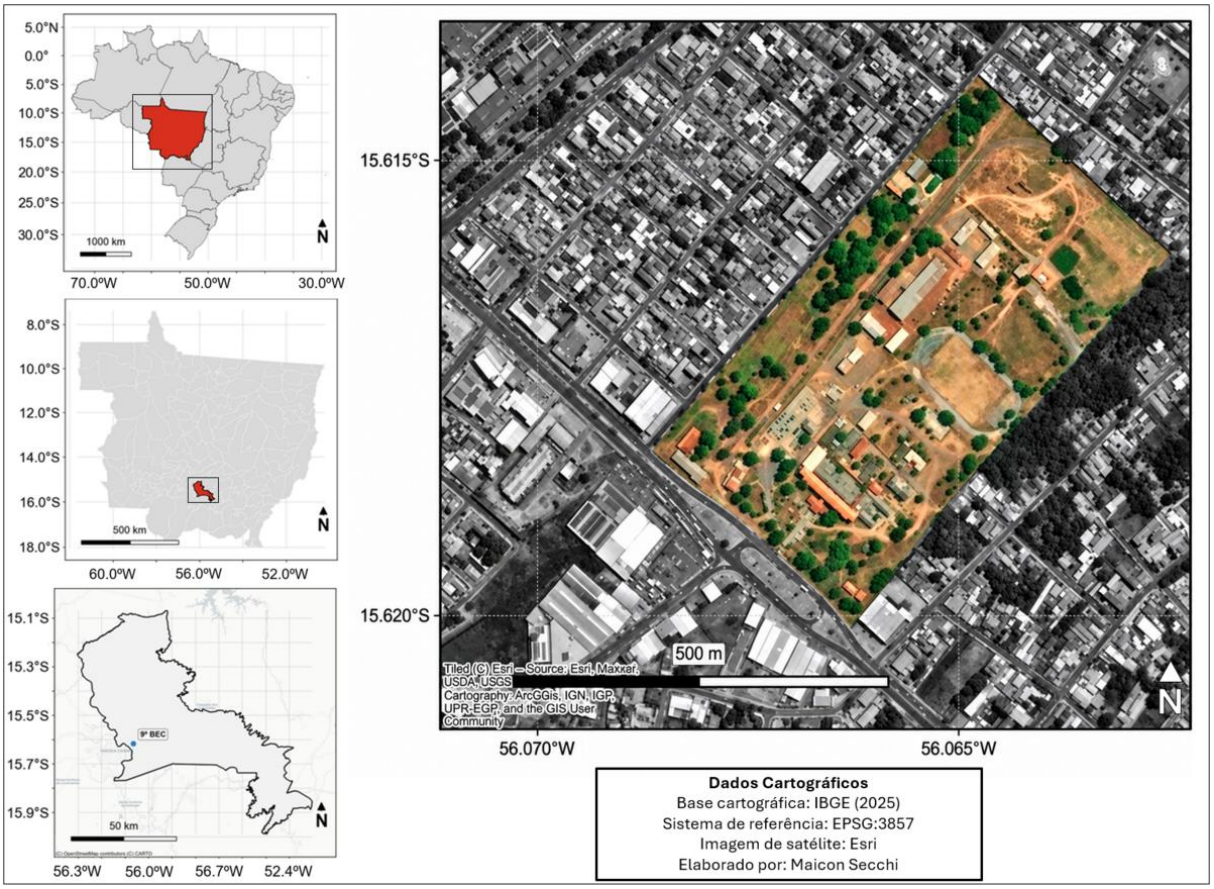
2.1. Área de Estudo

A área de estudo delimitada para a pesquisa foi o imóvel pertencente ao 9º Batalhão de Engenharia de Construção (9º BEC), que apresenta microclimas diversos, dada a sua proporção, com área aproximada de 200.000m² sitos em uma das principais avenidas de Cuiabá, a Av. Fernando Corrêa da Costa, tendo como ponto de referência tendo como ponto geográfico de referência seu acesso principal, nas coordenadas 15,619249° S e 56,067091° O, conforme a delimitação espacial apresentada na Figura 1. A presença de diferentes tipos de cobertura do solo, incluindo áreas construídas, superfícies impermeabilizadas e espaços vegetados, torna o local adequado à investigação da variabilidade microclimática em escala local.

Esta área de estudo está inserida no contexto climático de Cuiabá, caracterizado como tropical de savana, do tipo Aw segundo a classificação de Köppen-Geiger, com temperaturas elevadas ao longo do ano e sazonalidade pluviométrica bem definida, marcada pela concentração das chuvas na primavera e no verão e pela estiagem predominante no outono e no inverno. Para o período climatológico de 1991 a 2020, dados da base WorldClim/CRU indicam temperatura média anual de aproximadamente 26,8 °C e precipitação média anual de 1.469 mm. Essas características climáticas regionais contextualizam as campanhas

realizadas em março e outubro de 2025, representativas dos períodos quente-úmido e quente-seco considerados nesta pesquisa (SOUZA *et al.*, 2013).

Figura 1 -Área de estudo pertencente ao 9º BEC em destaque, no município de Cuiabá, Mato Grosso**.**



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

2.2. Delineamento Experimental e Coleta de Dados

O levantamento de dados meteorológicos em campo foi realizado em 2 períodos distintos em busca da caracterização sazonal: na estação quente e úmida, com coletas nos dias 17, 18 e 19 de março de 2025, e na estação quente e seca, com coletas nos dias 7, 8 e 9 de outubro de 2025. Para ambos os períodos, foram realizados transectos móveis a pé nos horários da manhã (08:00), tarde (14:00) e noite (20:00) (UTC -04:00), conforme aponta a Organização Mundial de Meteorologia (OMM).

As campanhas foram realizadas durante três dias consecutivos em cada período sazonal, mediante seleção prévia das datas com base nas previsões meteorológicas e verificação das condições atmosféricas em campo. Adotou-se como critério a ausência de precipitação

durante as medições e, pelo menos, nas 24 horas anteriores ao início de cada campanha, visando minimizar sua influência sobre as condições microclimáticas observadas. Durante os períodos de monitoramento, não foram registradas precipitações, tampouco variações meteorológicas abruptas entre os dias de coleta. O delineamento buscou, assim, favorecer a comparação das condições termo-higrométricas entre os pontos e horários avaliados, sem pressupor que três dias de monitoramento sejam representativos da totalidade de cada estação climática.

O percurso foi mantido constante em todas as coletas, o que possibilitou a comparação direta entre os cenários. As coletas de dados foram realizadas através de transecto móvel a pé, com o registro das variáveis durante o percurso com o auxílio de um Datalogger AKROM KR440, que apresenta exatidão de ±1°C para temperatura do ar e ±3% para umidade relativa. Os sensores foram calibrados pelo fabricante, com fornecimento do Certificado de Calibração N° 2559/2024 e foram protegidos da incidência de radiação solar durante a coleta dos dados.

O sensor foi posicionado a 1,50m de altura em relação ao solo, que representa as condições meteorológicas ao nível do pedestre. O transecto foi realizado em velocidade média de 5 km/h, que é a velocidade de um transeunte, garantindo que os dados fossem registrados continuadamente a cada 5 segundos. Foram demarcados 11 pontos de passagem, que podem ser vistos na Figura 2, com revestimentos/edificações variados, passando por áreas asfaltadas, concreto, vegetação rasteira, solo exposto e um bosque, de modo a demonstrar a variabilidade de uso e ocupação do solo, conforme demonstrado no Quadro 1. Em cada um destes pontos, houve uma parada de 1 minuto de duração, mantendo-se o registro contínuo das variáveis meteorológicas pelo equipamento, com o objetivo de reduzir os efeitos da transição entre os diferentes ambientes percorridos. O circuito foi fechado, ou seja, o trajeto terminou exatamente no mesmo ponto de começo (P1=P12).

Figura 2 – Traçado do transecto móvel realizado nas dependências do 9º BEC com a identificação dos pontos amostrais.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Quadro 1 – Caracterização do uso e cobertura do solo nos pontos amostrais do transecto móvel no 9º BEC

Ponto amostral e Coordenadas	Registro fotográfico	Uso e cobertura do solo
P1 = P12 — Entrada 15°37'08.6"S 56°04'00.9"W		Pavimentação asfáltica (CBUQ) e elementos de concreto, com canteiros gramados e árvores esparsas; predomínio de superfície impermeabilizada e exposição solar direta.
P2 — Pátio de Formaturas 15°37'06.7"S 56°03'59.2"W		Área aberta pavimentada com CBUQ, circundada por edificações e arborização periférica; ampla exposição à radiação solar.

Ponto amostral e Coordenadas	Registro fotográfico	Uso e cobertura do solo
P3 — Estacionamento 15°37'05.2"S 56°04'02.0"W		Pavimento intertravado de concreto (paver), com veículos estacionados e faixas gramadas periféricas; baixa cobertura arbórea sobre o piso.
P4 — Recanto da Engenharia 15°37'05.2"S 56°04'04.0"W		Solo parcialmente exposto e cobertura herbácea, com árvores de médio e grande porte distribuídas no entorno; sombreamento localizado.
P5 — Abastecimento 15°37'02.0"S 56°03'59.6"W		Área de circulação e operação com superfícies de concreto e asfalto, intercaladas por faixas de solo e vegetação rasteira; arborização pontual.
P6 — Arpop 15°36'55.8"S 56°03'54.6"W		Via asfaltada adjacente a vegetação arbórea de grande porte e faixas gramadas; contraste entre superfície impermeável e cobertura vegetal.
P7 — Terreno baldio 15°36'54.7"S 56°03'49.2"W		Área aberta com solo exposto e vegetação herbácea descontínua; pouca arborização e elevada exposição solar.
P8 — Pista-escola 15°37'00.0"S 56°03'50.2"W		Pista asfaltada (CBUQ) com vegetação rasteira nas bordas e arborização distante; predomínio de superfície impermeável exposta.

Ponto amostral e Coordenadas	Registro fotográfico	Uso e cobertura do solo
P9 — Campo 15°37'03.8"S 56°03'52.5"W		Área predominantemente gramada, com árvores isoladas e estruturas esportivas pavimentadas com pedra britada; superfície permeável e sombreamento pontual.
P10 — Caixa d'água 15°37'08.4"S 56°03'57.4"W		Superfícies de pedra britada junto à edificação e à torre de reservatório, adjacentes a gramado e árvores de grande porte.
P11 — Bosque 15°37'09.2"S 56°04'00.3"W		Área gramada com árvores de grande porte e copas amplas, formando sombreamento expressivo e predominância de cobertura vegetal.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Na coleta, foram incluídas duas variáveis meteorológicas passíveis de captação pelo sensor utilizado: temperatura do ar (ºC) e umidade relativa do ar (%). Com elas, foram estabelecidas derivadas métricas complementares, como diferença de temperatura (ΔT) e a diferença de umidade relativa do ar (ΔUR), e o cálculo de índices, que serviram de base para a comparação entre as estações do ano e entre os próprios pontos do transecto.

2.3. Índice de Conforto Térmico

Utilizou-se o Índice de Calor (Heat Index - HI) como meio para avaliação das condições de calor do transeunte. Este índice integra os efeitos da temperatura e da umidade relativa do ar e é amplamente utilizada para estimar a sensação térmica humana em ambientes externos, sendo escolhido pela disponibilidade das medições diretas de temperatura do ar e umidade relativa do ar locais nos pontos amostrais, horários e períodos sazonais. Embora índices como UTCI, PET e WBGT permitam avaliações mais abrangentes da exposição térmica humana, sua aplicação requer informações adicionais, especialmente relacionadas à radiação e ao vento,

não contempladas no delineamento experimental. Reconhece-se que o HI apresenta limitações em ambientes externos, particularmente sob exposição solar direta, por não incorporar explicitamente os efeitos da radiação, do vento e das características individuais dos usuários. Dessa forma, seus resultados foram interpretados como indicadores de calor aparente associado à temperatura e à umidade relativa, e não como uma avaliação integral do conforto térmico dos transeuntes. O índice foi calculado para todo o percurso do transecto, em todos os horários, de forma a permitir identificar as condições de estresse térmico e as variações temporal e espacial na área avaliada. Para isso, foi utilizada a equação padrão (utilizada internacionalmente, baseada no *National Weather Service*):

$$\begin{aligned} Index_{heat} = & -42.379 + (2.04901523 \times T) + (10.14333127 \times rh) \\ & - (0.22475541 \times T \times rh) - (6.83783 \times 10^{-3} \times T^2) \\ & - (5.481717 \times 10^{-2} \times rh^2) + (1.22874 \times 10^{-3} \times T^2 \times rh) \\ & + (8.5282 \times 10^{-4} \times T \times rh^2) - (1.99 \times 10^{-6} \times T^2 \times rh^2) \end{aligned}$$

onde:

- Heat Index = Índice de Calor em °F;

- T = Temperatura do Ar em °F;

- rh = Umidade Relativa do Ar em %.

2.4. Análise Estatística

Os dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar e índice de calor (HI) foram submetidos à análise estatística para investigar as diferenças entre os períodos sazonais, os horários de medição e os pontos amostrais do transecto móvel. O processamento e as análises foram realizados em ambiente Python, versão 3.12.2, com utilização das bibliotecas Pandas, SciPy e scikit-posthocs. Adotou-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

A base de dados analisada compreendeu 2.424 registros, obtidos em intervalos de cinco segundos, dos quais 864 corresponderam às medições realizadas nos pontos amostrais e 1.560 aos deslocamentos entre eles. Para as análises inferenciais, foram excluídos os registros dos deslocamentos, mantendo-se as observações dos 12 pontos identificados ao longo do percurso (P1 a P12). Inicialmente, calcularam-se as médias de temperatura, umidade relativa e HI para cada combinação de ponto amostral, período sazonal e horário. A normalidade das

diferenças pareadas entre os períodos quente-seco e quente-úmido foi examinada pelo teste de Shapiro-Wilk.

Para a comparação entre os períodos sazonais, aplicou-se o teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas, separadamente para os horários de 08h, 14h e 20h. Nessa análise, foram utilizadas as médias de cada ponto amostral, considerando-se 12 pares de observações por horário (n = 12). As diferenças entre os três horários, em cada período sazonal, foram investigadas pelo teste de Friedman, utilizando-se os 12 pontos do percurso como blocos de observações relacionadas (n = 12).

A variabilidade entre os pontos amostrais foi avaliada por meio do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis, aplicado separadamente para cada variável, período sazonal e horário. Nessas comparações, foram utilizadas 12 leituras por ponto, totalizando 144 registros instrumentais distribuídos entre os 12 grupos de cada análise. Para identificar os pares de pontos com diferenças estatisticamente significativas, empregou-se o pós-teste de Dunn, com ajuste de Bonferroni para comparações múltiplas. Essa análise complementar foi realizada para as medições das 14h, horário selecionado para o detalhamento da variabilidade espacial.

A análise espacial foi desenvolvida mediante a comparação das condições microclimáticas nos pontos amostrais distribuídos ao longo do percurso, considerando suas diferentes características de uso e cobertura do solo. Não foram realizados procedimentos de interpolação ou modelagem geoestatística para estimar a distribuição contínua das variáveis na área de estudo. Adicionalmente, não foram aplicados modelos específicos para a autocorrelação temporal das leituras sucessivas ou para a dependência espacial entre os pontos. Dessa forma, as inferências decorrentes das comparações entre pontos foram interpretadas de maneira exploratória, considerando essas limitações do delineamento analítico.

3. RESULTADOS

3.1. Temperatura do Ar

A temperatura do ar variou ao longo do transecto, demonstrando diferenças significativas entre as estações quente/seca e quente/úmida, bem como entre os horários de coleta (Figura 3). De maneira geral, os valores registrados na estação quente e seca superaram

sistematicamente os valores da estação quente e úmida em todos os horários, o que indica um padrão consistente de temperaturas mais elevadas na estação seca.

Às 8h, observaram-se diferenças de temperatura do ar entre os períodos quente-seco e quente-úmido em todos os pontos amostrais, com ΔT variando de 2,6 °C (P11) a 5,1 °C (P1), conforme apresentado na Figura 3c. Esses resultados evidenciam a influência da sazonalidade sobre as condições térmicas locais desde o início do dia. Observou-se, ainda, diferença entre as temperaturas registradas em P1 e P12, que correspondem à mesma localização física, mas foram monitorados em momentos distintos do percurso. Às 8h, a temperatura média em P12 foi 3,13 °C superior à de P1 no período quente-úmido e 1,80 °C superior no período quente-seco, após aproximadamente 33 minutos de deslocamento. Essa diferença indica a influência potencial da evolução temporal das condições atmosféricas sobre as medições do transecto, não sendo possível atribuí-la exclusivamente às características de uso e cobertura do solo ou quantificar isoladamente o viés temporal sem uma referência meteorológica simultânea.

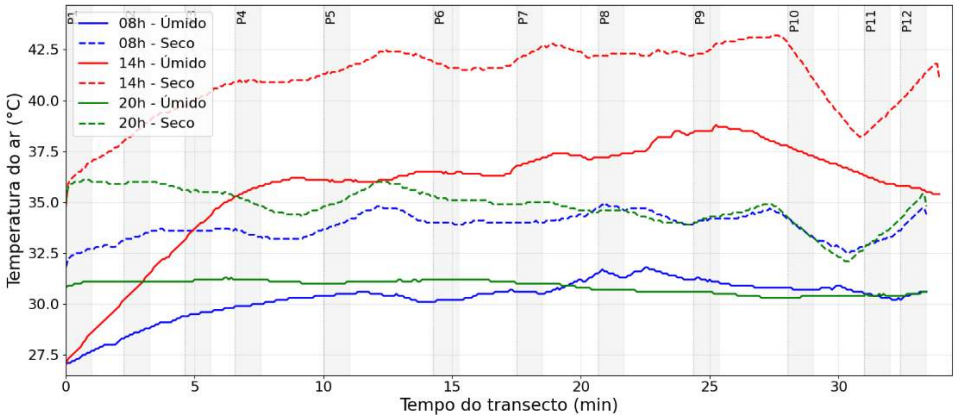
No período da tarde (14h), foram encontradas as maiores diferenças térmicas entre as estações e, também, entre os pontos do mesmo percurso (maiores ΔT), especialmente nos pontos P1 e P2. Com a mudança da estação úmida para a estação seca, são exatamente estes os pontos com maior incremento de temperatura, conforme distribuição da Figura 3b e no comportamento horário da Figura 3c. Este comportamento é característico de superfícies urbanizadas com maior sensibilidade térmica, já que os pontos são revestidos com concreto asfáltico. Wang *et al.* (2024), ao analisarem variações microclimáticas sazonais, confirmaram que os parâmetros térmicos diurnos e o estresse térmico (PET) atingem seus picos entre 13h e 15h, e que o impacto da vegetação e da cobertura do solo é significativamente mais expressivo e variável no período de maior radiação

Durante a noite (20h), observou-se redução próxima de 26% na diferença média de temperatura do ar entre os períodos quente-seco e quente-úmido, em comparação às 14h, passando de 5,4°C para 4°C. Entretanto, os valores de ΔT permaneceram positivos em todos os pontos amostrais, variando de 2,8°C a 4,9°C. Esse comportamento demonstra a persistência das diferenças térmicas sazonais no período noturno, mesmo após a redução da radiação solar incidente. A manutenção de temperaturas elevadas pode estar associada, entre outros fatores, à capacidade de armazenamento e posterior liberação de energia térmica pelas superfícies urbanizadas. Estudos realizados em ambientes tropicais, como o de Chàfer et al.

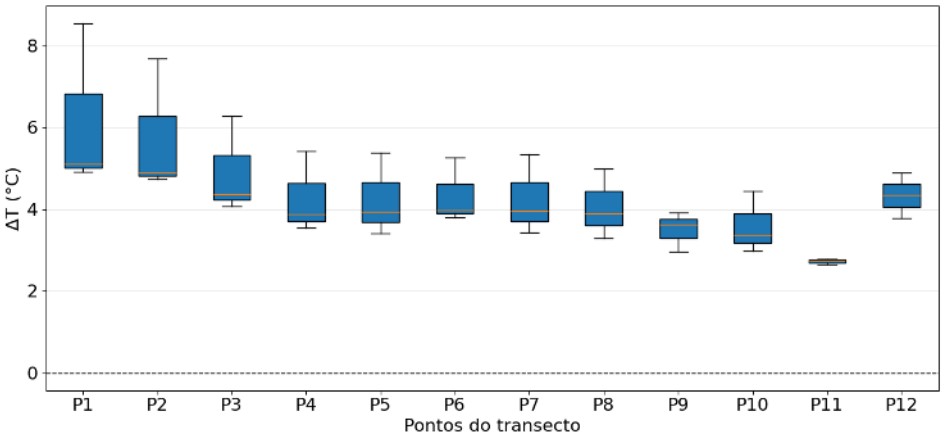
(2022), também evidenciam a influência da cobertura vegetal e das características urbanas sobre as condições microclimáticas diurnas e noturnas.

Figura 3 – Comportamento dos dados de Temperatura coletados ao longo do Transecto Móvel. (a) Perfil Térmico ao decorrer do percurso nos horários de 08h, 14h e 20h; (b) distribuição da diferença térmica entre as estações seca e úmida (ΔT = Tseco – Túmido) por ponto amostral; (c) variação da diferença térmica (ΔT) de acordo com o horário de coleta**.**

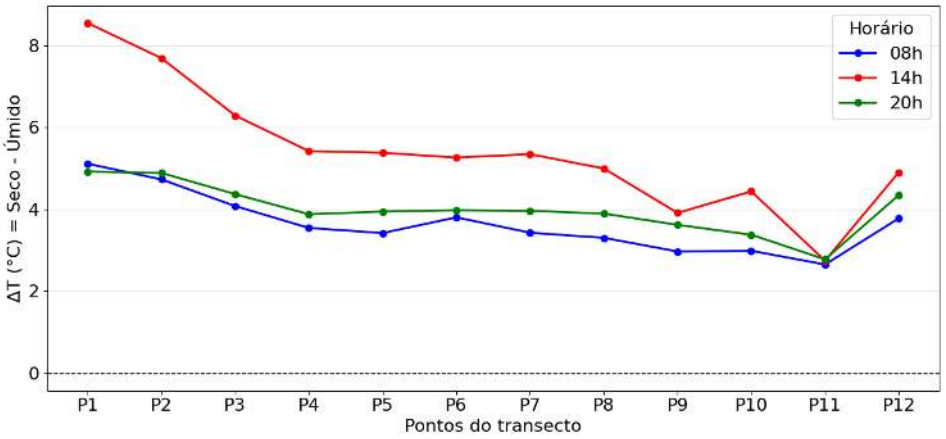
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Também é observada a diferença de temperatura dentro de um mesmo transecto, graças à mudança espacial realizada e, consequentemente, mudança de superfícies (Figura 3a).

Pontos com grande presença de vegetação, como o P11, localizado em meio a um pequeno bosque, apresentam menores variações em comparação com pontos revestidos basicamente com concreto asfáltico, como é o caso do ponto P1 e P2. Isso corrobora com a premissa de que áreas com maior cobertura vegetal possuem mais estabilidade térmica, assim como apontado por Chu *et al.* (2024), o compararem pontos de amostragem em áreas abertas pavimentadas com basalto e pontos em espaços semiabertos sombreados por bosques/árvores sobre grama em típicas quadras urbanas na China.

Os resultados mostram que a estação seca intensifica tanto os valores absolutos de temperatura como também a variabilidade espacial ao longo do ambiente. Quando se combina baixa umidade relativa e especificidades da superfície, como materiais com alta capacidade de armazenamento térmico, tem-se a amplificação das diferenças térmicas, especialmente no período da tarde.

3.2. Umidade Relativa do Ar

No que tange à umidade relativa do ar, nota-se a redução sistemática desta na estação quente e seca quando comparada com a estação quente e úmida, ao longo de todo o transecto, em todos os horários (Figuras 4a, 4b e 4c). Essa diferença evidencia a influência da sazonalidade sobre as condições higrométricas da área estudada, com alterações de magnitude distintas ao longo do dia. Considerando-se ΔUR como a diferença entre a umidade relativa média dos períodos quente-seco e quente-úmido, os valores permaneceram negativos em todo o percurso, indicando a predominância de condições atmosféricas mais secas na campanha de outubro.

No período matutino (8h), a intensidade da diferença de umidade foi menor, próximas a -20% ao longo do trajeto. Ao contrário disso, no período da tarde, as maiores discrepâncias foram encontradas, com valores de ΔUR chegando a 30%, combinando altas temperaturas e baixa umidade relativa do ar no período seco. À noite, apesar das diferenças ligeiramente menores do que à tarde, ainda se percebe valores de ΔUR elevados, indicando que as condições mais secas ao longo do dia são persistentes. De Carvalho *et al.* (2026) verificaram que nos horários de maior incidência solar (10:30–17:00), ocorrem as menores médias de

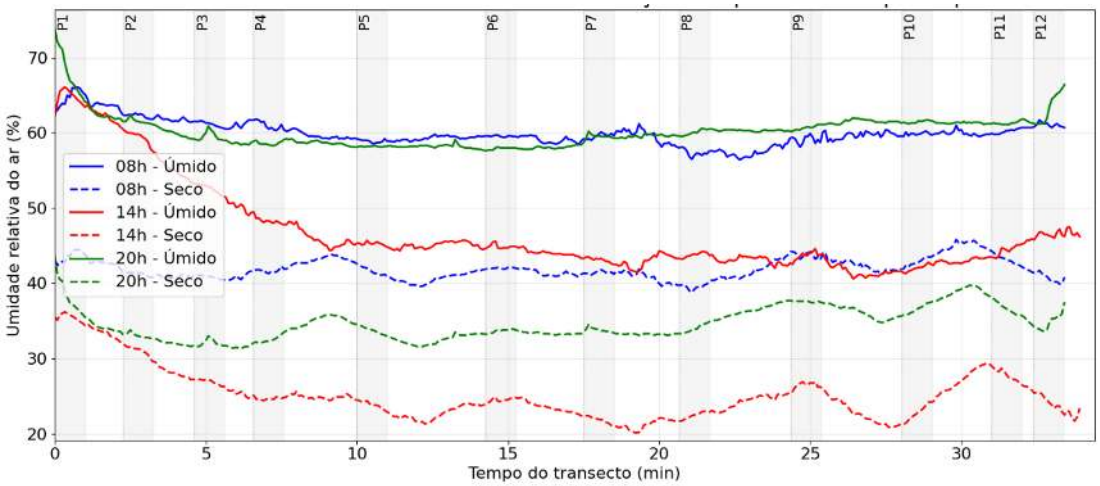
umidade relativa e que a retendo de calor e a reduzida evapotranspiração do meio no período seco mantêm desvios de umidade negativos inclusive no período noturno.

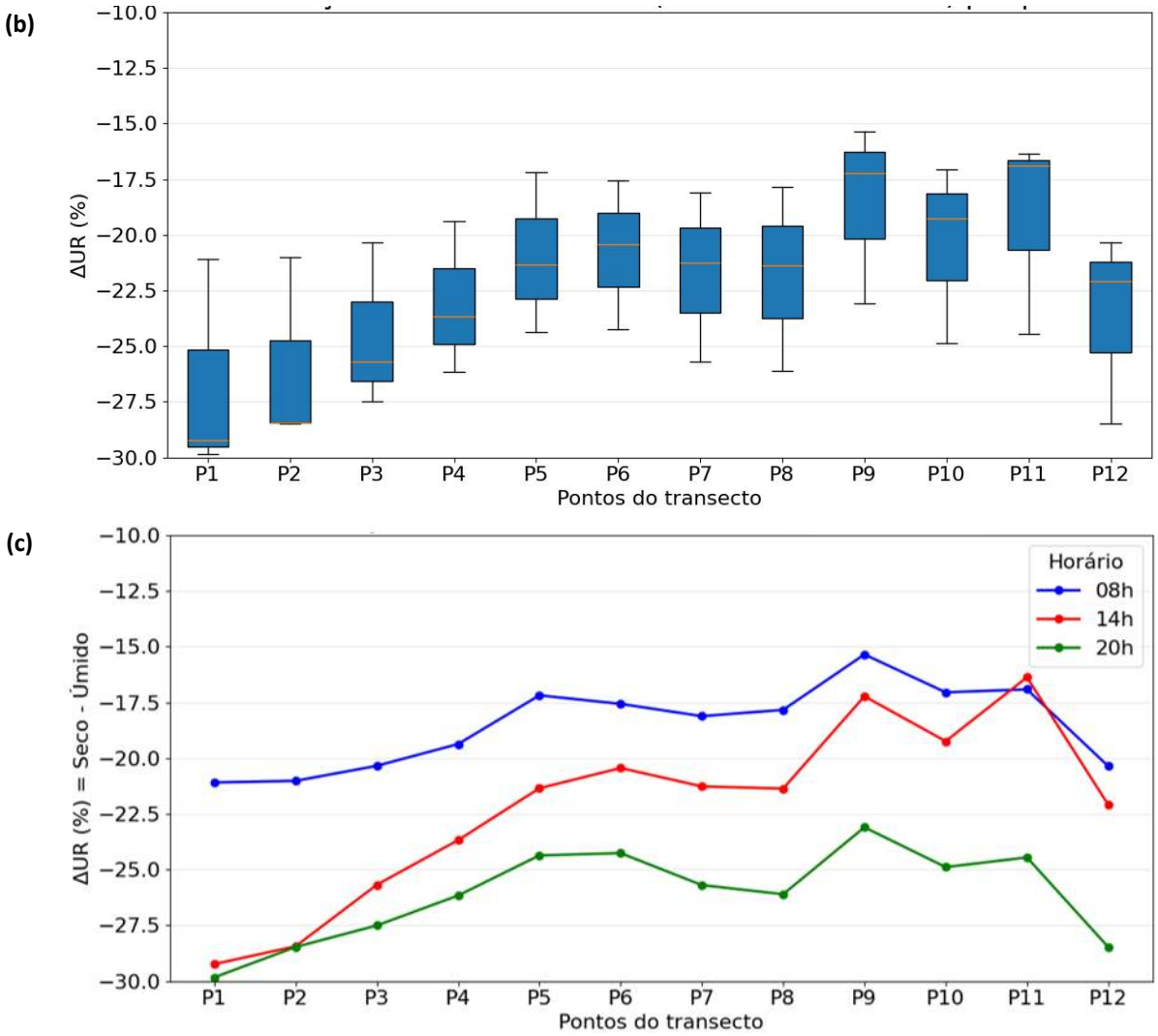
A análise espacial evidenciou diferenças na magnitude de ΔUR entre os pontos amostrais. Os pontos P9, caracterizado por cobertura gramada, e P11, situado em área arborizada, apresentaram diferenças sazonais médias menos negativas, de −18,5 e −19,2 %, respectivamente, considerando os três horários avaliados. Em contrapartida, P1 e P2 apresentaram diferenças médias mais acentuadas, de −26,7 e −25,9%. Esses resultados indicam uma associação entre as características locais de uso e cobertura do solo e a distribuição espacial das condições higrométricas, embora a influência específica da vegetação não possa ser isolada dos demais fatores meteorológicos e ambientais. Corroborando com estas informações, Qi *et al.*(2023) confirmam experimentalmente que o fluxo de ar ao atravessar superfícies arborizadas ganha umidade por transpiração, estabelecendo um gradiente de retenção de umidade superior ao de áreas desprovidas de vegetação

A distribuição apresentada no boxplot (Figura 4b) reforça esse comportamento, evidenciando medianas mais negativas nos pontos P1 e P2, próximos de −29 e −28%, respectivamente, enquanto P9 e P11 apresentam medianas próximas de −17%. A dispersão representada pelas caixas e hastes indica variações entre os horários, porém todas as diferenças permaneceram negativas, confirmando a menor umidade relativa no período quente-seco.

Figura 4 – Comportamento dos dados de Umidade Relativa do Ar coletados ao longo do Transecto Móvel. (a) Perfil de umidade relativa ao decorrer do percurso nos horários de 08h, 14h e 20h; (b) distribuição da diferença térmica entre as estações (ΔUR = URseco – URúmido) por ponto amostral; (c) variação da diferença de umidade relativa (ΔUR) de acordo com o horário de coleta.

(a)





Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.3. Índice de Calor - HI

Acompanhando a tendência, o HI evidenciou que a estação quente e seca foi intensificado, principalmente no período da tarde, conforme apresentado na Figura 6. Às 14h, os valores atingiram, praticamente durante todo o percurso, a faixa de "Perigo", com picos ultrapassando os 46°C no ponto P9, vide Figura 5a. Mesmo na estação úmida, os valores se mantiveram em níveis que exigem atenção. Segundo o National Weather Service (NWS), essa classificação indica maior risco de câimbras e exaustão pelo calor, além da possibilidade de insolação grave em situações de exposição prolongada ou atividade física. Mesmo no período quente-úmido, os valores observados indicaram condições que exigem atenção, especialmente para indivíduos submetidos a esforços físicos ao ar livre. Lopez-Cabeza *et al.* (2024) demonstraram que em climas e estações quente-úmidas, a elevada umidade relativa

do ar dificulta a dissipação de calor pela evaporação do suor, mantendo o estresse térmico elevado mesmo quando as temperaturas absolutas não atingem máximas extremas. Su, Zhang e Chang (2022) relataram que o aquecimento urbano predisposta a reações humanas graves, como insolação e desidratação, levando a um aumento sistemático da morbidade e mortalidade nas cidades.

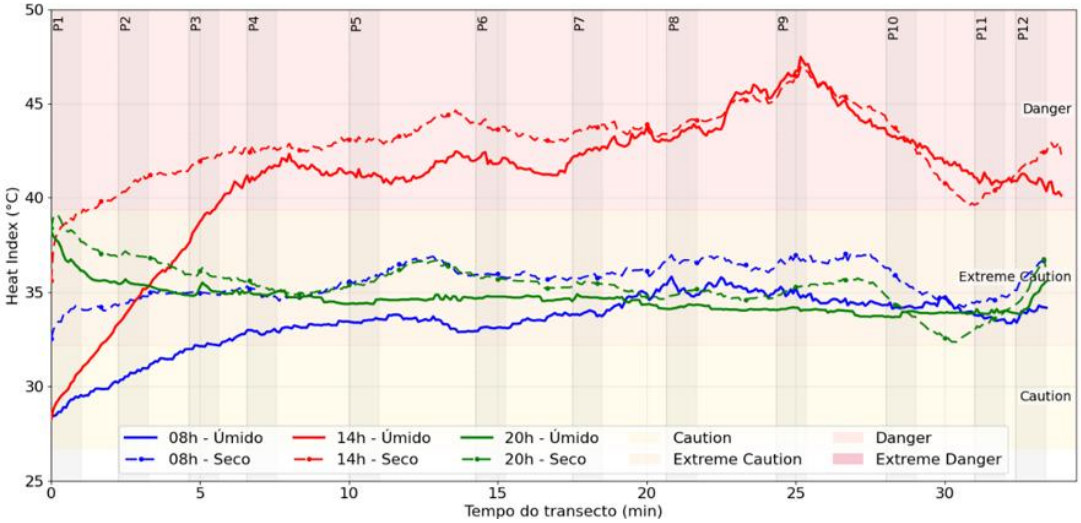
No período matutino (8h), os valores permaneceram no intervalo que indicam Cuidado e Extremo Cuidado. Destaca-se que as diferenças entre as estações seca e úmida, para este horário, sempre ficaram positivas (ΔHI>0), significando que a estação seca apresenta maior desconforto térmico (Figuras 5b e 5c). No período da noite, os valores diminuíram, mas ainda permanecem elevados, principalmente na estação seca, o que indica a baixa dissipação térmica.

O boxplot (Figura 5b) confirma a variabilidade espacial, com amplitudes majoradas em pontos mais expostos e minoradas em áreas vegetadas. Em termos gerais, os resultados apontam que a estação seca potencializa o estresse térmico do usuário que ocupa o espaço urbano estudado, enquanto a vegetação ocupa papel importante para modulação do conforto térmico.

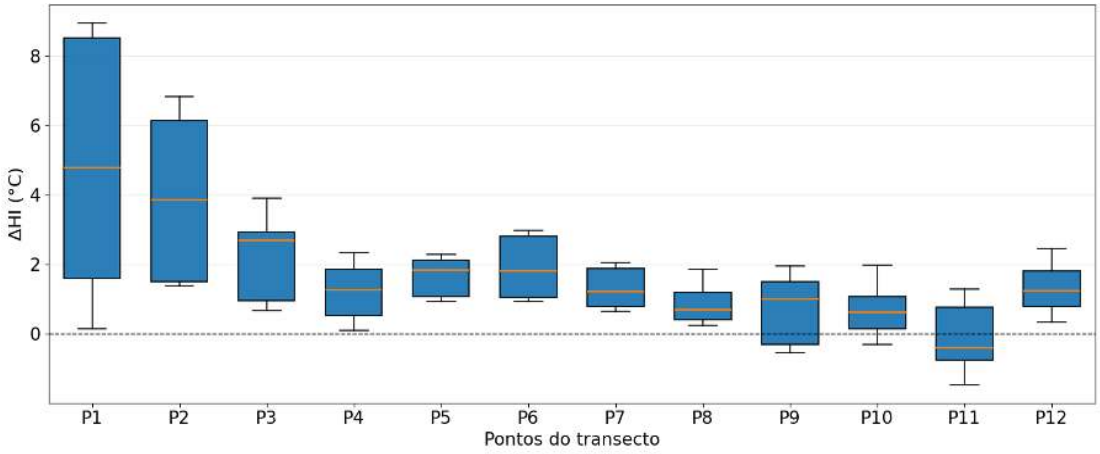
Analisando o espaço, destaca-se a maior variação nos pontos iniciais (P1-P3), com ΔHI elevado, sobretudo às 14h. Em contraste, onde existe predominantemente vegetação houve a redução do índice e, neste aspecto, o P11 chama a atenção por apresentar ΔHI negativos, tornando o estresse término menor na estação seca em comparação com a estação úmida. Embora a temperatura do ar tenha sido maior nessa estação, a redução da umidade relativa contribuiu para esse comportamento, uma vez que o HI depende da interação entre essas variáveis. A cobertura arbórea também pode favorecer condições microclimáticas distintas das áreas pavimentadas, mas sua contribuição específica não pode ser isolada a partir do HI. O resultado evidencia, portanto, que temperaturas mais elevadas nem sempre correspondem a maiores valores desse índice, especialmente quando acompanhadas de reduções expressivas da umidade relativa (Behzad; Guilandoust, 2024).

Figura 5 – Variação do Índice de Calor calculado ao longo do Transecto Móvel para as estações úmida e seca. (a) Perfil do HI ao decorrer do percurso nos horários de 08h, 14h e 20h, com classificação da faixa de risco; (b) distribuição da diferença do Índice de Calor entre as estações (ΔHI = HIseco – HIúmido) por ponto amostral; (c) variação da diferença de Índice de Calor (ΔHI) de acordo com o horário de coleta**.**

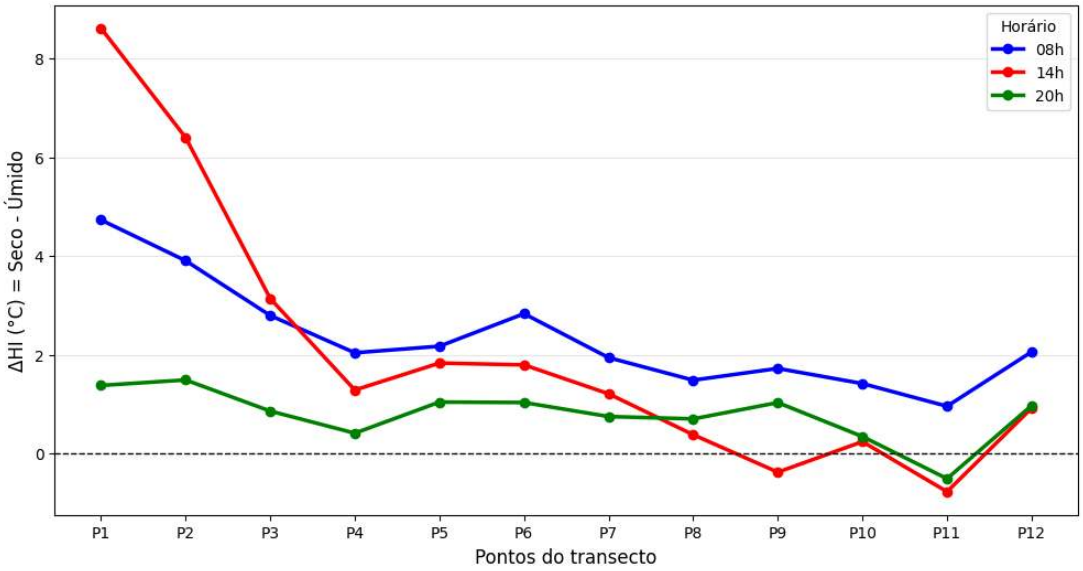
(a)



(b)



(c)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.4. Análise Estatística

Com os dados coletados e índice calculado, a síntese dos testes estatísticos aplicados pode ser vista na Tabela 1, incluindo avaliação da normalidade dos dados, comparação entre as estações, variações ao longo do dia e as diferenças entre os pontos escolhidos no trajeto do transecto. Confirma-se a influência significativa dos fatores espaciais e meteorológicos no comportamento do ambiente analisado.

Mesmo com os dados de temperatura e umidade relativa do ar apresentando normalidade perante o teste de Shapiro-Wilk, o HI apresentou distribuição não-normal, justificando a escolha de testes subsequentes não-paramétricos, conforme o quadro 2.

Quadro 2 – Resultados dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, dos testes de Wilcoxon para comparação entre as estações quente e úmida e quente e seca, dos testes de Friedman para comparação de horários, e dos testes de Kruskal-Wallis para comparação espacial, considerando a Temperatura do Ar, Umidade Relativa e Índice de Calor (HI).

Objetivo	Variável	Teste	Condição	p-valor	Significância	Conclusão
Normalidade	Temperatura	Shapiro-Wilk	Todos horários	>0.05	ns	Normal
Normalidade	Umidade	Shapiro-Wilk	Todos horários	>0.05	ns	Normal
Normalidade	Heat Index	Shapiro-Wilk	14h	<0.05	*	Não normal
Seco vs Úmido	Temperatura	Wilcoxon	Todos horários	<0.05	*	Diferença significativa
Seco vs Úmido	Umidade	Wilcoxon	Todos horários	<0.05	*	Diferença significativa
Seco vs Úmido	Heat Index	Wilcoxon	Todos horários	<0.05	*	Diferença significativa
Horários	Todas	Friedman	Úmido/Seco	<0.05	*	Diferença significativa
Pontos	Todas	Kruskal-Wallis	Todos cenários	<0.05	*	Diferença espacial significativa

Nota: ns = não significativo; * p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

As estações quente e seca e quente e úmida foram comparadas com o teste de Wilcoxon, que revelou diferenças significativas ($p<0,05$) para todas as variáveis analisadas, indicando que a estação seca potencializa as condições térmicas, diminui a umidade relativa e aumenta o desconforto térmico. Na variação ao longo do dia, com o teste de Friedman, afirma-se que houve diferenças significativas ($p<0,05$) dos dados entre todos os horários de coleta do transecto.

No teste de Kruskal-Wallis, também se encontram diferenças significativas ($p<0,05$) entre os pontos analisados, confirmando que o ambiente é heterogêneo, e, com a análise post-hoc de Dunn, se percebeu contrastes relevantes, principalmente entre áreas pavimentadas (P1, P2) e áreas com vegetação e sombreamento (P11), sobretudo às 14h ($p<0,01$), conforme observado na Quadro 3.

Quadro 3 – Resultados da análise post-hoc de Dunn para identificar diferenças significativas entre pares de pontos analisados, com base no Índice de Calor, temperatura do ar e umidade relativa

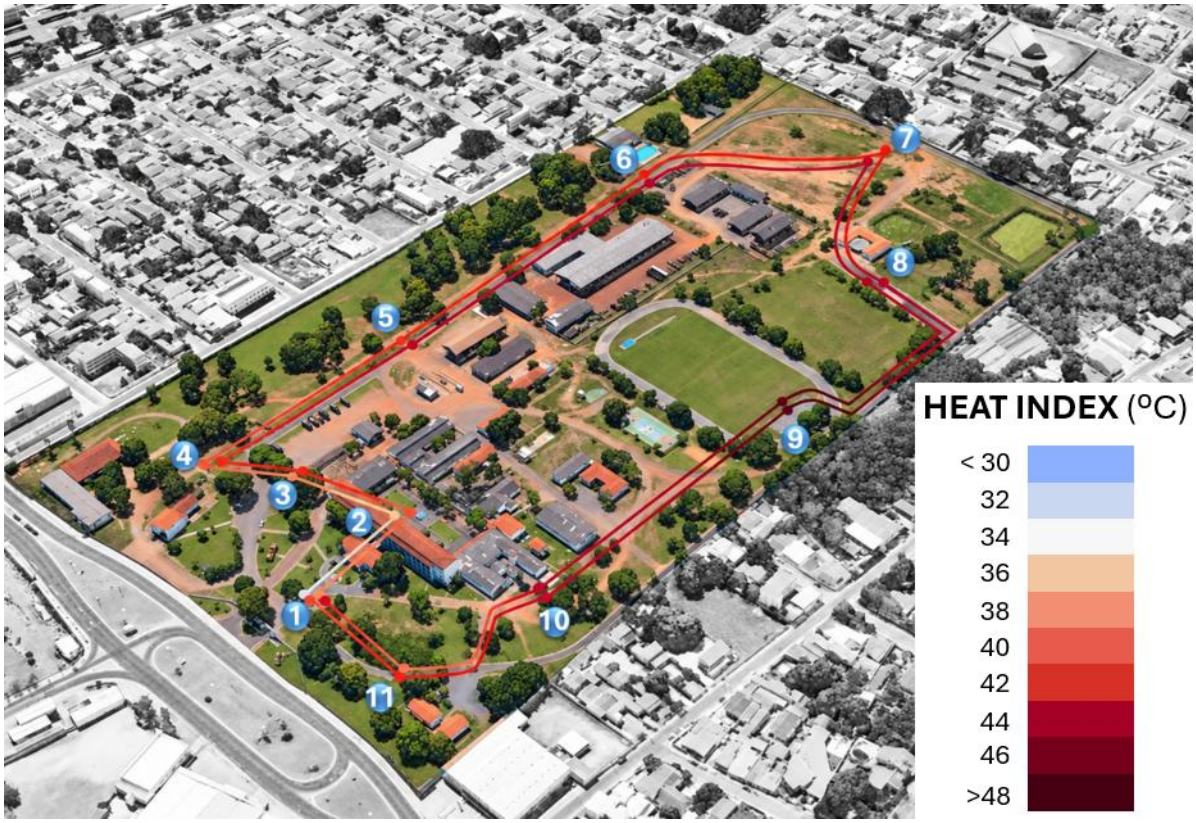
Variável	Estação	Horário	Comparação	p-ajustado	Interpretação
Heat Index	Seco	14h	P1 vs P11	<0.01	Pavimento mais quente que vegetação
Heat Index	Seco	14h	P2 vs P11	<0.01	CBUQ aumenta desconforto térmico
Temperatura	Seco	14h	P1 vs P11	<0.01	Superfícies impermeáveis aquecem mais
Umidade	Seco	14h	P1 vs P11	<0.01	Áreas pavimentadas mais secas
Heat Index	Úmido	14h	P1 vs P11	<0.05	Vegetação reduz desconforto

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

3.5. Índice de Calor com Distribuição Espacial

Os resultados estatísticos demostram que o ambiente analisado neste trabalho apresenta alta variabilidade térmica, que sofre influência da sazonalidade do clima, dos horários do dia e das características da superfície. O período da tarde apresentou os maiores índices de estresse térmico e foi mais aprofundado com a demonstração do HI durante o trajeto, para ambas as estações, que pode ser visto na Figura 6. Esse comportamento pode ser explicado pela maior disponibilidade de energia solar no período diurno, que favorece o aquecimento das superfícies expostas e a transferência de calor sensível para o ar próximo ao solo. Chu et al. (2024) também identificaram a influência das características dos pavimentos e da distribuição da vegetação sobre as condições térmicas de espaços urbanos abertos.

Figura 6 – Distribuição espacial do Índice de Calor ao decorrer do transecto às 14h no 9º BEC, com a presença dos índices de calor para a estação seca (linha interna) e úmida (linha externa).



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Analisando espacialmente o HI às 14h, percebe-se o contraste marcante existente entre a estação úmida (trajeto externo) e seca (trajeto interno), embora os valores sejam considerados altos para ambas as situações. O ponto P1, mesmo sendo pavimentado,

apresentou comportamento ameno quanto ao índice, devido ao sombreamento existente no local neste horário. Após a duração do percurso, ao se retornar ao início da trajetória, o ponto não estava mais sombreado, impactando nos índices apresentados. Essa diferença também pode estar associada à evolução temporal das condições atmosféricas durante o deslocamento, uma vez que P1 e P12 correspondem ao mesmo local, mas foram monitorados em momentos distintos.

Os extremos estão entre os pontos P8 e P10, onde há predominantemente vegetação rasteira, solo descoberto e/ou pavimentado, com total ausência de sombreamento. Destaca-se que a faixa de estresse térmico alcança índices de risco à saúde humana, conforme apontado por (Chàfer *et al.*, 2022). Nesses ambientes, a exposição solar e a menor disponibilidade de cobertura arbórea podem favorecer o aquecimento superficial, enquanto a presença de pavimentos contribui para o armazenamento de energia térmica. Esses mecanismos ajudam a explicar as diferenças observadas, embora seus efeitos individuais não tenham sido quantificados neste estudo.

Contrastando com esta situação, nas áreas com cobertura vegetal e, especialmente, sombreamento, há diminuição da intensidade do índice em ambas as estações, como é o caso do P11. Este ponto caracteriza a importância da vegetação na modulação do índice, pois mesmo na estação seca, apresentou menor estresse térmico do que na estação úmida. Esse comportamento pode estar associado a atenuação da radiação solar pelas copas e à evapotranspiração, mecanismos que contribuem para a modulação do microclima local. Resultados semelhantes foram observados por Chàfer et al. (2022), que identificaram condições térmicas mais amenas em áreas vegetadas durante transectos móveis em Singapura. Entretanto, o menor HI do P11 na estação seca também está relacionado à redução da umidade relativa, não sendo possível atribuir essa diferença exclusivamente à vegetação.

Em termos gerais, fica demonstrado que a estação seca amplifica o estresse térmico sentido, indo muito além de simples desconforto, em praticamente todo o ambiente analisado, ao passo que a vegetação atua como um elemento importante na mitigação dos efeitos sentidos pelo usuário, mesmo sem eliminar completamente o desconforto crítico às 14h.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a caracterização da variabilidade espacial e temporal do microclima do 9º Batalhão de Engenharia de Construção, evidenciou-se diferenças significativas que existem entre as duas estações bem definidas existentes: estação quente e seca e estação quente e úmida. A primeira estação intensifica temperaturas do ar, reduz a umidade e relativa e, consequentemente, eleva o índice de Calor (HI), especialmente no período da tarde (14h), mais crítico em termos de desconforto térmico. Nesse horário, a diferença sazonal média de temperatura atingiu 5,4°C, enquanto a umidade relativa apresentou redução média de 22%. Essas informações podem orientar a população e os gestores locais quanto à escolha de trajetos sombreados e à organização de atividades externas, especialmente nos horários de maior exposição ao calor.

O transecto móvel confirmou a influência exercida diretamente pelo uso e cobertura do solo, sendo as superfícies impermeáveis associadas a maiores valores de HI, ao passo que áreas com presença de vegetação (principalmente aquelas que geram sombreamento) apresentam efeito mitigador. A contribuição específica do estudo está na identificação e quantificação desses contrastes em ambientes próximos, sob condições climáticas semelhantes. Às 14h, no período seco, o HI do ponto arborizado P11 foi 6°C inferior ao do ponto P9, predominantemente gramado e exposto, indicando que a presença de árvores com copas amplas pode oferecer benefícios adicionais em relação à vegetação rasteira. O sombreamento constitui um serviço ecossistêmico de regulação microclimática, associado à redução da exposição à radiação solar e à melhoria das condições de permanência nos espaços externos.

Com os testes estatísticos, validaram-se as diferenças apontadas entre estações, horários e pontos do transecto, apoiando a evidência de contrastes entre ambientes pavimentados e vegetados. Também aponta para a existência de heterogeneidade microclimática relevante no espaço estudado, que corresponde às características físicas do espaço urbano. A magnitude dessas diferenças demonstra a relevância das condições locais de exposição ao calor para a qualidade de vida, especialmente em ambientes utilizados para circulação, trabalho e atividades físicas.

Por fim, estratégias baseadas no aumento da cobertura vegetal e na diminuição da quantidade de superfícies impermeabilizadas são fundamentais para a mitigação do desconforto térmico, sendo fundamentais para o planejamento urbano, principalmente em territórios com clima caracteristicamente quente. Os resultados indicam a necessidade de priorizar a arborização com espécies adaptadas ao clima local (Cerrado), capazes de desenvolver copas amplas e proporcionar sombreamento efetivo, sobretudo em áreas de circulação e permanência. Chama-se atenção para espécies nativas, como Ipê, Cumbaru, Mangueira e Angico. Essas medidas contribuem para o ODS 11, ao favorecer espaços urbanos mais seguros e ambientalmente adequados, e para o ODS 13, ao apoiar a adaptação local aos efeitos do calor.

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.

CHÀFER, M.; TAN, C. L.; CUREAU, R. J.; HIEN, W. N.; PISELLO, A. L.; CABEZA, L. F. Mobile measurements of microclimatic variables through the central area of Singapore: An analysis from the pedestrian perspective. **Sustainable Cities and Society**, [*S.l.*], v. 83, p. 103986, ago. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.103986.

CHU, Z.; LI, S.; LI, T.; QIAN, H.; LIU, C.; YAN, Z. Numerical simulation of layout and landscape elements on the thermal environment of urban squares. **Ecological Informatics**, [*S.l.*], v. 82, p. 102770, set. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102770.

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.

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.

QI, X.; ZHAO, X.; FU, B.; XU, L.; YU, H.; TAO, S. Numerical Study on the Influence of Rivers on the Urban Microclimate: A Case Study in Chengdu, China. **Water**, [*S.l.*], v. 15, n. 7, p. 1408, 4 abr. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/w15071408.

SOUZA, A. P.; MOTA, L. L.; ZAMADEI, T.; MARTIN, C. C.; ALMEIDA, F. T.; PAULINO, J. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO NO ESTADO DE MATO GROSSO. **Nativa**, [*S.l.*], v. 1, n. 1, p. 34–43, 15 nov. 2013. Disponível em: https://doi.org/10.31413/nativa.v1i1.1334.

SU, W.; ZHANG, L.; CHANG, Q. Nature-based solutions for urban heat mitigation in historical and cultural block: The case of Beijing Old City. **Building and Environment**, [*S.l.*], v. 225, p. 109600, nov. 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109600.

WANG, L.; CHEN, T.; YU, Y.; WANG, L.; ZANG, H.; CANG, Y.; ZHANG, Y.; MA, X. Impacts of Vegetation Ratio, Street Orientation, and Aspect Ratio on Thermal Comfort and Building Carbon Emissions in Cold Zones: A Case Study of Tianjin. **Land**, [*S.l.*], v. 13, n. 8, p. 1275, 13 ago. 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/land13081275.