

**Implicações da verticalização no conforto térmico urbano: análise
preditiva a partir de simulações computacionais**

*Implications of Verticalization on Urban Thermal Comfort: Predictive Analysis through
Computational Simulations*

*Implicaciones de la verticalización en el confort térmico urbano: análisis predictivo a
partir de simulaciones computacionales*

Limber Patric Santos Leal

Arquiteto e Urbanista, UFAL, Brasil
limberpatrick@gmail.com

Ricardo Victor Rodrigues Barbosa

Professor Doutor, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, UFAL, Brasil
rvictor@fau.ufal.br

RESUMO

O presente estudo visou analisar a influência da verticalização no conforto térmico humano em ambientes externos, a partir de simulações computacionais de cenários urbanos hipotéticos na cidade de Arapiraca, inserida no contexto climático da região semiárida de Alagoas. Os procedimentos metodológicos adotados caracterizam a pesquisa como preditiva. Os cenários hipotéticos foram simulados no *software* ENVI-met 4.0, a partir do qual foram extraídos os dados microclimáticos necessários para o cálculo do índice de conforto térmico PET por meio do *software* RayMan Pro. Os parâmetros urbanísticos analisados foram a variação na altura e nos recuos das edificações. Os resultados foram observados graficamente e submetidos à análise estatística de regressão e correlação entre os valores de fator de céu visível (FCV) dos cenários urbanos e os valores de PET gerados, onde foi possível identificar que o conforto térmico dos usuários do ambiente urbano é explicado de 70 a 95% pelo FCV, influenciado pela morfologia do entorno. Além disso, os resultados apontaram que quanto menor o valor do FCV, menor o valor do índice PET, por esse motivo, o cenário horizontal ocasionou na elevação do desconforto ao permitir maior incidência da radiação solar direta no tecido urbano. Os resultados desta pesquisa apontam para a importância do sombreamento proporcionado pelos cenários verticalizados, aliado ao resfriamento evaporativo por meio de massas vegetadas e corpos d'água, enquanto estratégias bioclimáticas que auxiliam diretamente nas condições de conforto térmico em ambientes externos no período quente e seco da cidade de Arapiraca-AL.

PALAVRAS-CHAVE: Microclima urbano. Conforto térmico ao ar livre. Região semiárida. Temperatura fisiológica equivalente. ENVI-met.

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the influence of verticalization on human thermal comfort in external environments, based on computer simulations of hypothetical urban scenarios in the city of Arapiraca, inserted in the climatic context of the semi-arid region of Alagoas. The adopted methodological procedures characterize the research as predictive. The hypothetical scenarios were simulated in the ENVI-met 4.0 software, from which the microclimatic data necessary for the calculation of the PET thermal comfort index were extracted using the RayMan Pro software. The analyzed urban parameters were the variation in height and setbacks of buildings. The results were graphically observed and submitted to statistical analysis of regression and correlation between the values of the visible sky factor (FCV) of the urban scenarios and the generated PET values, where it was possible to identify that the thermal comfort of the users of the urban environment is explained from 70 to 95% by FCV, influenced by the morphology of the surroundings. In addition, the results showed that the lower the FCV value, the lower the value of the PET index, for this reason, the horizontal scenario caused an increase in discomfort by allowing a greater incidence of direct solar radiation in the urban fabric. The results of this research point to the importance of shading provided by verticalized scenarios, combined with evaporative cooling through vegetated masses and bodies of water, as bioclimatic strategies that directly help in the conditions of thermal comfort in external environments in the hot and dry period of city of Arapiraca-AL.

KEYWORDS: Urban microclimate. Outdoor thermal comfort. Semi-arid climate. Equivalent physiological temperature. ENVI-met.

RESUMEN

El presente estudio tuvo como objetivo analizar la influencia de la verticalización en el confort térmico humano en ambientes externos, a partir de simulaciones informáticas de escenarios urbanos hipotéticos en la ciudad de Arapiraca, inserta en el contexto climático de la región semiárida de Alagoas. Los procedimientos metodológicos adoptados caracterizan la investigación como predictiva. Los escenarios hipotéticos se simularon en el software ENVI-met 4.0, del cual se extrajeron los datos microclimáticos necesarios para el cálculo del índice de confort térmico del PET mediante el software RayMan Pro. Los parámetros urbanos analizados fueron la variación de altura y los retranqueos de las edificaciones. Los resultados fueron observados gráficamente y sometidos a análisis estadístico de regresión y correlación entre los valores del factor de cielo visible (FCV) de los escenarios urbanos y los valores del PET generado, donde fue posible identificar que el confort térmico de los usuarios del entorno urbano se explica del 70 al 95% por FCV, influenciado por la morfología del entorno. Además, los resultados mostraron que a menor valor de FCV, menor valor del índice PET, por lo que el escenario horizontal provocó un aumento del malestar al permitir una mayor incidencia de la radiación solar directa en la trama urbana. Los resultados de esta investigación apuntan a la importancia del sombreado que brindan los escenarios verticalizados, combinado con el enfriamiento evaporativo a través de masas vegetadas y cuerpos de agua, como estrategias bioclimáticas que coadyuvan directamente en las condiciones de confort térmico en ambientes externos en el período cálido y seco de ciudad de Arapiraca-AL.

PALABRAS-CLAVE: Microclima urbano. Confort térmico exterior. Región semiárida. Temperatura fisiológica equivalente. ENVI-met.

1 INTRODUÇÃO

O processo de expansão desordenada das cidades, aliado ao adensamento de algumas áreas centrais, provoca alterações no clima urbano e na sua qualidade ambiental, comprometendo, principalmente, as condições de conforto térmico humano. Essa preocupação ganhou força com a pandemia da Covid-19, elevando a importância dos espaços urbanos que propiciem o bem-estar e a saúde da população. Uma meta que faz parte das agendas de pesquisas e políticas urbanas atuais é a necessidade de um desenvolvimento urbano sustentável, como observado no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (ODS11) da Organização das Nações Unidas, que almeja cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis, e no ODS 13, que trata sobre a ação contra a mudança global do clima, por meio de medidas urgentes para combater as alterações climáticas e os seus impactos (ONU, 2019).

Segundo Oke *et al.* (2017), o clima urbano é resultado das variações provocadas pelo processo de urbanização na superfície terrestre e das características da atmosfera de um determinado local. Esse processo provoca uma série de efeitos adversos sobre o clima local das cidades tropicais, como o aumento da temperatura do ar e a diminuição da umidade relativa, a ocorrência frequente de chuvas e enchentes, a concentração de ar poluído e a diminuição da ventilação natural (ASSIS, 2011).

Desta forma, a configuração urbana deve ser planejada de forma que seus componentes construtivos amenizem o desconforto térmico. Além de gerar desconforto, o estresse térmico proveniente das más condições microclimáticas, também, é responsável pela formação de ambientes urbanos insalubres que geram um impacto negativo na saúde humana, bem como o aumento do uso de ar condicionado e, conseqüentemente, custos de energia mais elevados para os moradores urbanos (SHAFAGHAT *et al.*, 2016).

A percepção térmica em espaços ao ar livre é um problema complexo que pode ser afetado tanto pelas características climáticas das regiões, quanto pela forma urbana. Com base em um estudo realizado em contextos urbanos de alta densidade, três elementos afetam significativamente a sensação térmica ao ar livre de um indivíduo: condições climáticas (radiação solar, umidade e velocidade do vento), fatores de saúde pessoal e parâmetros psicológicos (INDRAGANTI, 2010; SHARMIN; STEEMERS, 2020; ABDOLLAHZADEH; BILORIA, 2021). Logo, é necessário trabalhar com um índice de conforto que incorpore as variáveis ambientais e individuais que possam expressar a percepção térmica do indivíduo.

Optou-se por utilizar neste trabalho o índice de conforto térmico PET (*Physiological Equivalent Temperature*) porque trabalha com uma unidade conhecida (°C), produzindo resultados mais compreensíveis aos planejadores urbanos. PET é definida como a temperatura fisiológica equivalente à temperatura do ar de um ambiente interno de referência, no qual o balanço térmico humano é mantido com as temperaturas da pele e do corpo iguais àquelas das condições em avaliação (HOPPE, 1999).

Alterações no microclima não se restringem às grandes metrópoles, mas também são observadas em cidades de porte médio, como identificado por Amorim *et al.* (2009) nas cidades de Presidente Prudente-SP e Rennes na França. Os autores identificaram que, mesmo com histórias e climas diferentes, as mudanças no uso do solo dessas duas cidades de porte médio contribuíram para a formação de ilhas de calor urbanas, responsáveis pela intensificação do desconforto térmico urbano.

Nesse contexto, Arapiraca é uma cidade de porte médio localizada no agreste alagoano e seu tecido urbano tem se expandido de forma acelerada, comparado aos demais municípios do estado. O adensamento urbano tem ocorrido principalmente de forma horizontal, porém percebe-se que algumas áreas da cidade têm forte tendência à verticalização e, por ser um padrão construtivo menos recorrente na cidade, faz-se necessário definir parâmetros urbanísticos e estratégias para melhor adequação ao clima da cidade a fim de subsidiar o planejamento urbano.

O presente trabalho teve por objetivo analisar a influência da verticalização no conforto térmico humano em ambientes externos, a partir de simulações computacionais de cenários urbanos hipotéticos na cidade de Arapiraca, inserida no contexto climático da região semiárida de Alagoas.

2 METODOLOGIA

Quanto aos objetivos, a presente pesquisa é classificada como exploratória. Este tipo de pesquisa preocupa-se em identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos, ou seja, explica o porquê das coisas através dos resultados oferecidos. Quanto aos procedimentos metodológicos, classifica-se como pesquisa experimental, que consiste em determinar um objeto de estudo, selecionar as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definir as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto (GIL, 2007; GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

A presente pesquisa foi realizada por meio de simulações computacionais utilizando o *software* ENVI-met 4.0 para a simulação de cenários urbanos hipotéticos e o *software* RayMan Pro, a fim de analisar o desempenho térmico dos mesmos. Desta forma, a análise da pesquisa caracteriza-se como preditiva, pois utiliza modelos estatísticos para observar como os dados se comportarão em cenários hipotéticos futuros sob condições diversas.

Foram adotados os seguintes procedimentos metodológicos: descrição e caracterização do objeto de estudo; elaboração e simulação dos cenários hipotéticos no *software* ENVI-met; e determinação do índice de conforto térmico PET para os cenários hipotéticos, para posterior análise comparativa do desempenho climático dos cenários simulados, considerando o comportamento da temperatura do ar, temperatura média radiante, velocidade e direção dos ventos.

2.1 Descrição e caracterização da área de estudo

Arapiraca situa-se na mesorregião do Agreste Alagoano e na microrregião geográfica de Arapiraca (Figura 1), sob as coordenadas geográficas 09°45'08" latitude sul e 36°60'11" longitude oeste, e compreende uma área de aproximadamente 356,2 km², ficando a 128 km da capital alagoana e com altitude entre 200 e 300 metros. O município de Arapiraca encontra-se na zona climática intertropical de baixa latitude, de forma que os raios solares incidem quase que perpendicularmente, ocasionando em temperaturas elevadas durante todo o ano.

Figura 1 – Mapa de Alagoas com a delimitação da Mesorregião do Agreste Alagoano (à esquerda) e da cidade de Arapiraca (à direita)



Fonte: Adaptado de Abreu (2006).

De acordo com a caracterização climática de Köppen-Geiger, o clima de Arapiraca é **As** (clima tropical de savana). A partir da classificação proposta por Romero (2000), o clima da cidade de Arapiraca pode ser classificado como quente e úmido por apresentar os seguintes condicionantes: dias quentes e úmidos, temperaturas mais amenas durante o período noturno, amplitude térmica abaixo dos 15°C, o clima apresenta basicamente as estações de inverno e verão, com pequenas variações de temperatura entre esses dois períodos (SILVA, 2017).

O recorte espacial escolhido como área de estudo da presente pesquisa está localizado entre os bairros Novo Horizonte e Itapuã, abrangendo um dos eixos viários mais importantes da cidade, a Avenida Deputada Ceci Cunha, que interliga a AL 115 aos bairros mais centrais e compreende uma das áreas mais valorizadas do município, dotada de comércios, serviços, uma área verde linear, denominada de Corredor Verde Dom Constantino, e lotes com áreas superiores a 250m². Por apresentar essas características, essa é a localidade que possui maior tendência a verticalização em Arapiraca, confirmada pela presença de alguns edifícios verticais.

2.2 Elaboração e simulação dos cenários urbanos hipotéticos

Para elaboração dos cenários hipotéticos, buscou-se compreender o padrão recorrente de ocupação nessa região, com base no desenho das quadras e dos lotes, na largura das vias e passeios, e na presença de uma área verde de 24m de largura que passa pelo centro das quadras selecionadas. Desta forma, para elaborar um cenário de referência que fosse o mais fidedigno possível com a realidade, adotou-se dois tipos de quadras: duas quadras com 24 lotes de 12m de frente por 34m de profundidade, e uma quadra com 24 lotes de 12m de frente por 30m de profundidade. Além disso, foram usados dois tipos de vias: uma via com 20m de largura (16m de leito carroçável separado por um canteiro central de 2m e mais 2m de cada passeio) e as demais vias com 12m de largura (8m de leito carroçável e mais 2m de cada passeio).

O cenário de referência não verticalizado possui edificações de 2 pavimentos (CENÁRIO 02P), por ser o padrão recorrente na área, e os recuos iniciais adotados foram 3m de recuo frontal e 1,5m de recuos laterais e de fundo, de acordo com a legislação vigente em Arapiraca. A partir deste, foram elaborados quatro cenários hipotéticos verticalizados com alturas de 5 e 10 pavimentos (05P e 10P) com recuos iniciais (RI) ou progressivos (RP), conforme o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (MACEIÓ, 2007), uma vez que a legislação urbanística de Arapiraca não abrange este último tipo de recuo. Assim, para determinar os recuos progressivos para os cenários verticalizados foi utilizada a fórmula indicada para a zona residencial ZR-4 (ocupação predominante de uso residencial) e uso residencial UR-5

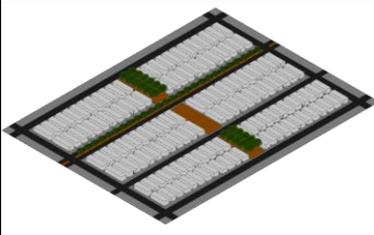
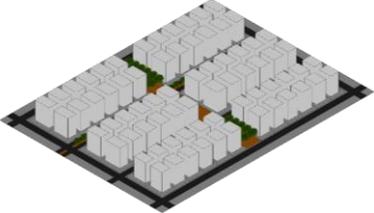
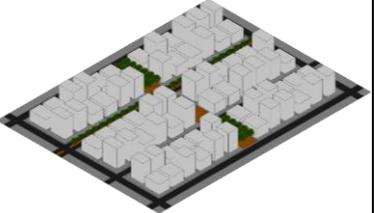
(verticalização de até 15 pavimentos): $RI + (n-2) / 2$, onde **RI** é o recuo inicial e **n** é o número de pavimentos.

Além dos cenários descritos acima, foram elaborados dois cenários mistos (CENÁRIOS MISTO-RI e MISTO-RP) que mesclavam prédios de 5 e 10 pavimentos com ambos tipos de recuos, que foram dispostos nos lotes de forma aleatória por meio de sorteio, para analisar a influência da variação da rugosidade no comportamento térmico. Após a definição das características e dimensões dos cenários hipotéticos, eles foram elaborados no *software* ENVI-met, um programa alemão desenvolvido por Bruse e Fleer (1998), em sua versão gratuita 4.0.

A partir dos tamanhos de lotes, quadras e vias utilizados nos cenários hipotéticos, chegou-se as seguintes dimensões dos modelos, em *grids*: 179x138x22 (x, y, z). Assim, para simulação dos cenários urbanos hipotéticos foi utilizada a extensão de área do *software* que corresponde a 180x180x35 (x, y, z). De acordo com a localização e orientação do cenário real, foram adotados os seguintes dados para simulação dos modelos: norte a 28º, latitude 9.45 Sul, longitude 36.39 Oeste, timezone UTC -3 e longitude de referência -45. As medidas de todos os cenários foram adaptadas às dimensões do *grid* adotado no *software*: 2x2x3 (x, y, z), ou seja, todas as dimensões tiveram que ser arredondadas para múltiplos de 2, para obter precisão na modelagem dos cenários. É importante ressaltar que o valor de z corresponde a 3m, pois é equivalente à altura média de um pé esquerdo.

Como não houve variação de recuos nos cenários 05P-RI e 05-RP após a adaptação para o *grid* do *software*, utilizar ambos seria redundante e, por isso, apenas um foi analisado. Além disso, vale destacar que, para que fosse possível a modelagem dos cenários verticalizados com uma área de lâmina viável para construção, foi necessário realizar o remembramento de dois lotes laterais. O Quadro 1 apresenta a volumetria resultante dos seis cenários hipotéticos.

Quadro 1 - Volumetria dos cenários urbanos hipotéticos

CENÁRIO 02P	CENÁRIO 10P-RI	CENÁRIO MISTO-RI
		
CENÁRIO 05P	CENÁRIO 10P-RP	CENÁRIO MISTO-RP
		

Fonte: Elaboração própria (2022).

Quanto aos revestimentos adotados na elaboração dos cenários no ENVI-met 4.0, foram utilizados materiais da própria biblioteca do *software* que mais se aproximassem do padrão construtivo da região. Para as edificações, utilizou-se paredes de tijolos queimados e telhas cerâmicas. Para o revestimento do solo, adotou-se asfalto para as vias, concreto para os passeios e interior dos lotes, e solo argiloso para a área verde e canteiro central. Na vegetação

inserida na área verde e no canteiro central de todos os modelos, foram utilizadas árvores da biblioteca de vegetação do próprio *software* que mais se aproximassem das que são encontradas na área real em termos de altura e densidade da copa. Assim, adotou-se duas espécies: *Populus alba*, para a área verde, e *Jacarandá mimosifolia*, para o canteiro central.

Além do arquivo de área, o *software* ENVI-met necessita de um arquivo de dados contendo os dados climáticos que serão utilizados na simulação. Esses dados foram obtidos a partir da tese de Torres (2017) por já estarem validados para a cidade de Arapiraca. Assim, o dia escolhido foi 03 de janeiro de 2016, no qual foi observada maior regularidade no comportamento da temperatura e umidade relativa do ar, indicando que foi um dia típico de verão, com céu limpo, sem a presença de nuvens.

Para a obtenção dos dados microclimáticos foram inseridos seis receptores (R) em diferentes pontos dos cenários, como mostrado no Quadro 2. Dois localizados nos eixos das vias (R1 na via de 20m e R2 na via de 12m), dois localizados no eixo da área verde (R3 na área verde arborizada e R4 na área verde sem arborização), e dois localizados no intralote (R5 entre recuos laterais e R6 entre recuos de fundo). Essas localizações foram definidas de forma que fosse possível realizar comparações entre pontos com características semelhantes e/ou divergentes.

Quadro 2 – Localização dos receptores nos cenários hipotéticos

	R1 - localizado no eixo da via de 20m
	R2 - localizado no eixo da via de 12m
	R3 - localizado no eixo da área verde com arborização
	R4 - localizado no eixo da área verde sem arborização
	R5 - localizado no intralote entre recuos laterais
	R6 - localizado no intralote entre recuos de fundo

Fonte: Elaboração própria (2022).

2.3 Determinação do índice de conforto térmico

Os dados microclimáticos dos cenários hipotéticos simulados no ENVI-met foram obtidos a partir dos receptores considerando a altura de 1,5m do solo, correspondente à altura do pedestre. Os dados foram utilizados para determinar o índice de conforto térmico PET através do *software* RayMan Pro, desenvolvido por Andreas Matzarakis que calcula os fluxos de radiação de ondas curtas e longas que afetam o corpo humano. Para o cálculo dos índices térmicos com base no balanço energético humano, são necessários dados meteorológicos

(temperatura do ar, velocidade do vento, umidade do ar e fluxos de radiação de ondas curtas e longas) e termofisiológicos (atividade e vestuário) (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2010).

Os dados termofisiológicos utilizados correspondem a um indivíduo do sexo masculino de 35 anos, altura 1,70 e massa 75kg, em atividade metabólica de 80W e vestimenta de 0,9 clo, conforme orienta o manual do RayMan para o cálculo do PET. O índice PET (°C) teve sua faixa de conforto térmico inicialmente estabelecida entre os valores de 22 a 24°C (HOPPE, 1999). Esses valores foram definidos inicialmente para a Alemanha e, desde então, estudos têm sido realizados em populações aclimatadas em diferentes regiões para verificação ou calibração dessa faixa de conforto proposta (HIRASHIMA, 2010; ANDRADE *et al.*, 2016; KRÜGER *et al.*, 2018; RIBEIRO, 2019).

Pela ausência de calibração do índice PET para a cidade de Arapiraca e demais cidades alagoanas, foi utilizada neste trabalho a calibração para Salvador-BA realizada por Andrade *et al.* (2016), pois as demais calibrações encontradas foram realizadas para cidades de climas menos compatíveis com o de Arapiraca, como: Belo Horizonte, de clima tropical chuvoso (HIRASHIMA, 2010); Curitiba, de clima temperado úmido (KRÜGER *et al.*, 2018) e Cuiabá, de clima tropical semiúmido (RIBEIRO, 2019).

Para a calibração do índice PET, Andrade *et al.* (2016) utilizaram a técnica de mineração de dados Árvore de Decisão, associando intervalos desse índice à percepção térmica relatada em uma escala de sete categorias. O limite inferior do intervalo conforto e as categorias de frio não puderam ser determinados devido à inexistência de condições de estresse térmico negativo na cidade de Salvador, de acordo com os resultados da pesquisa. Dessa forma, os valores de PET gerados para os cenários hipotéticos da cidade de Arapiraca foram classificados em quatro categorias: muito calor (PET $\geq 34,1^{\circ}\text{C}$), calor ($34,1^{\circ}\text{C} > \text{PET} > 29,4^{\circ}\text{C}$), pouco calor ($29,4^{\circ}\text{C} > \text{PET} > 26,8^{\circ}\text{C}$) ou conforto (PET $\leq 26,8^{\circ}\text{C}$), como observado no Quadro 3.

Quadro 3 – Faixas de percepções térmicas de acordo com os valores do Índice PET (°C) gerados para os cenários hipotéticos

Percepção térmica	Intervalo do índice PET	Estresse fisiológico
Muito calor	$\geq 34,1^{\circ}\text{C}$	Extremo estresse positivo
Calor	$34,1^{\circ}\text{C} > \text{PET} > 29,4^{\circ}\text{C}$	Forte estresse positivo
Pouco calor	$29,4^{\circ}\text{C} > \text{PET} > 26,8^{\circ}\text{C}$	Moderado estresse positivo
Conforto	PET $\leq 26,8^{\circ}\text{C}$	Sem estresse térmico

Fonte: Adaptado de Andrade *et al.* (2016).

3 RESULTADOS

Para a análise dos dados considerou-se a variação das alturas dos cenários hipotéticos simulados e o tipo de recuo adotado, por meio dos respectivos dados obtidos nos diferentes receptores inseridos nos modelos. Em seguida, os dados foram submetidos a uma análise de correlação para analisar o nível de influência de cada uma das variáveis climáticas nos valores gerados do índice PET. Foram adotados os seguintes horários para as análises: às 9h, às 15h e às 21h, conforme indicação da Organização Mundial de Meteorologia (OMM) para análises climáticas, considerando o dia 03/01/2016, classificado como dia típico para a cidade de Arapiraca.

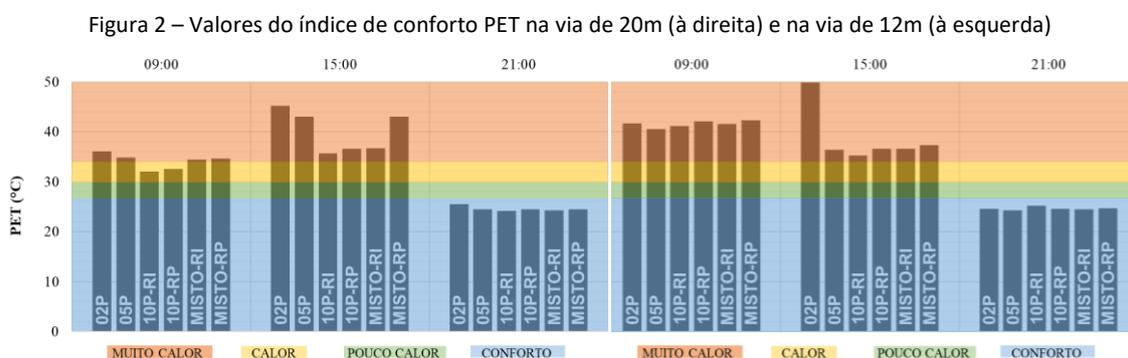
Para análise do índice de conforto PET, optou-se por trabalhar com gráficos de barras devido a melhor comparação entre os cenários. Para facilitar a classificação dos mesmos, foram

delimitados no eixo vertical os valores de cada intervalo de percepção térmica do índice PET segundo a calibração de Andrade *et al.* (2016), onde as áreas rosa, amarela e verde representam os intervalos de muito calor, calor e pouco calor, respectivamente, e a área azul representa o intervalo de conforto, onde não há estresse térmico. No eixo horizontal, os cenários foram organizados em função da variação das alturas (02P, 05P, 10P e MISTO) e do tipo de recuo (RI e RP).

3.1 Análise do índice de conforto nas vias

Para verificar o nível de conforto/desconforto dos pedestres, foram inseridos receptores em todos os cenários em dois tipos de vias: um no canteiro central da Avenida Deputada Ceci Cunha (via de 20m de largura com canteiro arborizado) e outro na Rua João Nunes Barbosa (via de 12m de largura sem canteiro), e os dados obtidos para a altura de 1,5m, correspondente à altura do pedestre.

Como observado na Figura 2, o comportamento do índice PET apresentou diferenças pelo tipo de via, principalmente no horário da manhã. Enquanto que na via de 20m com canteiro os cenários apresentaram valores de índice PET entre 32°C e 36°C, na via de 12m sem canteiro todos os cenários ficaram com PET acima dos 40°C, demonstrando que as vias mais largas com entorno mais verticalizados proporcionam melhores percepções térmicas aos usuários do meio urbano, tendo em vista que os cenários 10P-RI e 10P-RP foram os únicos que conseguiram sair do intervalo de muito calor às 9h para o intervalo de calor (34,1°C > PET > 29,4°C).



Fonte: Elaboração própria (2022).

Todavia, a maior verticalização não foi suficiente para tirar os cenários da faixa de muito calor (PET ≥ 34,1°C) no horário de 15h em nenhuma das duas vias analisadas, mas foi suficiente para reduzir o índice PET em quase 10°C na via de 20m com canteiro e 15°C na via de 12m sem canteiro, reduzindo assim o nível de desconforto térmico. Por sua vez, no horário noturno todos cenários ficaram o intervalo de conforto (PET ≤ 26,8°C), principalmente, pela ausência de radiação solar. Vale lembrar que, como a calibração utilizada não identificou o intervalo inferior da faixa de conforto, não foi possível inferir estresse térmico negativo nos cenários.

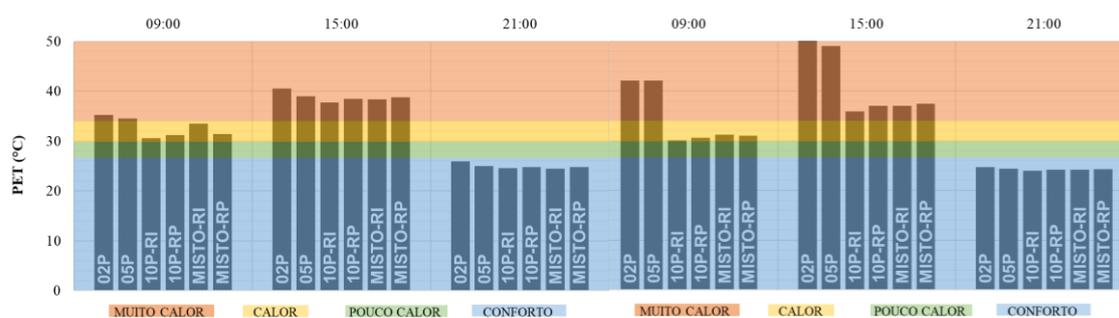
Em relação a adoção de recuo inicial (RI) ou recuo progressivo (RP), todos os cenários apresentaram valores de PET semelhantes nas duas vias analisadas, indicando que o tipo de recuo praticamente não influenciou nos resultados do índice de conforto PET. A única exceção foi entre os cenários MISTO-RI e MISTO-RP, que houve uma diferença de 6,3°C no índice PET.

Todavia, vale salientar a importância do RP para o aproveitamento da ventilação natural, uma vez que esse tipo de recuo torna o tecido urbano mais poroso e favorável a permeabilidade dos ventos. Possivelmente, seus resultados não foram mais favoráveis por terem sido analisadas apenas duas variações de alturas: 5P e 10P.

3.2 Análise do índice de conforto na área verde

A segunda análise objetivou verificar o nível de conforto térmico dos usuários da área verde a partir do aumento da verticalização dos cenários aliada à presença ou ausência de arborização. Para isso, em cada cenário foram inseridos dois receptores em locais da área verde com características diferentes: um local arborizado e outro sem arborização, apenas com solo natural exposto. Como pode ser observado na Figura 3, no horário de 9h, os cenários de 02P e 05P ficaram na faixa de muito calor, mas os cenários 10P e MISTO conseguiram reduzir a percepção térmica para a faixa de calor, com uma diferença de 4,7°C entre o cenário mais verticalizado e o cenário horizontal.

Figura 3 – Valores do índice de conforto PET na área verde com arborização (à esquerda) e sem arborização (à direita)



Fonte: Elaboração própria (2022).

Comparando os cenários às 15h, os valores do índice PET dos seis cenários foram próximos, indicando que a verticalização teve pouca influência no conforto térmico dos usuários neste horário. Todavia, deve-se considerar os benefícios das massas vegetadas como reguladoras da percepção térmica em ambientes abertos, tanto em cenários horizontais, como em cenários verticalizados. Já no horário noturno não houve diferenças no índice de conforto dos cenários, assim como na análise realizadas nas vias.

Em contrapartida, o comportamento do índice PET nos receptores localizados na área verde sem arborização, a partir dos quais observa-se que houve uma diferença significativa entre os cenários menos verticalizados e os cenários mais verticalizados. Enquanto os cenários com 10P e MISTO ficaram com valores de PET próximos a 30°C, os cenários menos verticalizados apresentaram valores superiores a 40°C, mesmo no horário de radiação solar menos intensa, chegando a atingir consideráveis 50,6°C às 15h no cenário 02P.

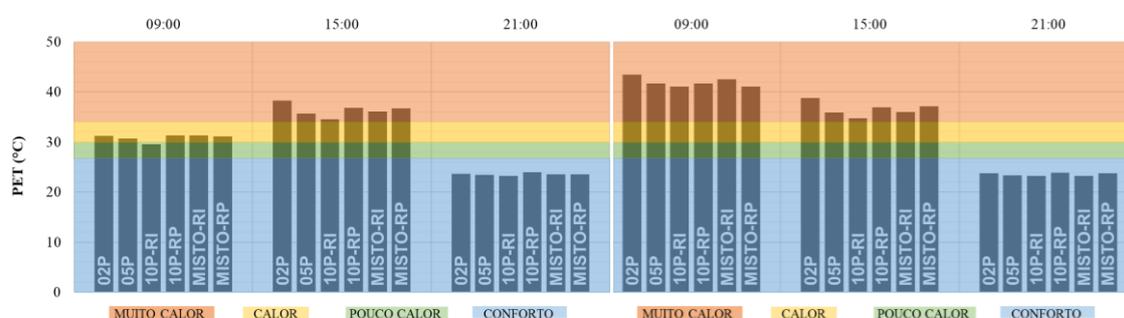
Pode-se inferir dessa análise que as áreas verdes proporcionam melhores condições de conforto térmico quando estas possuem arborização, uma vez que a vegetação atua tanto no sombreamento a nível do pedestre/usuário, quanto no aumento da umidade do ar através do resfriamento evaporativo e do processo de evapotranspiração das plantas.

3.3 Análise do índice de conforto no intralote

A terceira análise foi realizada a partir dos receptores inseridos no intralote dos cenários, um entre recuos laterais das edificações e outro entre os recuos de fundo. O objetivo era verificar o nível de conforto dos moradores no entorno de suas moradias. Vale destacar que esses recuos foram de 2m nos cenários com RI, e de 4m nos cenários com RP.

A partir dos valores de índice PET apresentados na Figura 4, nota-se que a percepção de conforto foi melhor entre os recuos laterais, com valores próximos a 30°C no horário matutino e entre 35 e 38°C no horário vespertino. O cenário 10P-RI foi o único que apresentou PET no intervalo de pouco calor ($29,4^{\circ}\text{C} > \text{PET} > 26,8^{\circ}\text{C}$), indicando que os moradores estão sujeitos a menor estresse térmico no intralote que nas vias, possivelmente por causa da relação H/W ser alta, o que proporciona maior obstrução da abóbada celeste e, conseqüentemente, menores ganhos térmicos pela radiação solar.

Figura 4 – Valores do índice de conforto PET no intralote entre recuos laterais (à esquerda) e entre recuos de fundo (à direita)



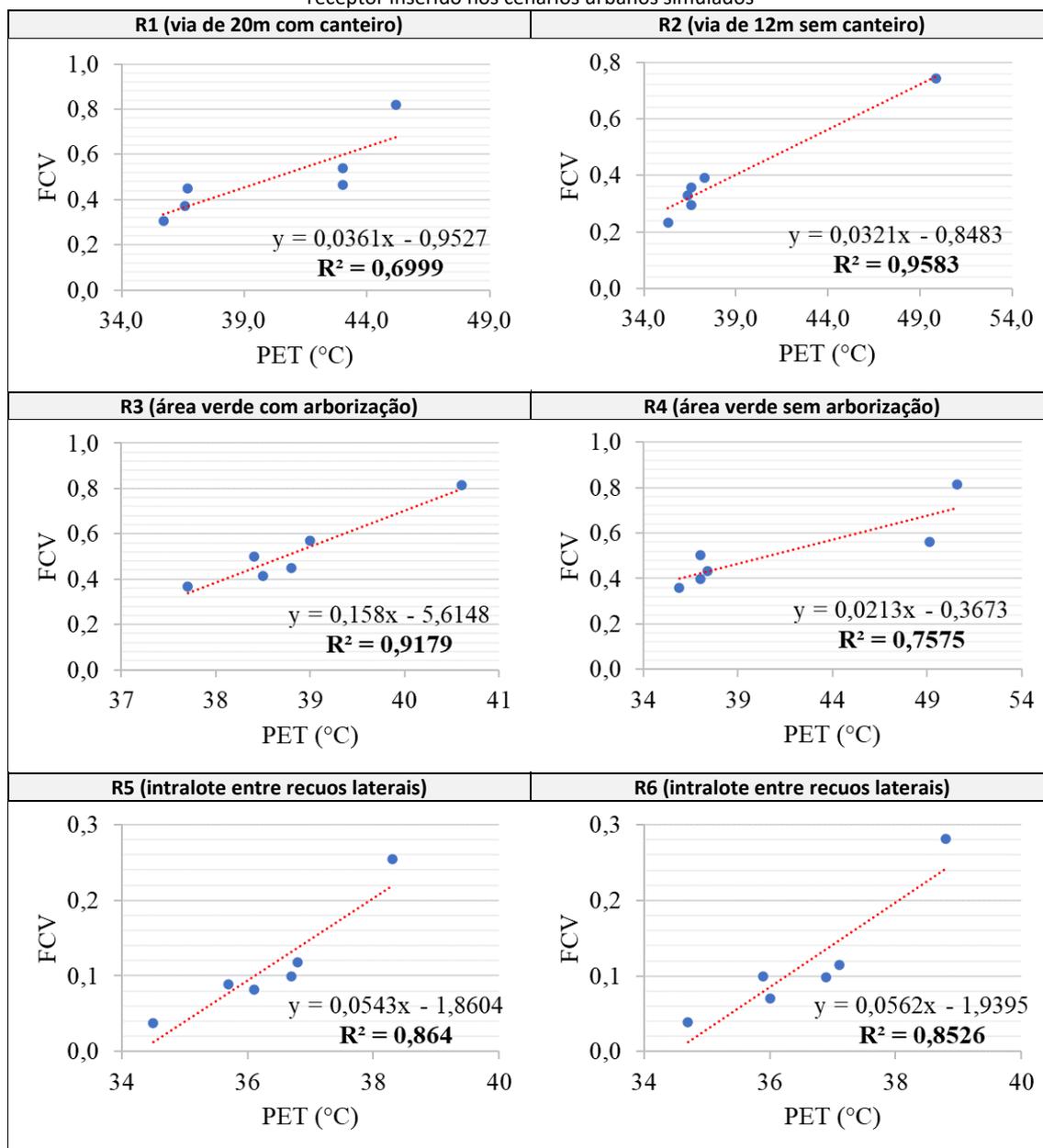
Fonte: Elaboração própria (2022).

Já nos recuos de fundo, a percepção térmica foi de muito calor em todos os cenários durante os horários diurnos, com PET superior a 40°C às 9h. Nos horários noturnos, verifica-se que não houve variação entre os cenários no intralote, como nos demais receptores.

3.4 Análise estatística de regressão e correlação

Para verificar o grau de influência das variáveis morfológicas na classificação do índice PET, foram calculados os coeficientes de determinação a partir da associação entre os valores de FCV e os valores do índice PET. Os gráficos de dispersão e os coeficientes de determinação (R^2) foram obtidos a partir do *Microsoft Office Excel*, e são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Gráficos de dispersão e regressão linear entre o índice PET obtido às 15h e os valores de FCV para cada receptor inserido nos cenários urbanos simulados



Fonte: Elaboração própria (2022).

A regressão linear simples constitui uma tentativa de estabelecer uma equação matemática linear que descreva o relacionamento entre duas variáveis. A correlação é maior quanto mais os pontos se concentram, com pequenos desvios, em relação a reta do gráfico. O coeficiente de determinação (R^2) varia de zero a um e é a medida da proporção da variância da variável dependente em torno de sua média que é explicada pelas variáveis independentes ou predictoras. Quanto maior o valor de R^2 , maior o poder de explicação da equação de regressão (HAIR *et al.*, 2009). Logo, os coeficientes apresentados nos gráficos da Figura 19 demonstram o percentual de explicação dos valores do índice PET pelo FCV em cada um dos seis receptores.

Também foi calculado o coeficiente de correlação de Pearson (R) entre os valores de PET (variável dependente) e os valores de FCV (variável independente). Esse coeficiente é utilizado para saber o quanto a variabilidade de uma variável está correlacionada com a

variabilidade de outra variável. Ele varia de -1 a +1, cujos valores próximos de -1 ou +1 indicam forte correlação linear e próximos de zero indicam ausência de correlação linear. O resultado apontou para correlação positiva muito forte nos receptores R2, R3, R5 e R6, e correlação positiva forte nos receptores R1 e R4, como observado na Tabela 1. Vale destacar que o nível de significância para o conjunto analisado de 6 pares, apresenta um percentual de erro de 1% para mais ou para menos.

Tabela 1 – Coeficientes de determinação e correlação obtidos nos seis receptores

Receptor	Coeficiente de determinação (R ²)	% de explicação da equação de regressão	Coeficiente de correlação de Pearson (R)
R1	0,6999	70%	0,84
R2	0,9583	95%	0,98
R3	0,9179	91%	0,96
R4	0,7575	75%	0,87
R5	0,8640	86%	0,93
R6	0,8526	85%	0,92

Fonte: Elaboração própria (2022).

A partir dos valores de R² obtidos, é possível inferir que a sensação térmica e o conforto dos usuários do ambiente urbano são explicados de 70 a 95% pelo fator de céu visível, a depender da morfologia do seu entorno (altura das edificações, largura das vias e presença de arborização). Além disso, os gráficos apontaram que quanto menor o valor do FCV, menor o valor do índice PET.

4 CONCLUSÃO

A presente pesquisa buscou compreender como a verticalização influencia no conforto térmico na cidade de Arapiraca-AL. Após o embasamento teórico necessário para fundamentar os procedimentos metodológicos, chegou-se aos resultados que foram observados e submetidos à análise estatística. Ao analisar a relação entre os dados climáticos e os valores de PET gerados para diferentes pontos dos cenários hipotéticos, considerando as variações nas alturas, foi possível identificar que a verticalização proporcionou melhores condições climáticas de acordo com o índice de conforto térmico PET na via com canteiro, na área verde com arborização e no intralote entre recuos laterais.

No que diz respeito ao tipo de recuo adotado, o comportamento dos cenários com recuos iniciais ou progressivos foi similar, gerando percepções térmicas semelhantes ao nível do pedestre. Entretanto, vale salientar a importância do RP para o aproveitamento da ventilação natural, uma vez que esse tipo de recuo torna o tecido urbano mais poroso e favorável a permeabilidade dos ventos. Além disso, os resultados obtidos no horário noturno em todos os cenários apontaram a baixa tendência de formação de ilhas de calor urbana no contexto climático de Arapiraca. Como esta pesquisa foi realizada a partir de um recorte espacial, os desdobramentos do adensamento construtivo precisam ser avaliados no contexto da cidade como um todo.

A hipótese que se tinha inicialmente sobre a verticalização auxiliar no conforto térmico urbano foi confirmada a partir dos dados analisados, pois o sombreamento proporcionado pelas edificações verticalizadas e a redução do fator de céu visível, oriundo da maior obstrução da abóbada celeste, contribuíram para a redução do desconforto. Entretanto, é importante destacar que a verticalização de até 10 pavimentos não foi suficiente para que os cenários

atingissem a zona de conforto nos horários diurnos, mesmo aliada a arborização, demonstrando a importância de se pensar em estratégias conjuntas que reduzam o rigor térmico em ambientes urbanos, como o uso do resfriamento evaporativo por meio de corpos d'água, e até mesmo o uso da vegetação de forma intensa ou por meio de espécies com alturas e densidades de copa diferentes.

A partir da análise estatística foi possível identificar que os valores de FCV dos cenários urbanos influenciaram no resultado do índice de conforto PET, uma vez que os gráficos de regressão e correlação mostraram que quanto menor o valor do FCV, menor o valor do índice PET. Por esse motivo, o cenário horizontal de dois pavimentos ocasionou na elevação do desconforto ao permitir maior incidência da insolação no tecido urbano e, conseqüentemente, elevação dos valores de temperatura média radiante e temperatura do ar, que são as variáveis ambientais que mais influenciam na fórmula do cálculo do índice PET.

Logo, os resultados desta pesquisa apontam para a importância do sombreamento proporcionado pelos cenários verticalizados enquanto estratégia bioclimática que auxilia diretamente nas condições de conforto térmico em ambientes externos na cidade de Arapiraca. Além do sombreamento, o aproveitamento da ventilação natural é outra estratégia indicada principalmente para a estação quente e úmida, pois a umidade do ar auxilia nas trocas térmicas, contribuindo para a redução do desconforto. Na estação quente e seca que foi analisada nessa pesquisa, essa estratégia deve ser aliada ao resfriamento evaporativo por meio de corpos d'água e da evapotranspiração de massas vegetadas.

Vale destacar a necessidade de novas pesquisas para complementar a temática trabalhada, considerando que os cenários estudados tiveram algumas limitações, como os formatos das edificações, os materiais utilizados como revestimento e a área limitada oferecida pela versão gratuita do *software* ENVI-met 4.0 que limitou a área de estudo. Além disso, é necessário que o índice térmico PET seja devidamente calibrado para a cidade de Arapiraca para tornar os resultados mais completos. Dessa forma, pesquisas futuras deverão ser realizadas com o fim de suprir essas e outras limitações, a fim de fornecer informações complementares sobre a influência da verticalização para Arapiraca e outras cidades de porte médio de clima quente e seco.

5 REFERÊNCIAS

ABDOLLAHZADEH, N.; BILORIA, N. Outdoor thermal comfort: Analyzing the impact of urban configurations on the thermal performance of street canyons in the humid subtropical climate of Sydney. **Frontiers of Architectural Research**, v. 10, n. 2, 2021, p. 394-409. Disponível em: <https://curt.link/6G1XRZ>. Acesso em: 15 set. 2022.

AMORIM, M. C. C. T.; DUBREUIL, V.; QUENOL, H.; SANT'ANA NETO, J. L. Características das ilhas de calor em cidades de porte médio: exemplos de Presidente Prudente (Brasil) e Rennes (França). **Confins (Online)**, n. 7, 2009. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/6070>. Acesso em: 09 nov. 2022.

ANDRADE, T. C.Q.; NERY, J. M. F. G.; SOUZA, S. H. M.; PITOMBO, C. S.; FREIRE, T. M. M.; KATZSCHNER, L. Medição do conforto térmico em áreas públicas urbanas de Salvador-BA e calibração do índice de conforto PET usando a técnica árvore de decisão. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)**. v. 4. n. 2. 2016. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/gesta/article/view/16821>. Acesso em: 09 nov. 2022.

ASSIS, E. S. Estudo integrado da ilha de calor em áreas urbanas e sua contribuição ao planejamento: o caso de Belo Horizonte, MG. **Fórum Mudanças Climáticas**. v. 4. n. 1, 2011. Disponível em: <https://curt.link/rWp41L>. Acesso em: 19 out. 2022.

BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**. v. 13, 1998, p. 373-384. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364815298000425>. Acesso em: 19 jun. 2022.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GHAFFARIANHOSEINI, A.; BERARDI, U.; GHAFFARIANHOSEINI, A.; AL-OBAIDI, K. Analyzing the thermal comfort conditions of outdoor spaces in a university campus in Kuala Lumpur, Malaysia. **Science of the total environment**, v. 666, 2019, p. 1327-1345. Disponível em: <https://curt.link/XOxIh5>. Acesso em: 10 out. 2022.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

HAIR, J. F.; BLACK, W. C.; BABIN, B. J.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L. **Análise multivariada de dados**. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 699p.

HIRASHIMA, S. **Calibração do Índice de Conforto Térmico Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte**. 2010. 225 p. Dissertação (Mestrado em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-8QMHSZ>. Acesso em: 22 nov. 2022.

HOPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **Journal of biometeorology**. v. 43, 1999, p. 71-75. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s004840050118>. Acesso em: 22 nov. 2022.

INDRAGANTI, M. Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India. **Energy Building**, v. 42, 2010, p. 1019-1025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778810000216>. Acesso em: 20 out. 2022.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; CRISTELI, P. S. SOUZA, H. A. de. Calibração do índice de conforto para espaços externos Physiological Equivalent Temperature (PET) para Curitiba. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, 2018, p. 135-148. Disponível em: <https://curt.link/T5AOtP>. Acesso em: 20 out. 2022.

MACEIÓ. Lei Municipal nº 5.593, de 8 de fevereiro de 2007. **Institui o Código de Urbanismo e Edificações do Município de Maceió**. Disponível em: <http://www.maceio.al.gov.br>. Acesso em: 20 set. 2021.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**. v. 54, 2010, p. 131–139. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-009-0261-0>. Acesso em: 20 set. 2022.

ONU. **Perspectivas de urbanização mundial 2018**. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais: ONU. New York, USA, 2019.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.

RIBEIRO, K. F. A. **Calibração do Índice de Conforto Térmico PET (Temperatura Fisiológica Equivalente) em espaços abertos para a cidade de Cuiabá-MT**. 2019. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2019. Disponível em: <https://curt.link/zT9HaB>. Acesso em: 28 set. 2022.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo: CopyMarket.com, 2000.

SILVA, L. S.; SANTOS, A.; SILVA, L. K. S.; OLIVEIRA, M. S.; SILVA, J. V. Caracterização do Regime Meteorológico de Arapiraca – AL Quinquênio 2012-2016. In: IV INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 10, 2017, Ceará. **Anais [...]**. Ceará: Centro de Convenções do Ceará, 2017. Disponível em: <https://curt.link/dOPX2h>. Acesso em: 28 set. 2022.

SHARMIN, T.; STEEMERS, K. Effects of microclimate and human parameters on outdoor thermal sensation in the high-density tropical context of Dhaka. **International Journal of Biometeorology**, v. 64, 2020, p. 187-203. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00484-018-1607-2>. Acesso em: 28 set. 2022.

TORRES, S. C. **Forma e Conforto: estratégias para (re)pensar o adensamento construtivo urbano a partir dos parâmetros urbanísticos integrados à abordagem bioclimática**. 2017. 397f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Urbano) – Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/22459>. Acesso em: 28 set. 2022.