

6.04.03 – Arquitetura e Urbanismo / Tecnologia de Arquitetura e Urbanismo.

## **ANÁLISE DOS EFEITOS DE TIPOLOGIAS DIFERENCIADAS DE OCUPAÇÃO DO SOLO NO COMPORTAMENTO TÉRMICO EM CIDADE LITORÂNEA: ESTUDO DE CASO EM MACEIÓ (AL)**

Limber Patric Santos Leal<sup>1</sup> \*, Ricardo Victor Rodrigues Barbosa<sup>2</sup>

1. Estudante de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
2. Professor da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Alagoas (FAU-UFAL)

### **Resumo**

O estudo visou compreender a influência da verticalização de uma cidade litorânea de clima quente e úmido no conforto térmico humano utilizando o índice PET a partir de simulações computacionais de cenários hipotéticos para a cidade de Maceió/AL. Os cenários foram simulados no *software* ENVI-met 4.0, a partir do qual foram extraídos os dados climáticos necessários para o cálculo do índice de conforto térmico PET por meio do *software* RayMan Pro. Os resultados foram observados graficamente e submetidos à análise estatística de correlação, onde foi possível identificar que a temperatura média radiante e a temperatura do ar apresentaram maior influência nos valores do índice PET que a velocidade do ar, apontando para a importância do sombreamento proporcionado pelos cenários verticalizados enquanto estratégia bioclimática que auxilia diretamente nas condições de conforto térmico em ambientes externos para o clima quente e úmido da cidade de Maceió/AL.

**Palavras-chave:** Climatologia Urbana; Simulação Computacional; Verticalização.

**Apoio financeiro:** CNPq.

**Trabalho selecionado para a JNIC:** UFAL.

### **Introdução**

As constantes transformações ocorridas no espaço construído, referentes ao crescimento urbano e adensamento desordenados das cidades, comprometem a qualidade ambiental, afetando o microclima local e as condições de conforto térmico humano. Atualmente, essa preocupação tem ganhado força devido à pandemia do Novo Coronavírus, elevando a importância dos espaços urbanos que propiciem o bem-estar e saúde da população. Para Sobreira (2010), o processo de urbanização, oriundo do crescimento do tecido urbano, faz com que o clima da cidade se comporte de maneira diferente do clima rural circundante, devido a substituição da paisagem natural pelos equipamentos urbanos.

Segundo Oke (1996), 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, o aumento do consumo energético para a refrigeração artificial dos edifícios, a ocorrência frequente de chuvas e enchentes, a concentração de ar poluído e a diminuição da ventilação natural (ASSIS, 2011).

Estudos sobre o conforto térmico urbano têm sido realizados a fim de compreender os processos e fenômenos que definem a qualidade ambiental urbana. Sabe-se que a percepção de conforto térmico humano é resultado da interação de diversas variáveis ambientais e individuais, sendo necessário a utilização de um índice que incorpore essas variáveis e expresse a percepção térmica do indivíduo (ANDRADE et al, 2016). Optou-se por utilizar o índice de conforto térmico PET (*Physiological Equivalent Temperature*), definido como a temperatura fisiológica equivalente, para qualquer espaço (interno ou externo), 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).

Neste sentido, o presente estudo visa compreender a influência da verticalização de uma cidade litorânea de clima quente e úmido no conforto térmico humano utilizando o índice PET a partir de simulações computacionais de cenários hipotéticos para a cidade de Maceió/AL.

### **Metodologia**

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

Para elaboração dos cenários hipotéticos buscou-se compreender o padrão recorrente de ocupação nessa região, com base no desenho das quadras e dos lotes e na largura das vias e passeios. A partir do cenário de referência foram elaborados outros quatro cenários hipotéticos verticalizados com 5, 10, 15 e 20 pavimentos. Nesses cenários foram adotados os recuos progressivos conforme o Código de Urbanismo e Edificações de Maceió (MACEIÓ, 2007). Foi utilizada a extensão de área do *software* que corresponde a 180x180x35 (x, y, z).

Além do arquivo de área, o *software* ENVI-met necessita de um arquivo contendo os dados climáticos

que serão utilizados na simulação. Esses dados foram obtidos a partir da estação automática (A303) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizado na cidade de Maceió/AL. O dia escolhido foi 20 de março de 2019, 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.

Os dados microclimáticos foram obtidos a partir dos receptores considerando a altura de 1,5m do solo, correspondente à altura do pedestre. Assim, foram inseridos três receptores em diferentes pontos dos cenários: o receptor 1, localizado no eixo da via com orientação Leste-Oeste; o receptor 2, localizado no eixo da via com orientação Norte-Sul; e o receptor 3, localizado no recuo lateral entre duas edificações. Esses dados foram utilizados para determinar o índice 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, 2007, 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. Pela ausência de calibração do índice PET para a cidade de Maceió e demais cidades alagoanas, foi utilizada neste trabalho a calibração para Salvador/BA, realizada por Andrade et al (2016). Assim, os valores de PET foram classificados em quatro categorias: muito calor (PET  $\geq$  34,1°C), calor (34,1°C > PET > 29,4°C), pouco calor (29,4°C > PET > 26,8°C) ou conforto (PET  $\leq$  26,8°C).

## Resultados e Discussão

Para a análise dos dados considerou-se a variação das alturas dos cenários hipotéticos simulados e os respectivos dados obtidos nos diferentes receptores inseridos nos cinco modelos. Em seguida, os dados foram submetidos a uma análise de correlação com o fim de 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 20/03/2019, classificado como dia típico para a cidade de Maceió.

O receptor 1 (R1) foi inserido no eixo da via com orientação Leste-Oeste e os dados obtidos para a altura de 1,5m, correspondente à altura do usuário. O comportamento do índice PET não apresentou diferenças significativas com a variação das alturas dos cenários nos três horários analisados. Tanto às 9h, quanto às 15h, os cinco cenários foram classificados no intervalo de muito calor (PET  $\geq$  34,1°C), conferindo extremo estresse térmico positivo aos usuários do ambiente urbano externo, principalmente durante a tarde. Por sua vez, no horário noturno todos cenários atingiram o intervalo de conforto (PET  $\leq$  26,8°C) pela ausência de radiação solar.

O receptor 2 (R2) foi inserido no eixo da via com orientação Norte-Sul. Os resultados demonstraram que houve uma redução considerável no valor do Índice PET com a verticalização dos cenários, resultando em diferenças de 15,6°C às 9h e 13,3°C às 15h, entre os cenários 01P e 20P. Porém, mesmo com essa redução, os cenários verticalizados não atingiram a faixa de conforto durante o dia, apenas saíram da faixa de muito calor para calor (34,1°C > PET > 29,4°C), às 9h. No horário de 21h, o comportamento dos cenários foi praticamente o mesmo dentro da faixa de conforto.

O receptor 3 (R3) foi inserido no recuo lateral entre duas edificações para observar a percepção térmica dos usuários dentro do lote, de acordo com a variação das alturas dos cenários. Os valores do Índice PET gerados foram muito semelhantes aos que foram encontrados no R2, demonstrando também que a verticalização dos cenários tende a propiciar uma redução na percepção de calor dos usuários situados no intralote. Neste sentido, no que tange ao conforto térmico urbano, o padrão de ocupação horizontal se mostrou através dos resultados como o mais problemático, chegando a atingir valor de PET de 52,2°C no horário da tarde.

A Figura 1 apresenta uma síntese da classificação do índice PET gerados às 9h, 15h e 21h a partir dos três pontos analisados nos cinco cenários hipotéticos simulados. Observou-se que o comportamento dos cenários verticalizados de 5, 10, 15 e 20 pavimentos é muito similar, indicando que uma verticalização baixa proporciona a mesma percepção térmica aos usuários que a verticalização média e alta.

CENÁRIO	VIA LESTE-OESTE (R1)			VIA NORTE-SUL (R2)			INTRALOTE (R3)		
	09:00	15:00	21:00	09:00	15:00	21:00	09:00	15:00	21:00
01P									
05P									
10P									
15P									
20P									

LEGENDA:	MUITO CALOR PET $\geq$ 34,1	CALOR 34,1 > PET > 29,4	POUCO CALOR 29,4 > PET > 26,8	CONFORTO PET $\leq$ 26,8
----------	--------------------------------	----------------------------	----------------------------------	-----------------------------

Figura 1: Classificação do Índice PET para os cenários hipotéticos nos três receptores analisados.

Para verificar o grau de influência das variáveis ambientais na classificação do índice PET, foram calculados os coeficientes de determinação a partir da associação entre as variáveis ambientais geradas pelos cenários hipotéticos simulados (temperatura do ar, temperatura média radiante e velocidade dos ventos) e os valores do índice PET de cada cenário. Os gráficos de dispersão, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram obtidos a partir da ferramenta *Excel*, e são apresentados na Figura 2.

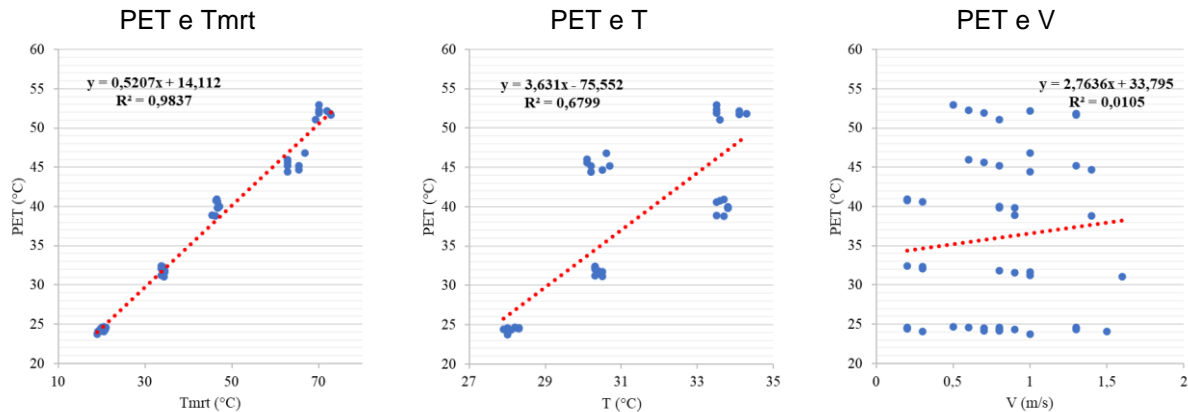


Figura 2: Gráficos de dispersão e regressão linear entre o índice PET e os valores de Tmrt, temperatura do ar e velocidade do vento.

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 preditoras. Quanto maior o valor de  $R^2$ , maior o poder de explicação da equação de regressão (HAIR et al, 2009). Os coeficientes apresentados nos gráficos demonstram que os valores do Índice PET são explicados em 98% pelos valores de Tmrt, 68% pela temperatura do ar e 1% pela velocidade do vento.

Também foi calculada a correlação ( $R$ ) entre os valores de PET (variável dependente) e as variáveis ambientais (variáveis independentes). O resultado foi correlação muito forte com a Tmrt ( $R=0,99$ ), correlação forte com a temperatura do ar ( $R=0,82$ ) e muito fraca com a velocidade do ar ( $R=0,10$ ). Logo, nota-se que a temperatura média radiante foi a variável que mais influenciou nos valores do índice PET, seguida pela temperatura do ar, e que a velocidade do vento praticamente não teve influência. Segundo Ribeiro (2019), a temperatura média radiante é a variável que expressa as trocas radiativas entre o corpo humano e o ambiente em que se encontra, ou seja, os efeitos térmicos a que o homem está submetido no ambiente real (heterogêneo) ou ideal (homogêneo). Por esta razão, a Tmrt influencia mais no índice de conforto PET que as demais variáveis ambientais.

### Conclusões

A presente pesquisa buscou compreender como a verticalização influencia no conforto térmico na cidade de Maceió/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 de orientação Norte-Sul e no intralote. Todavia, o comportamento dos quatro cenários verticalizados foi muito semelhante, indicando que a verticalização de 5, 10, 15 ou 20 pavimentos geraram percepções térmicas semelhantes.

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 por si só não foi suficiente para que os cenários atingissem a zona de conforto, demonstrando a importância de se pensar em estratégias conjuntas que reduzam o rigor térmico em ambientes urbanos, como o uso de materiais construtivos e revestimentos que amenizem os ganhos térmicos e o resfriamento evaporativo por meio de massas vegetadas e corpos d'água.

A partir da análise estatística foi possível identificar que as variáveis climáticas que mais influenciaram no resultado do índice PET dos cenários hipotéticos foram a temperatura média radiante e a temperatura do ar, já a velocidade do ar não influenciou significativamente nos valores de PET. Por esse motivo, o cenário horizontal de um pavimento ocasionou na elevação do desconforto ao permitir maior incidência da insolação no tecido urbano e, conseqüentemente, elevação dos valores de Tmrt e T. 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, contribuindo para a formação de cidades mais saudáveis.

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, a ausência de vegetação e a área limitada oferecida pela versão gratuita do *software* ENVI-met 4.0. Além disso, é necessário que o índice térmico PET seja devidamente calibrado para a cidade de Maceió para tornar os resultados mais completos. Dessa forma, pesquisas futuras serão realizadas com o fim de suprir essas e outras limitações, fornecendo informações mais robustas sobre a influência da verticalização para Maceió e outras cidades de clima semelhante.

### Referências bibliográficas

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.

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.

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.

HOPPE, P. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **Journal of biometeorology**. 43. p.71-75. 1999.

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: set. 2021.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments - application of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**. 51(4), 2007, p. 323–334.

\_\_\_\_\_. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**. 54(2), 2010, p. 131–139.

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

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.

SOBREIRA, L. C. **Expansão urbana e variações mesoclimáticas em João Pessoa-PB**. 2010. 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, 2010.