ESTUDO DA INTERFERÊNCIA DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA (CLP) NO EFEITO DA ILHA DE CALOR URBANO (ICU) ATRAVÉS DA SIMULAÇÃO URBAN WEATHER GENERATOR (UWG)

Pedro Henrique Gonçalves (1); João Pedro Silva Ribeiro (2); Clarissa Ziebell (3); Marília Guimarães Rodrigues (4); Ernestina Rita Meira Engel (5); Tábata Hada Passos Melo (6).
(1) Doutor em Construção Civil (UFG), Arquiteto e Urbanista, pedrogoncalves@ufg.br, UFG.
(2) Graduando em Arquitetura e Urbanismo, joao.ribeiro@discente.ufg.br, UFG.
(3) Doutora em Design (UFRGS), Arquiteta e Urbanista, clarissa.ziebell@ufrgs.br, UFRGS.
(4) Mestra em Arquitetura e Urbanismo (UFG), Arquiteta e Urbanista, UFG.
(5) Arquiteta e Urbanista, Mestranda em Arquitetura e Urbanismo (UFSC), ernestinaengel@gmail.com, UFSC.
(6) Arquiteta e Urbanista, Mestranda em Tecnologias e Materiais em Processos Construtivos, tabatahada@discente.ufg.br, UFG.

RESUMO
Cada vez mais, nota-se a importância dos estudos climáticos em contextos urbanos. O efeito da Ilha de Calor Urbano (ICU) é influenciado pela urbanização, sendo cada vez mais frequente nas cidades. Nesse contexto, torna-se essencial avaliações do clima local e suas implicações. O objetivo do estudo é avaliar a influência da variação da altura da camada limite planetária (CLP) como dado de entrada do componente *Urban Weather Generator.* A delimitação espacial corresponde a uma área urbana do município de Anápolis, Goiás. A metodologia foi desenvolvida em cinco etapas: (1) definição do recorte e levantamento de dados; (2) modelagem da geometria; (3) definição das características construtivas das geometrias; (4) entrada de dados no *DragonFly;* e (5) simulação e análise dos resultados. Os resultados mostram as diferentes variações exercidas pelos parâmetros no modelo. De forma geral, há aumento da temperatura média durante todo o ano em relação ao arquivo climático meteorológico. A partir do modelo, observa-se que quanto menor a altura da camada limite noturna, maior é a temperatura média do ar. A variação da altura da camada limite noturna afeta mais os resultados das temperaturas médias do que a diurna. A partir do estudo, nota-se que a modificação do uso do solo com impermeabilização leva a mudanças significativas na temperatura da camada limite e na qualidade do ar. Assim, o estudo dos fenômenos climáticos se mostra importante, para análise dos efeitos adversos da urbanização no clima local e regional.

Palavras-chave: camada limite urbana, modelagem energética, simulação computacional, urban weather generator.

ABSTRACT
Increasingly, the importance of climate studies in urban contexts is noted. The Urban Heat Island (UHI) effect is influenced by urbanization and is increasingly frequent in cities. In this context, evaluations of the local climate and its implications become essential. The objective of the study is to evaluate the influence of the variation of the height of the planetary boundary layer (PLC) as input data of the Urban Weather Generator component. The spatial delimitation corresponds to an urban area of the municipality of Anápolis, Goiás. The methodology was developed in five steps: (1) definition of the cutout and data survey; (2) modeling of the geometry; (3) definition of the constructive characteristics of the geometries; (4) data input in DragonFly; and (5) simulation and analysis of the results. The results show the different variations exerted by the parameters in the model. In general, there is an increase in the average temperature throughout the year relative to the meteorological climate file. From the model, it is observed that the lower the height of the night boundary layer, the higher the average air temperature. The variation in the height of the night boundary layer affects the results of average temperatures more than the daytime one. From the study, it is noted that land use modification with sealing leads to significant changes in boundary layer temperature and air quality. Thus, the study of climatic phenomena is important for analyzing the adverse effects of urbanization on local and regional climate.

Keywords: urban boundary layer, energy modeling, computer simulation, urban weather generator.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo Amorim (2010), o crescimento urbano modificou o meio natural, gerando degradação no ambiente. As consequências a nível climático são percebidas, principalmente, nas áreas urbanas, onde o clima local é diretamente alterado pelos fatores antrópicos. Dentro dessa realidade, surgem estratégias de planejamento urbano sustentável que podem ter um impacto significativo na diminuição dos efeitos das mudanças climáticas na escala da cidade. Dentre as ações, destaca-se a utilização de materiais de construção mais eficientes energeticamente, como isolamento térmico adequado e sistemas de ventilação eficientes (SANTAMOURIS *et.al.,* 2017).

Além disso, a implementação de tecnologias de resfriamento urbano, como a utilização de superfícies reflexivas e áreas verdes, também pode contribuir para reduzir o efeito da ilha de calor urbana (WANG; YANG e CHEN, 2018). Essas medidas têm o potencial de influenciar positivamente a camada limite planetária, promovendo uma melhor dispersão do calor e reduzindo as variações de temperatura nas áreas urbanas. Além disso, a redução do efeito da ilha de calor urbana pode trazer benefícios como o aumento do conforto térmico, a melhoria da qualidade do ar e a redução do consumo de energia para refrigeração (SANTAMOURIS *et.al.,* 2017; WANG; YANG e CHEN, 2018)

A camada limite planetária (CLP) é uma região da atmosfera que interage diretamente com a superfície terrestre e se estende até altitudes relativamente baixas. É caracterizada por mudanças significativas nas propriedades atmosféricas, como temperatura, umidade e velocidade do vento, em comparação com as camadas superiores da atmosfera (GARRATT, 1992; STULL, 1988).

A ilha de calor urbana (ICU) (Figura 1) é outro fenômeno relacionado à camada limite planetária, sendo caracterizada pelo aquecimento das áreas urbanas em relação ao ambiente natural circundante. Isso ocorre devido à absorção e reemissão de calor pelos materiais urbanos, bem como ao aumento da atividade humana, como o uso de veículos e sistemas de resfriamento (ARNFIELD, 2003; OKE, SPRONKEN-SMITH e JAUREGUI, 2017). Durante o dia, temos a camada limite diurna, que é caracterizada por uma maior mistura vertical devido à presença de radiação solar e turbulência atmosférica (GARRATT, 1992; STULL, 1988). À noite, temos a camada limite noturna, que é mais estável e menos turbulenta devido à ausência de radiação solar direta (GARRATT, 1992; ARYA, 2001).

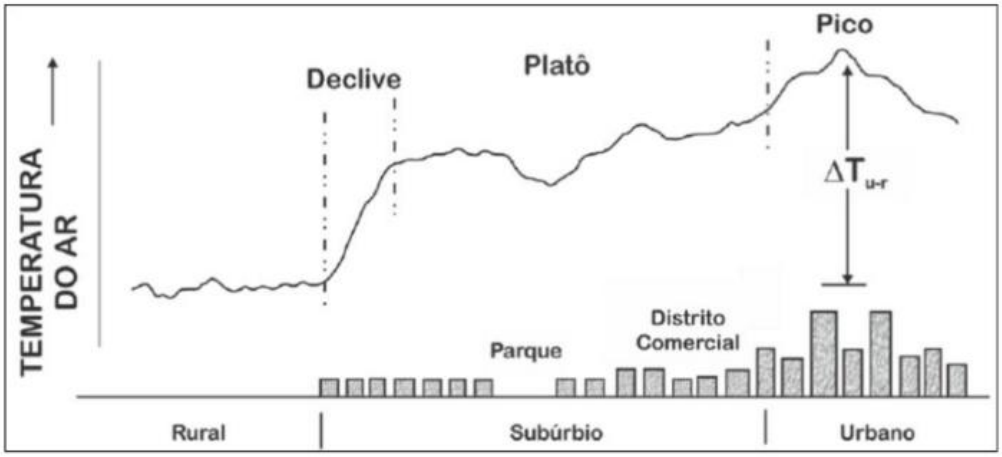

Figura 1 - Ilha de Calor Tradicional (OKE, 1987 apud SOUZA, PARANHOS FILHO e GUARALDO, 2021).

Segundo Romero *et. al.* (2019), o fenômeno ICU, e a condição microclimática derivada, são consequências do adensamento urbano sem preocupação com os efeitos climáticos. O efeito pode ter impactos significativos na qualidade de vida das pessoas, na saúde pública, no consumo de energia e no meio ambiente. Além disso, a ICU também pode afetar a qualidade do ar, a dispersão de poluentes e a formação de nuvens e chuvas. A redução da ventilação e a formação de correntes de ar descendentes podem causar a acumulação de poluentes atmosféricos, como dióxido de nitrogênio e partículas finas, aumentando a poluição do ar em áreas urbanas. Dessa maneira, pode-se dizer que a alocação de construções sobre uma determinada paisagem gera elevações nos fluxos térmico e radiativo ao redor deste ambiente. Portanto, processos como a urbanização, por exemplo, produzem mudanças radicais nas características radiativas, termodinâmicas e aerodinâmicas das superfícies que estão ao redor das áreas urbanas.

Como exemplo disso, a Figura 2 demonstra o fenômeno ICU em Beijing, à noite, sem nuvens, mostrando o perfil da variação de temperatura do ar, iniciando-se na região rural e indo até o centro da cidade. Pode ser observada uma elevação brusca na temperatura do ar próximo aos limite rural-periferia, seguido elevações

mais suaves, sobre a maioria da área periférica e um "pico" na temperatura sobre o centro da cidade, representado por ΔT, que corresponde a máxima diferença entre a temperatura da cidade e da região rural (OKE, 2002).

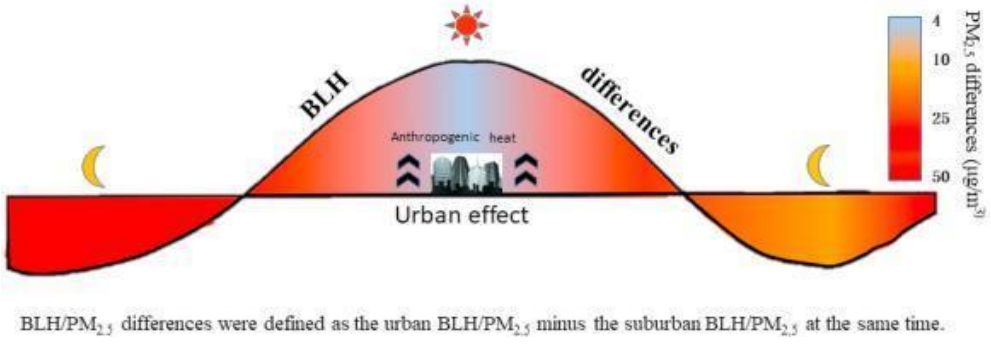

Figura 2 - Ilha de Calor em Beijing, à noite (WANG et. al., 2021).

Entende-se que a CLP tem um papel fundamental na formação e intensidade da ICU, uma vez que é responsável por determinar como o calor é distribuído na atmosfera. Por essa razão, é importante estudar a interferência da CLP no efeito da ICU, a fim de compreender melhor o comportamento do clima urbano e contribuir para o desenvolvimento de estratégias de mitigação dos seus efeitos negativos. Neste contexto, a simulação do clima urbano é uma ferramenta importante para a compreensão dos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera urbana, bem como para a previsão do clima em áreas urbanas. Como exemplo de ferramenta de simulação do clima urbano tem-se o *Urban Weather Generator* (UWG), que permite modelar o clima urbano em diferentes escalas espaciais e temporais, permitindo a análise da interferência da CLP no efeito da ICU.

2. OBJETIVO

O presente estudo tem como objetivo avaliar a interferência da Camada Limite Planetária (CLP) no efeito da ilha de calor urbano (ICU) através da simulação com o componente *Urban Weather Generator* (UWG). A delimitação espacial do estudo corresponde a um recorte da área urbana do município de Anápolis, Goiás.

3. MÉTODO

A presente pesquisa é desenvolvida em cinco etapas, sendo elas:

1. Definição do recorte e levantamento de dados
2. Modelagem da geometria.
3. Definição das características construtivas das geometrias.
4. Entrada de dados no *DragonFly.*
5. Simulação e análise dos resultados.

A seguir, cada uma das cinco etapas é detalhada.

3.1. Definição do recorte e levantamento de dados

Para definição do recorte, buscou-se uma área que demonstrasse as principais variáveis de estudo, com áreas urbanizadas e vegetadas. Para a definição do recorte, foi selecionada uma área que está sendo objeto de estudo em uma dissertação de mestrado. Essa área possui um desenvolvimento territorial expressivo, porém com ausência de edificações altas, resultando em um padrão homogêneo de edificações. A uniformidade das alturas das edificações foi um fator determinante na escolha dessa área, pois favorece a análise de diversos cenários e contribui para resultados mais consistentes. Dessa forma, a área definida para o presente estudo está localizada na região Sul de Anápolis (GO), representada na Figura 3.

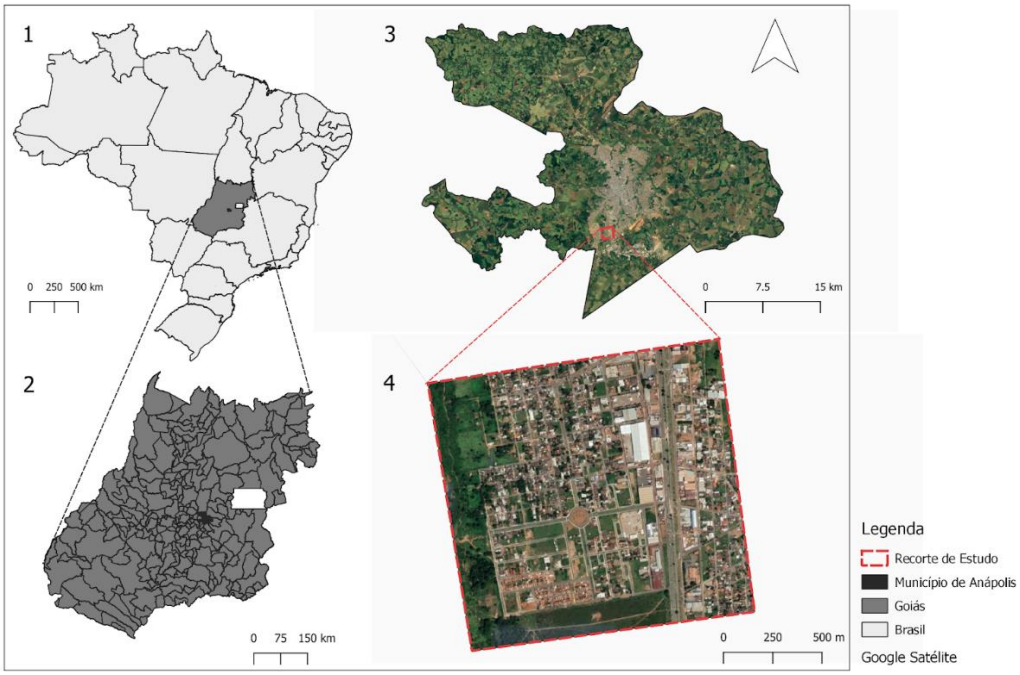

Figura 3 - Localização do Estado de Goiás (1), Localização do Município de Anápolis (2), Localização do Recorte na área urbana de Anápolis (3) e Delimitação do Recorte de Estudo (4). Elaborado pelos autores, com base na malha territorial do IBGE (2010) e Google Satélite.

A área está localizada ao lado do parque da cidade. Ao Leste, é cortada pela Avenida Brasil. Possui baixa densidade de ocupação - especialmente na porção sul - e a maioria das edificações possui apenas um ou dois pavimentos. O perímetro estudado possui dimensões de 962 m x 1.069 m, o que equivale a uma área de aproximadamente 1.000.000,00 m². A região apresenta vegetação característica do cerrado, apresentando um clima tropical. A região do bairro corresponde à Zona Bioclimática 06, segundo a NBR 15220-3 (ABNT, 2005b), caracterizada por amplitudes anuais baixas (ELETROBRÁS-PROCEL, 2022).

3.2. Modelagem da Geometria

A geometria das edificações, quadras, ruas, árvores e áreas verdes foi modelada através do software *Rhinoceros.* O perímetro das edificações foi definido através de desenho da geometria, utilizando como base nas imagens do Google Satélite, através do programa Google *Earth*. Enquanto isso, a altura das edificações a partir de observações das imagens disponíveis no Google *Street View*, estabelecendo padrões de gabarito a partir dessa verificação. A modelagem pode ser visualizada na Figura 4, a seguir.

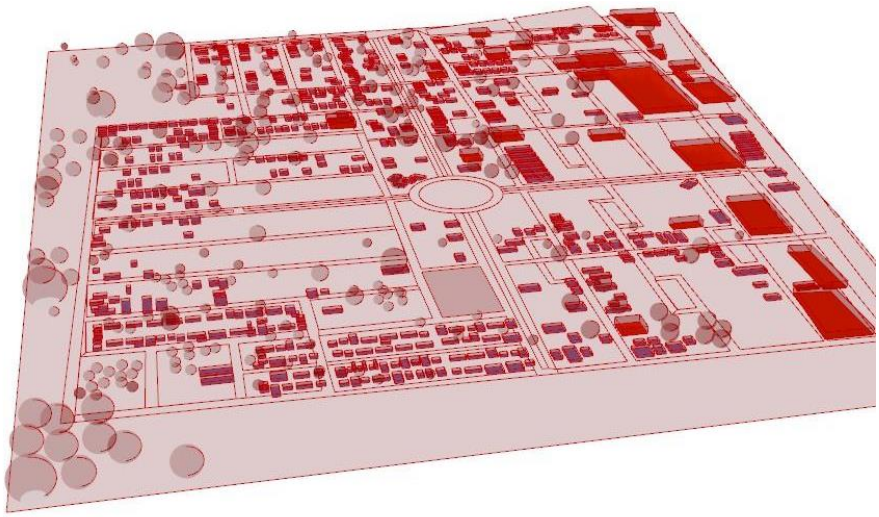

Figura 4 - Modelagem no software Rhinoceros 3D. Elaborado pelos autores, 2023.

3.3. Definição das Características Construtivas das geometrias

As características construtivas são informadas através do *Grasshopper* e do *Honeybee*. O *Grasshopper*, executado dentro do programa *Rhinoceros* 3D, permite a automatização de processos por programação e a execução de algoritmos diversos (RHINOCEROS, 2023). O *Honeybee*, *plugin* utilizado dentro do programa *Grasshopper*, permite simulações de iluminação natural e modelagem termodinâmica para diversos propósitos e usos (LADYBUG TOOLS, 2023a).

Para tanto, foi utilizado o componente chamado de "*HB Construction Set by Climate*", que permite definir um padrão construtivo com base na definição de um clima. Por meio deste componente, pode-se estabelecer a zona climática e o padrão construtivo desejados. Esse padrão, já pré-definido pelo programa, bem como as zonas climáticas, são em quase toda a sua totalidade baseadas na ASHRAE 90.1. Para este trabalho foi definido o clima quente, baseado na ASHRAE 90.1 de 2013, com construção através de materiais da categoria chamada de "Mass", cujas propriedades térmicas estão descritas na Tabela 1. Os materiais que possuem apenas o valor da resistência térmica especificado são aqueles considerados pelo programa como "sem massa", não tendo um valor de espessura definido. Os dados foram extraídos a partir de informações do *plugin Honeybee.*

Tabela 1 - Propriedades dos materiais de construção das edificações. Elaborado pelos autores, 2023, com base nos dados fornecidos pelo *Honeybee.*

	Descrição	**Espessura (m)**	**Condutividade (W/m.K)**	**Densidade (kg/m³)**	**Calor Específico (J/kg.K)**	**Resistência térmica (m² K/W)**
Paredes Externas	Reboco	0,025	0,69	1858	836,46	-
	Concreto	0,2	1,31	2240	836,26	-
	Isolante	-	-	-	-	0,88
	Gesso	0,013	0,16	784,9	829,46	-
Cobertura	Membrana reflexiva	0,0095	0,16	1121,29	1459,06	-
	Isolante	-	-	-	-	4.58
	Superfície metálica	0,0008	45,25	7824,02	499,68	-
Piso	Isolante	-	-	-	-	0,028
	Concreto	0,203	2,31	2322	831,46	-
	Carpete	-	-	-	-	0,22

Sabe-se que o padrão construtivo descrito na Tabela 1 não é característico daquele usualmente encontrado no Brasil. Contudo, visto que o objetivo das simulações conduzidas no presente trabalho era de verificar a interferência da altura da CLP na temperatura do microclima urbano, sem alteração dos demais parâmetros, considerou-se válido manter as características construtivas pré-estabelecidas pelo programa. Em trabalhos futuros, que devem envolver a análise de outros parâmetros, deverão ser consideradas as propriedades térmicas dos materiais construtivos descritos na NBR 15220-2 (ABNT, 2005a).

3.4. Entrada de Dados no *DragonFly*

Nesta etapa são determinados os dados de entrada, que devem ser informados em componentes do *plugin DragonFly*. O *plugin Dragonfly* permite a criação de simulações energéticas em diferentes escalas, a partir de esquemas geométricos das edificações (LADYBUG TOOLS, 2023b).

A simulação foi conduzida para o período de um ano. Como arquivo climático, foi utilizado o de nome "BRA_GO_Anapolis.AB.834190_TMYx.epw", obtido de *Climate.OneBuilding.Org* (2023). Inicialmente, a área coberta por vegetação foi definida como sendo igual a 24%, valor esse correspondente à área permeável da região estudada. Além disso, foi estabelecido o valor do albedo da vegetação. Para tanto, foram utilizados os dados apresentados no trabalho de Trentin *et. al*. (2021), que demonstra que no bioma do cerrado o albedo é de 0,20 para o período entre os meses de outubro a abril e de 0,88 para os meses de maio a setembro. Os dados de espessura, albedo e condutividade dos materiais das áreas não edificadas e não vegetadas estão descritos no Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades das áreas pavimentadas. Elaborado pelos autores, 2023, com base em ABNT (2005a), MACIEL NETO, 2011 e MARUYAMA, 2020.

Material	Espessura (m)	Albedo	Condutividade (W/m-K)
Asfalto	0,2	0,2	1,15
Calçada (concreto)	0,5	0,2	1,75
Solo (argila expandida)	0,5	0,3	0,75

3.5. Simulação e análise dos resultados

Além da simulação com os dados descritos no item 3.4, também foram realizadas simulações com alteração dos valores descritos para as alturas diurna e noturna. Assim, verifica-se de que forma os valores atribuídos à camada limite influenciam nos dados de temperatura do ar apresentados no arquivo climático gerado pelo *DragonFly*. Para tanto, além da simulação com os valores da configuração inicial, foram simulados valores superiores e inferiores a eles, sempre adicionando ou subtraindo 150 metros, no caso da altura diurna, e 25 metros, no caso da altura noturna. O Tabela 2 retrata os valores definidos a cada simulação. No total foram testadas 11 configurações da camada limite (1 original e 10 variações).

Tabela 3 - Propriedades das áreas pavimentadas. Elaborado pelos autores, 2023.

Simulação	Altura diurna (m)	Altura noturna (m)	Simulação	Altura diurna (m)	Altura Noturna (m)
1	700	80	6	1000	30
2	850	80	7	1000	55
Configuração Padrão (default): Altura diurna = 1000 m; Altura noturna = 80 m					
3	1150	80	8	1000	105
4	1300	80	9	1000	130
5	1450	80	10	1000	150

De forma similar, também foi testada a influência do parâmetro que indica a porcentagem da vegetação que ocupa o terreno. Além de 24% (configuração correspondente à área permeável), também foram simulados arquivos com 34%, 54% e 94%, sendo adicionados 10%, 20% e 40%, respectivamente, para comparação.

4. RESULTADOS

Os resultados apresentados a seguir buscam ilustrar o microclima de um recorte de Anápolis, localizado em Goiás. Tendo como base um arquivo climático original, disponível em *Climate.OneBuilding.Org* (2023). Inicialmente são comparadas as temperaturas encontradas no arquivo original com aquelas encontradas no arquivo climático gerado pelo *plugin Dragonfly.* Após, são apresentados os resultados obtidos com as alterações dos dados de entrada, com discussão da influência de cada um deles.

4.1. Arquivo climático original x arquivo climático gerado pelo *Dragonfly*

Na Figura 5, é possível visualizar a variação da temperatura do ar ao longo de um ano, tanto para o arquivo climático original (linha azul), quanto para o arquivo climático gerado pelo *Dragonfly* (linha vermelha). Conforme o esperado, observou-se tendências significativas de aumento da temperatura média durante todo o ano, em relação ao arquivo climático meteorológico. Além disso, haverá elevação da temperatura máxima no verão, o que certamente irá representar períodos mais longos de calor, promovendo o aumento do consumo energético com climatização artificial do ar.

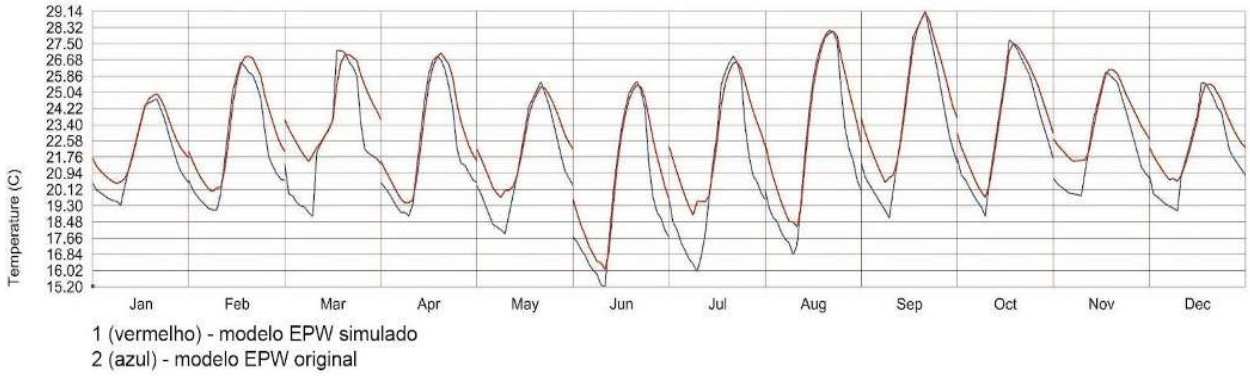

Figura 5 - Comparação entre arquivo climático original e simulado. Elaborado pelos autores, 2023.

Ademais, o uso do ar condicionado acaba por expelir o calor para o exterior, fazendo com que eleve a temperatura do ar exterior, incrementando o efeito da ICU, principalmente em ruas estreitas e de fachadas altas. Contudo, o que mais se destaca na Figura 5 é a elevação das temperaturas mínimas. Tal fato é mais perceptível no mês de julho, quando a temperatura mínima é elevada em pouco mais de 1,5°C.

4.2. Variação dos dados de entrada

O gráfico apresentado a seguir (Figura 6) apresenta o resultado encontrado quando foi variada a altura da camada limite diurna. Em azul, está representado o arquivo climático (EPW) original. Já a linha vermelha concentra todos os demais resultados - na realidade existe alguma diferença entre os resultados para cada uma das alturas testadas, porém ela não é significativa para aparecer no gráfico, gerando apenas uma linha aparente. Ou seja, a variação da altura da camada limite diurna não afetou a temperatura do ar de forma significativa.



Figura 6 - Apresentação de cenários a partir da variação da camada limite diurna. Elaborado pelos autores, 2023.

Já quando a camada noturna é alterada (Figura 7), pode-se perceber uma maior variação da temperatura do ar. Pode-se afirmar que, considerando os valores testados, quanto menor a altura da camada limite noturna, maior é a temperatura média do ar. Da mesma forma, quando a altura foi incrementada, percebe-se a redução da temperatura do ar. Contudo, essa redução é menos significativa.

Com base nos resultados obtidos, pode-se concluir que a variação da camada limite planetária (CLP) diurna não teve um impacto significativo na temperatura do arquivo climático analisado. Por outro lado, observou-se que a variação da CLP noturna desempenhou um papel importante na influência da temperatura durante esse período.

Essa discrepância pode ser explicada pelas características distintas da camada limite diurna e noturna. Durante o dia, a presença de radiação solar e a turbulência atmosférica resultam em uma camada limite diurna mais ativa, com maior mistura vertical e fluxo ascendente de ar quente. Essa intensa atividade turbulenta tende a equalizar as variações de temperatura, resultando em uma menor influência da variação da CLP diurna sobre a temperatura do arquivo climático (CRESTANI, COSTA e MARONEZE, 2020).

Por outro lado, durante a noite, a ausência de radiação solar direta leva a uma camada limite noturna mais estável, com menos turbulência e mistura vertical reduzida. Nesse caso, a variação da CLP noturna

desempenha um papel mais significativo na influência da temperatura, já que as condições atmosféricas noturnas são menos propensas a equalizar as variações térmicas (MOREIRA, 2013).

Portanto, embora a variação da CLP diurna não tenha afetado significativamente a temperatura do arquivo climático analisado, foi observado que a variação da CLP noturna desempenhou um papel relevante nesse contexto. Essa compreensão ressalta a importância de considerar as características distintas da camada limite diurna e noturna ao analisar os efeitos da variação da CLP sobre as condições climáticas.

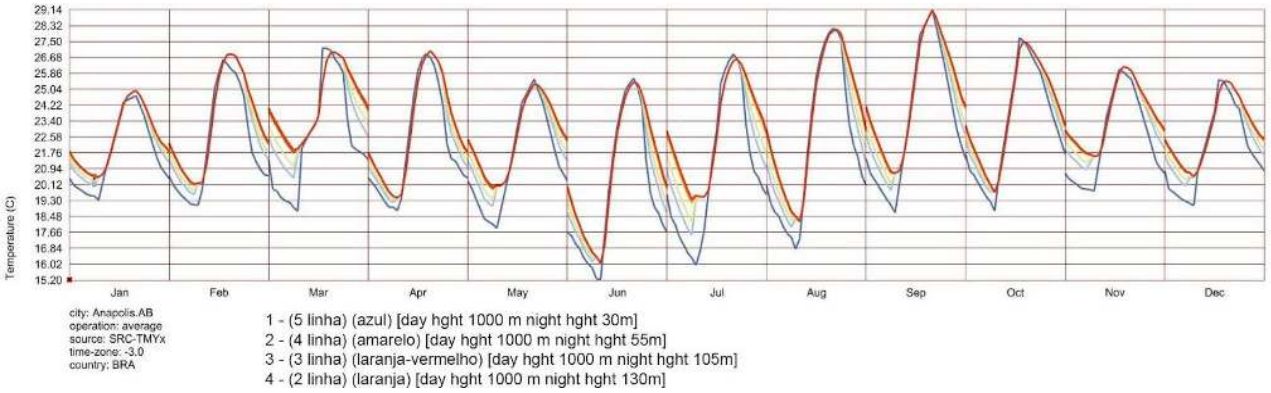

Figura 7 - Apresentação de cenários a partir da variação da camada limite noturna. Elaborado pelos autores, 2023.

De forma complementar, também foi avaliada a influência da cobertura vegetal (Figura 8). Observa-se que, com exceção da linha em azul, correspondente ao arquivo climático original, todas as demais encontram-se muito próximas entre si. Este resultado parece indicar a baixa influência do parâmetro de porcentagem da cobertura do solo na geração de novas temperaturas do ar pelo *DragonFly*.

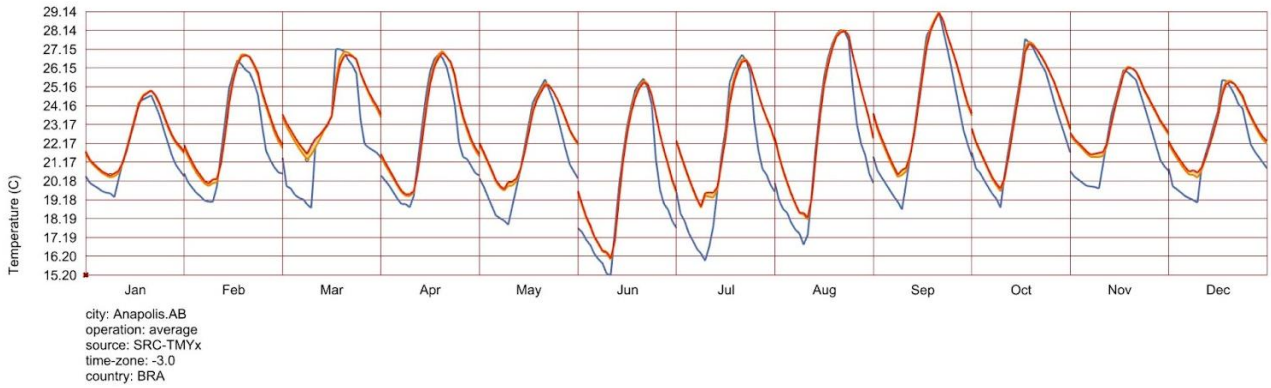

Figura 8 - Apresentação de cenários a partir da variação da presença vegetativa. Elaborado pelos autores, 2023.

Embora a vegetação desempenhe um papel importante na regulação da temperatura, seu impacto direto na CLP diurna e noturna é limitado na simulação com o componente UWG devido à complexidade e à interação de vários fatores atmosféricos. O trabalho de Alchapar *et. al.* (2019) corrobora essa conclusão, visto que identificou a baixa sensibilidade do UWG no que se refere à predição das temperaturas quando foram variados parâmetros relacionados à vegetação.

5. CONCLUSÕES

Pode-se concluir a partir do estudo de simulação microclimática que a investigação da influência da camada limite planetária (CLP) em relação à ilha de calor urbano (ICU), juntamente com a variação de parâmetros urbanos em diferentes cenários, revela que a camada limite diurna e noturna possuem características distintas em relação à camada limite atmosférica durante o dia e a noite. Durante o dia, a superfície terrestre é aquecida pelo sol, resultando em uma camada limite diurna caracterizada por maior turbulência, mistura vertical e fluxo ascendente de ar quente. Já à noite, a perda de calor da superfície terrestre para o espaço leva a uma camada limite noturna mais estável, com menos turbulência, mistura vertical reduzida e fluxo descendente de ar frio. Desta forma, observa-se que as simulações com o componente UWG conduzidas neste trabalho puderam retratar de forma satisfatória como a modificação da altura da CLP diurna e da noturna tem o potencial de interferir de forma distinta a temperatura do ar no microclima urbano.

A modificação do uso do solo em áreas urbanas, especialmente a presença de superfícies impermeáveis, resulta em mudanças significativas nas propriedades da camada limite, como temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e altura da camada limite planetária (PBLH), além da qualidade do ar, como concentrações de ozônio (O3) e material particulado fino (PM2,5) próximo à superfície (PENG; ZENG e LIU, 2022). Apesar de ser reconhecida a influência da porcentagem de áreas permeáveis nas temperaturas do microclima urbano, foi observado neste trabalho que a alteração deste parâmetro de forma isolada não gera alterações significativas da temperatura do ar.

A simulação realizada no presente estudo, evidenciou um aumento significativo das temperaturas mínimas do ar próximo à superfície durante as estações do verão e inverno. Durante o verão, observou-se um aumento médio de aproximadamente 1,44°C, enquanto durante o inverno o aumento foi de 1,0°C.

Esses resultados ressaltam a necessidade de considerar os efeitos adversos da urbanização no clima regional e na qualidade do ar. O aumento das temperaturas mínimas do ar próximo à superfície está intimamente relacionado à formação e intensificação da ilha de calor urbano, que pode ter implicações significativas para o conforto térmico, a saúde pública e o consumo de energia nas áreas urbanas.

Diante disso, é fundamental buscar um equilíbrio entre as estratégias de mitigação da ilha de calor urbano. A implementação de medidas que promovam o resfriamento urbano pode contribuir para reduzir os impactos negativos da urbanização no clima e na qualidade do ar, proporcionando ambientes mais saudáveis e sustentáveis para as populações urbanas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – 2**: Desempenho térmico de edificações residenciais. Parte 2 – Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, ABNT, 2005a.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220 – 3**: Desempenho térmico de edificações residenciais. Parte 3 – zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro, ABNT, 2005b.

AMORIM, M. C. C. T.. Climatologia e gestão do espaço urbano. **Mercator - Revista de Geografia da UFC**. UFC, vol. 9, núm. 1, 2010.

ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, 23(1), 1-26, 2003.

ARYA, S. P. **Introduction to Micrometeorology**. Academic Press, 2001.

ALCHAPAR, N. *et. al*. Thermal performance of the Urban Weather Generator model as a tool for planning sustainable urban development. **Geographica Pannonica**, [S.L.], v. 23, n. 4, p. 374-384, 2019. Centre for Evaluation in Education and Science (CEON/CEES). http://dx.doi.org/10.5937/gp23-24254

CRESTANI, E.; COSTA, F. D.; MARONEZE, R. Simulação Numérica do ciclo diurno da camada limite planetária com um modelo de segunda ordem. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 12, n. 2, 4 dez. 2020.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG. **Repository of free climate data for building performance simulation**. 2023. Disponível em: https://climate.onebuilding.org/. Acesso em: 10 fev. 2023.

ELETROBRÁS – PROCEL. **Diretrizes para obtenção de Classificação Nível A para edificações comerciais, de serviços e públicas**. 2014. Disponível em: http://www.pbeedifica.com.br/sites/default/files/projetos/etiquetagem/comercial/downloads/manual-a.pdf. Acesso em: 24 mar. 2023.

GARRATT, J. R. **The Atmospheric Boundary Layer.** Cambridge University Press, 1992.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malhas Territoriais. **IBGE.** 2010. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais.html. Acesso em: 15 abr. 2023.

LADYBUG TOOLS. **Honeybee.** 2023. Disponível em: https://www.ladybug.tools/honeybee.html. Acesso em: 10 abr. 2023. (1)

LADYBUG TOOLS. **Dragonfly.** 2023. Disponível em: https://www.ladybug.tools/dragonfly.html. Acesso em: 10 abr. 2023. (2)

MACIEL NETO, J. A. **Caracterização térmica dos solos.** 2011. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2011.

MARUYAMA, C. M. **Pavimentos brandos para a mitigação das Ilhas de Calor**: o caso do Jardim da Luz e seu entorno em São Paulo/SP. 2020. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020.

MOREIRA, G. A. **Métodos para obtenção da altura da Camada Limite Planetária a partir de dados de lidar.** 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

PENG, J.; ZHENG, Y.; LIU, C. The Impact of Urban Construction Land Use Change on Carbon Emissions: evidence from the china land market in 2000**:** 2019. **Land,** [S.L.], v. 11, n. 9, p. 1440, 31 ago. 2022. MDPI AG. http://dx.doi.org/10.3390/land11091440

OKE, T. R., SPRONKEN-SMITH, R. A.; JAUREGUI, E. **Urban Climates**. Cambridge University Press, 2017.

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. 2nd ed., Abingdon: Routledge, 2002. 435 p.

RHINOCEROS. **Grasshopper - New in Rhino 6.** 2023. Disponível em: https://www.rhino3d.com/6/new/grasshopper/. Acesso em: 10 abr. 2023.

ROMERO, M. *et. al.* **Mudanças Climáticas e Ilhas de Calor Urbanas.** 1ª edição. Brasília: Editora ETB, 2019.

SANTAMOURIS, M. *et. al.* On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—a review. **Energy and Buildings**, 139, 2017, p. 195-206.

SOUZA, C. A. de; PARANHOS FILHO, A. C.; GUARALDO, E. Estudo bibliométrico sobre ilhas de calor urbanas e zonas climáticas locais. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 26, 2021.

STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer Academic Publishers, 1988.

TRENTIN, C. B. *et. al.* Características da Vegetação dos Biomas Pampa e Cerrado Monitorados por NDVI. **Revista Geoaraguaia,** [S. l.], v. 11, n. Especial, p. 69-84, 2021.

WANG, M. *et.al.* The difference in the boundary layer height between urban and suburban areas in Beijing and its implications for air pollution. **Atmospheric Environment**, Volume 260, 2021. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118552.

WANG, X.; YANG, X.; CHEN, L. Urban heat island: Effect of urbanization on local climate change. **Annual Review of Environment and Resources**, 43, 2018, p. 113-134.