

A influência do design urbano nos níveis da Umidade Relativa do Ar: um estudo de simulação microclimática em Niterói, RJ

Steffany Martins dos Santos

Mestre em Arquitetura e Urbanismo, UFF, Brasil

steffany_santos@id.uff.br

0000-0001-6087-0495

Gabriel Souza Freitas

Mestre em Arquitetura e Urbanismo, UFF, Brasil

gabrielstf@id.uff.br

0009-0008-7449-154X

Louise Land Bittencourt Lomardo

Professora Doutora, UFF, Brasil

louiselbl@gmail.com

0009-0001-9515-7734

A influência do design urbano nos níveis da Umidade Relativa do Ar: um estudo de simulação microclimática em Niterói, RJ

RESUMO

Objetivo - Avaliar a influência de diferentes configurações urbanas na umidade relativa do ar, buscando compreender o papel de cada uma na modulação do microclima urbano.

Metodologia - Foram realizadas simulações com o software ENVI-met em três cenários: a situação atual do terreno, a implantação de um edifício planejado e a presença de um parque verde. A umidade relativa foi analisada ao longo de 24 horas no dia 18 de abril de 2022.

Originalidade/relevância - O estudo destaca a umidade relativa como um indicador microclimático relevante, contribuindo para o debate sobre o impacto da vegetação urbana na qualidade ambiental das cidades.

Resultados - O cenário com parque apresentou os maiores níveis de umidade durante as horas mais quentes do dia, enquanto o cenário mais densamente construído registrou os menores valores, especialmente nas horas noturnas.

Contribuições teóricas/metodológicas - Reforça a aplicabilidade do ENVI-met como ferramenta eficaz para simulações microclimáticas no planejamento urbano sustentável.

Contribuições sociais e ambientais - Os resultados evidenciam a importância das áreas verdes para a promoção do conforto ambiental e para a formulação de políticas públicas voltadas à qualificação do espaço urbano.

PALAVRAS-CHAVE: Umidade Relativa do Ar. ENVI-met. Microclima urbano.

The Influence of Urban Design on Relative Humidity: A Microclimatic Simulation Study in Niterói, Brazil

ABSTRACT

Objective – To evaluate the influence of different urban configurations on relative humidity, with the aim of understanding the role each plays in modulating the urban microclimate.

Methodology – Simulations were performed using ENVI-met software for three scenarios: the current state of the site, the implementation of a planned building, and the inclusion of a green park. Relative humidity was analyzed over a 24-hour period on April 18, 2022.

Originality/Relevance – The study highlights relative humidity as a key microclimatic indicator, contributing to discussions on the impact of urban vegetation on environmental quality in cities.

Results – The green park scenario had higher humidity levels during the hottest hours of the day, while the densely developed scenario had the lowest levels, especially at night.

Theoretical/Methodological Contributions – Reinforces the use of ENVI-met as an effective tool for microclimatic simulations applied to sustainable urban planning.

Social and Environmental Contributions – The results highlight the role of green spaces in promoting environmental comfort and supporting public policies aimed at improving urban spaces.

KEYWORDS: Relative humidity. ENVI-met. Urban Microclimate.

La influencia del diseño urbano en los niveles de humedad relativa del aire: un estudio de simulación microclimática en Niterói, Brasil

RESUMEN

Objetivo – Evaluar la influencia de diferentes configuraciones urbanas en la humedad relativa del aire y comprender el papel de cada una en la modulación del microclima urbano.

Metodología – realizaron simulaciones con el programa informático ENVI-met en tres escenarios: la situación actual del terreno, la implantación de un edificio planificado y la presencia de un parque verde. Se analizó la humedad relativa durante un período de 24 horas el 18 de abril de 2022.

Originalidad/Relevancia – El estudio destaca la humedad relativa como un indicador microclimático relevante y contribuye al debate sobre el impacto de la vegetación urbana en la calidad ambiental de las ciudades.

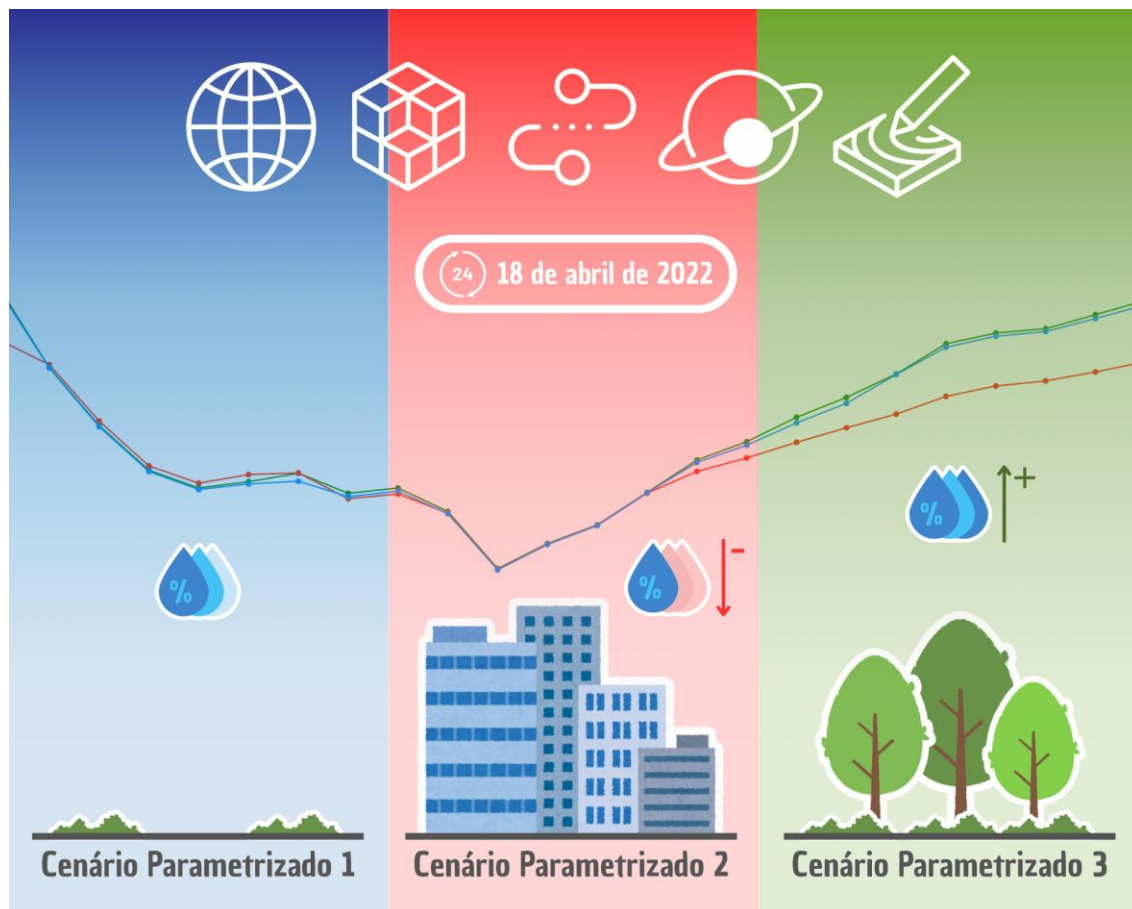
Resultados – El escenario con parque presentó los niveles más altos de humedad durante las horas más cálidas del día, mientras que el escenario con mayor densidad constructiva registró los valores más bajos, especialmente durante la noche.

Contribuciones Teóricas/Metodológicas – Se reafirma la aplicabilidad del ENVI-met como herramienta eficaz para simulaciones microclimáticas en la planificación urbana sostenible.

Contribuciones Sociales y Ambientales – Los resultados evidencian la importancia de las áreas verdes para promover el confort ambiental y formular políticas públicas orientadas a mejorar el espacio urbano.

PALABRAS CLAVE: Humedad relativa del aire. ENVI-met. Microclima urbano.

RESUMO GRÁFICO



1 INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um fenômeno amplamente estudado e documentado pela comunidade científica, com crescentes evidências de suas consequências, incluindo eventos de calor extremo, um dos impactos mais visíveis. O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)¹ foi estabelecido pela Organização Meteorológica Mundial (OMM) e pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e é responsável por produzir relatórios sobre as mudanças climáticas e seus impactos. O segundo relatório, lançado em 1995, resultou na criação do Protocolo de Kyoto, que estabelece limites para a emissão de gases de efeito estufa. O Relatório do Grupo de Trabalho 1, presente no Sexto Relatório (Sixth Assessment Report - AR6) do IPCC publicado em 2021 traz o dado do aumento da temperatura global em 1,5°C entre 1850 e 2020, fenômeno causado pela atividade humana, principalmente a queima de combustíveis fósseis, resultando em mudanças climáticas significativas.

Eventos de calor extremo nas cidades podem elevar significativamente os picos de mortalidade e morbidade (LIBONATI, 2024). As ondas de calor podem levar a problemas de saúde, como insolação, desidratação e agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias (YADAV et al, 2023). Além disso, a exposição prolongada ao calor extremo pode ter impactos negativos na produtividade econômica e no bem-estar social das comunidades afetadas (GARCIA, 2023, BASU; SAMET, 2002).

Além das questões relacionadas à temperatura, é fundamental destacar que o aquecimento global e a urbanização desordenada também interferem diretamente na Umidade Relativa do Ar, um fator climático essencial para o conforto térmico humano e para o equilíbrio dos ecossistemas urbanos. Nesse contexto, os grandes centros urbanos enfrentam um cenário cada vez mais desafiador, com a escassez de áreas verdes, o excesso de construções verticais e a impermeabilização do solo contribuindo para alterações microclimáticas significativas, como a redução da Umidade Relativa do Ar. Esses aspectos da urbanização apresentam problemas relacionados à drenagem das chuvas, à baixa qualidade do ar, ao aumento das ilhas de calor e a outras questões ambientais (MENDONÇA, 2005).

Niterói, cidade metropolitana do Rio de Janeiro, ilustra bem essa realidade, enfrentando desafios crescentes relacionados ao aumento das temperaturas e à intensificação de ilhas de calor urbanas, fenômenos agravados pelo processo de urbanização e pelas mudanças climáticas globais. As áreas urbanas são consideradas grandes modificadoras do clima devido às intensas atividades humanas, ao grande número de veículos, à verticalização, impermeabilização, e à diminuição de áreas verdes, o que "faz com que as cidades sejam os lugares onde as resultantes ambientais configuram-se como obra conjunta de uma natureza retrabalhada e aperfeiçoada aos propósitos do viver humano" (MONTEIRO, 2003. p.10). Assim, a introdução de áreas verdes nas cidades surge como uma estratégia eficaz para mitigar os efeitos negativos do planejamento urbano inadequado, promovendo não apenas a melhoria da qualidade do ar e da paisagem urbana, mas também um papel fundamental na regulação da Umidade Relativa do Ar, por meio da evotranspiração e do sombreamento vegetal, que influenciam diretamente no conforto ambiental no conforto ambiental das áreas urbanas.

As áreas verdes contribuem para a melhoria da qualidade de vida e do bem-estar das

¹ INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2007, op. cit.; PIGUET, Etienne. "Climate change and forced migration".

peessoas que vivem e frequentam os centros urbanos (LONDE; MENDES, 2014). Dessa forma, investigar o papel das áreas verdes na regulação da Umidade Relativa do Ar em cidades como Niterói se torna essencial para o desenvolvimento de estratégias urbanas sustentáveis e resilientes frente às mudanças climáticas.

2 OBJETIVOS

Este trabalho se propõe a investigar os benefícios da implementação de áreas verdes nos centros urbanos, com foco na cidade de Niterói, Rio de Janeiro. Por meio de análises e simulações realizadas no software simulador de microclimas ENVI-met Headquarter 5.1.1, buscou-se compreender como a arborização urbana pode contribuir para a regulação da umidade relativa do ar, um fator climático essencial para o conforto ambiental e a saúde das populações urbanas. O estudo analisa as variações da umidade relativa do ar em diferentes configurações urbanas, com o objetivo de comparar o desempenho das áreas vegetadas em relação a superfícies impermeáveis e construções.

Além disso, avaliou-se o potencial dessas intervenções na melhoria do microclima local em diferentes horários do dia, por meio de três cenários simulados: cenário atual, sem construções, cenário com o local edificado e, por último, cenário no qual o local recebe um parque arborizado. A meta é fornecer dados concretos que evidenciem os benefícios reais da adoção de áreas verdes como estratégia de planejamento urbano sustentável, especialmente no que se refere à manutenção de índices saudáveis de umidade nas cidades.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

Para fundamentar o estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica com foco em urbanização, microclima urbano, umidade relativa do ar, arborização e planejamento urbano sustentável. A revisão envolveu literatura especializada, estudos anteriores e documentos acadêmicos, com ênfase na relação entre áreas verdes e variações na umidade em ambientes urbanos. Embora o estudo completo considere diversas variáveis microclimáticas, este artigo foca especificamente na umidade relativa do ar.

A pesquisa tem como área de estudo a cidade de Niterói (RJ), que enfrenta desafios relacionados ao aumento das temperaturas, ilhas de calor e impermeabilização do solo. A escolha de um trecho urbano específico, caracterizado por altas temperaturas e adensamento construtivo, permitiu avaliar o papel da arborização na regulação microclimática local, com base em dados oficiais sobre infraestrutura urbana e cobertura vegetal.

Com o objetivo de comparar diferentes configurações urbanas, foram realizadas simulações no software ENVI-met 5.1.1, capaz de modelar o microclima urbano com alta resolução. Foram criados três cenários: a situação atual do terreno, a projeção de um edifício de grande porte e a implementação de um parque urbano arborizado. A comparação entre eles permitiu analisar o impacto da arborização na umidade relativa do ar e seus efeitos no conforto ambiental.

A análise dos dados gerados pelas simulações considerou as variações de umidade ao longo de um dia típico, permitindo identificar a influência da vegetação e da impermeabilização do solo sobre o microclima. Os resultados foram confrontados com os objetivos da pesquisa e

permitiram verificar a relevância das áreas verdes como estratégia urbana para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e promover maior conforto ambiental nas cidades.

4 MÉTODO DE ANÁLISE

4.1 Estudo de caso: a cidade de Niterói

4.1.1 Caracterização geral de Niterói

Niterói é um município da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (Figura 1), com uma área de 133,757 km² e população estimada em 481.749 habitantes (IBGE 2021). Sua densidade demográfica é de 3.601,67 hab/km², bem acima da média estadual (365,23 hab/km²) e muito superior à nacional (23,8 hab/km²).

A cidade apresenta um Índice de Desenvolvimento Humano de 0,837, o mais alto do Estado do Rio de Janeiro (PNUD, 2013). Apesar do indicador positivo, o crescimento demográfico de 41,7% nos últimos 30 anos gerou consequências como ocupações irregulares em áreas de vegetação e conservação ambiental: Niterói possui 36.304 moradias em favelas, o que representa 15,73% do total de domicílios da cidade (IBGE 2021).

Figura 1 – Localização da cidade de Niterói - Rio de Janeiro



Fonte: Raphael Lorenzeto de Abreu

Assim como outras cidades densamente urbanizadas, Niterói enfrenta problemas associados à impermeabilização do solo, como alagamentos frequentes e a intensificação do fenômeno das ilhas de calor.

4.1.2 O clima de Niterói

Niterói possui clima tropical (classificação Aw, segundo Köppen e Geiger), com temperatura média anual de 23,3 °C e precipitação média de 1103 mm. Os verões são quentes e úmidos; os invernos, mais amenos (CLIMATE DATA, 2023).

Situada na região sudeste do Brasil, a cidade apresenta um verão prolongado, com dezembro a março sendo os meses que registram temperaturas mais elevadas. Agosto é o mês mais seco (41 mm de precipitação), enquanto janeiro o mais chuvoso (147 mm de precipitação).

Fevereiro é o mês mais quente (26,6 °C) e julho, o mais frio (20,1 °C). A umidade relativa varia entre 73,29% (setembro) e 79,45% (abril). Em termos de radiação solar, fevereiro tem maior média diária (9,95h), enquanto janeiro registra a menor (7,06h). Niterói recebe cerca de 267 horas de sol por ano (CLIMATE DATA, 2023).

Figura 2 – Dados climáticos para Niterói

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura média (°C)	26.4	26.6	25.6	24	21.5	20.7	20.1	20.8	21.9	23.2	23.8	25.3
Temperatura mínima (°C)	23.2	23.2	22.8	21.2	18.7	17.6	16.9	17.2	18.3	19.8	20.7	22.3
Temperatura máxima (°C)	30.4	30.9	29.5	27.7	25.3	24.8	24.5	25.7	26.7	27.8	27.7	29.3
Chuva (mm)	147	96	135	87	76	46	50	41	73	86	127	139
Umidade (%)	77	76	79	79	79	79	77	75	73	75	78	78
Dias chuvosos (d)	11	9	11	9	9	6	6	6	8	9	11	11
Horas de sol (h)	9.9	10	8.8	8	7.3	7.1	7	7.4	7.4	7.7	8	8.9

Fonte: Adaptada de Climate-Data, 2023 (2025)

Esses dados caracterizam o contexto climático e urbano de Niterói, justificando sua escolha como objeto de estudo para avaliar o impacto da arborização urbana sobre a umidade relativa do ar, a partir das simulações no software ENVI-met.

4.2 Modelagem e simulação

4.2.1 ENVI-met Headquaeter 5.1.1

ENVI-met é uma plataforma de modelagem microclimática desenvolvida pelo Centro de Pesquisa de Microclima Urbano da Universidade de Duisburg-Essen, na Alemanha. Baseado em princípios da física ambiental, o software permite simulações detalhadas das condições microclimáticas em áreas urbanas, sendo amplamente utilizado em estudos sobre o ambiente construído (ENVI-met GmbH, 2023).

No campo do urbanismo, o ENVI-met tem se destacado por fornecer análises sobre os impactos de elementos urbanos — como vegetação, edifícios e pavimentos — na temperatura, umidade relativa, conforto térmico e qualidade do ar.

Diversos estudos reforçam sua credibilidade e aplicabilidade científica, como:

- *Analyzing the ENVI-met microclimate model s performance...* (Tsoka et al., 2018);
- *Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures...* (Liu et al., 2021);
- *Using ENVI-met to simulate the impact of global warming...* (Huttner et al., 2008);
- *Urban microclimate improvement using ENVI-met...* (Chatzinikolaou et al., 2018);
- *Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met...* (Ouyang et al., 2022).

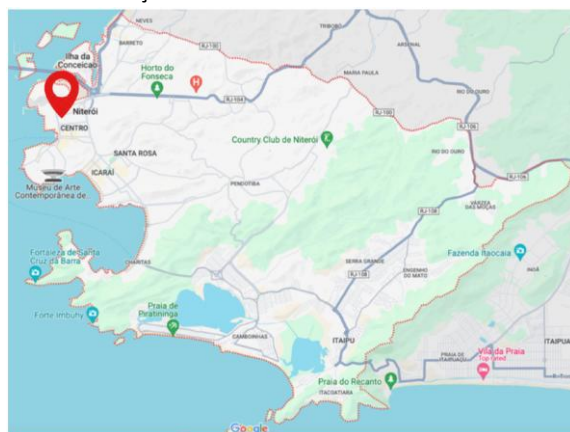
Dessa forma, o ENVI-met se estabelece como uma ferramenta essencial para pesquisadores e profissionais interessados em compreender e planejar espaços urbanos mais sustentáveis e resilientes.

4.2.2 Caracterização dos cenários parametrizados

Para este estudo, foi escolhida uma área no centro de Niterói, atualmente um terreno vazio com baixa cobertura vegetal e alta incidência de radiação solar. A região é marcada por intensa urbanização, alta densidade de edifícios e temperaturas elevadas. A escolha se justifica também pelo fato de haver um projeto de construção de um edifício residencial com mais de 20 andares no local, o que potencializa os impactos no microclima urbano.

As simulações buscam, assim, antecipar as possíveis alterações microclimáticas na região, considerando diferentes cenários urbanos e níveis de cobertura vegetal. A Figura 3 mostra a localização do terreno simulado.

Figura 3 – Localização da área escolhida dentro da cidade de Niterói



Fonte: Adaptado de Google Maps 2024

Com o objetivo de adequar a simulação às limitações dimensionais do ENVI-met, foi selecionado um trecho da área de estudo, com aproximadamente 47 metros por 106 metros, situado entre a Rua Um e a Visconde do Rio Branco.

Com base na análise da situação atual do terreno e das condições climáticas locais, foram definidos três cenários de uso para comparação, permitindo investigar o potencial de desenvolvimento da área sob diferentes perspectivas.

Esses cenários foram simulados utilizando como base as condições de temperatura do dia 18 de março de 2022 — data em que Niterói registrou 38,6 °C, sendo a cidade mais quente do Brasil naquele dia.

4.2.2.1 Cenário parametrizado 1 - Situação Atual

O primeiro cenário modelado no programa ENVI-met representa a condição atual da área estudada. Nesse cenário, o terreno apresenta baixa densidade arbórea e parte do solo está impermeabilizada com concreto. As informações utilizadas na modelagem foram obtidas por meio de dados oficiais e imagens do aplicativo Google Earth.

A localização, espécies, datas de plantio e dimensões das árvores de Niterói estão disponíveis no site SIGeo, da prefeitura municipal. Com base nesses dados, foi possível incorporar as árvores existentes no recorte selecionado de forma mais precisa.

Figura 4 – Área selecionada para simulação



Fonte: Adaptada a partir do Google Earth

4.2.2.2 Cenário parametrizado 2 - Situação após a construção prevista

A segunda simulação representa a implementação do projeto urbanístico atualmente previsto para a área, no qual será construído um edifício residencial. O objetivo neste cenário é avaliar possíveis alterações na temperatura local e nas áreas adjacentes, com a expectativa de que a construção contribua para o aumento dos índices térmicos.

O edifício em questão é o Residencial Rio Branco 220, que contará com 711 apartamentos distribuídos em 19 andares, além do térreo, dois pavimentos de garagem e cobertura, ocupando praticamente todo o terreno. A conclusão e entrega das unidades está prevista para 2026.

Na imagem a seguir (Figura 5), é apresentada uma prévia do edifício, evidenciando sua escala significativamente superior às construções vizinhas e sua ocupação quase total do terreno analisado.

Figura 5 – Prévia do Residencial Rio Branco 220



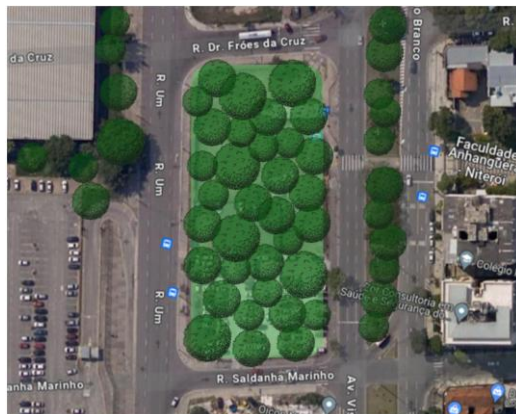
Fonte: Construtora Cury

4.2.2.3 Cenário parametrizado 3 - Situação após intervenção verde

O terceiro cenário simulado considera uma proposta hipotética de requalificação urbana, em que a área atualmente vazia seria transformada em um parque urbano com alta densidade de vegetação.

Essa intervenção visa analisar o impacto de uma cobertura vegetal significativa na moderação das temperaturas locais e nas áreas adjacentes. A simulação busca identificar se esse tipo de intervenção pode contribuir para a mitigação de ilhas de calor urbanas e para a melhoria do conforto térmico no entorno. A representação gráfica do cenário encontra-se na Figura 6.

Figura 6 – Prévia do Residencial Rio Branco 220



Fonte: A autora. Adaptado de Google Maps

4.2.3 Modelagem dos cenários parametrizados no ENVI-MET

A modelagem dos três cenários foi iniciada no software ENVI-met 5.5.1, após a definição das tipologias, características urbanas, materiais e demais elementos necessários para a composição do domínio simulado. A etapa inicial consistiu na inserção das configurações gerais do modelo (Quadro 1), assegurando a padronização dos parâmetros em todas as simulações.

A modelagem foi realizada em plataforma 2D, com base em uma imagem em formato Bitmap obtida do Google Earth, utilizada como plano de fundo para auxiliar na correta delimitação espacial e posicionamento dos elementos no terreno.

Quadro 1 - Configuração iniciais

Propriedades do modelo de domínio utilizados			
Área principal do modelo	Número de células no eixo x		50 células
	Número de células no eixo y		50 células
	Número de células no eixo z		40 células
Tamanho e estrutura das células	Tamanho da célula no eixo x (m)		3 metros
	Tamanho da célula no eixo y (m)		3 metros
	Tamanho da célula no eixo z (m)		3 metros
	Método de geração da grade vertical		Equidistante
Propriedades geográficas	Indicação do Norte (em graus)		-13
	Localização na Terra	Nome da cidade	Niterói - RJ - Brasil
		Latitude	-22.88
		Longitude	-43.10
		Fuso horário de referência	GMT - 3
		Longitude de referência	-45.00

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Os materiais utilizados foram selecionados com base em suas propriedades térmicas, visando representar, de maneira simplificada, as condições reais da área de estudo, sem comprometer a confiabilidade dos resultados.

É necessário manter ao menos duas células livres de edificações em torno do modelo principal, conforme recomendado pelo próprio software, a fim de evitar distorções nas simulações. Dessa forma, as construções adjacentes foram parcialmente representadas, também em razão das limitações de tamanho do domínio do ENVI-met.

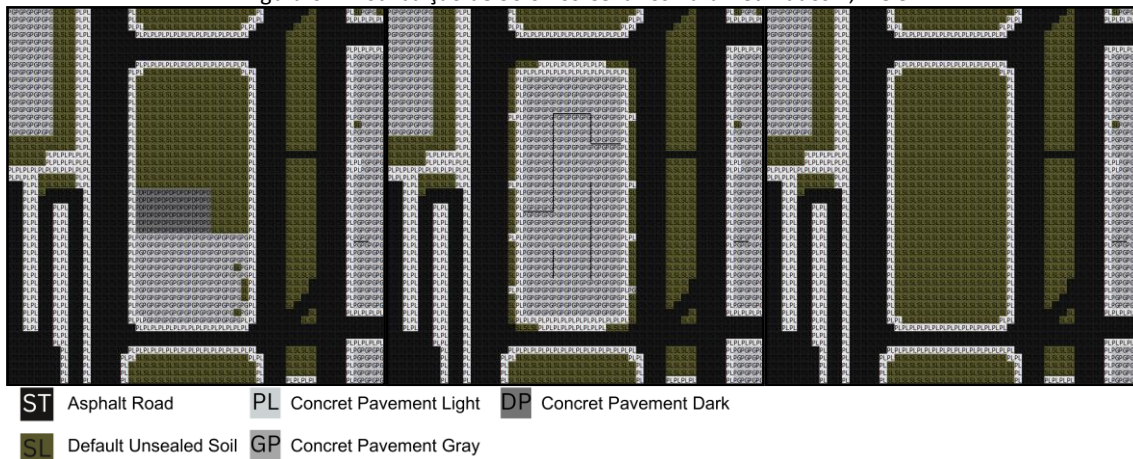
4.2.3.1 Solo e superfícies

Nos três cenários, foi utilizado o material *Asphalt Road* (sigla *ST*) para representar todas as áreas impermeabilizadas com asfalto, como ruas e entradas de estacionamento. As calçadas foram modeladas com o material *Concrete Pavement Light* (*PL*), enquanto o interior dos lotes vizinhos, sob as edificações existentes, recebeu o material *Concrete Pavement Gray* (*PG*), assim como a área de estacionamento localizada dentro do terreno analisado. Ainda no terreno em estudo, foi aplicado o material *Concrete Pavement Dark* (*PD*) para representar as superfícies pavimentadas que não se enquadram nas categorias anteriores.

Nas áreas não impermeabilizadas, cobertas ou não por vegetação, bem como nos pontos de inserção das árvores, utilizou-se o material *Default Unsealed Soil (Sandy Loam)*, identificado pela sigla *SL*.

Na Figura a seguir, observa-se a distribuição dos tipos de solo no Cenário Parametrizado 1, Cenário Parametrizado 2 e Cenário Parametrizado 3, respectivamente.

Figura 6 – Distribuição de Solo nos Cenários Parametrizados 1, 2 e 3

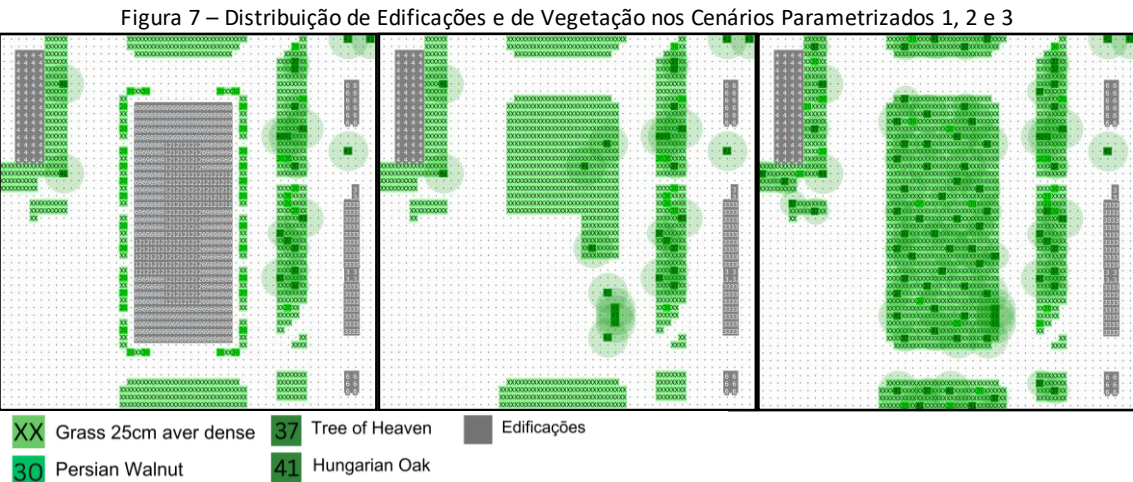


Fonte: Elaborado pela autora (2024)

4.2.3.2 Edifícios e vegetação

As edificações do entorno do terreno se repetem nos três cenários, portanto, foram modeladas de maneira idêntica. As alturas dos prédios foram definidas a partir de um pé direito comum de 3 metros, para facilitar o cálculo a partir do seu número de andares, que podem ser observadas a partir da indicação numérica que aparece nas figuras a seguir, exemplo: 33 = 33 metros = 11 andares totais.

Na Figura a seguir, observa-se a distribuição das edificações e da vegetação no Cenário Parametrizado 1, Cenário Parametrizado 2 e Cenário Parametrizado 3, respectivamente.



Fonte: Elaborado pela autora (2024)

No local, existem diferentes tipologias de edificações. Por esse motivo, os materiais escolhidos para fachadas e coberturas também apresentaram pequenas variações, a fim de se aproximarem ao máximo da realidade. Esses materiais estão descritos abaixo, no Quadro 2.

Na Quadro 2, os edifícios numerados como 1, 3, 4 e 5 representam estruturas preexistentes na área — uma característica comum aos três cenários simulados. Por outro lado, o edifício identificado como "2" corresponde ao Residencial Rio Branco 220, presente exclusivamente no Cenário Parametrizado 2.

Quadro 2 - Definição de materiais das edificações

	Altura (m)	Material das paredes
1	4	[0200C4] Concrete wall
2	12 - 69	[0200C4] Concrete wall
3	6	[0200B1] Brick wall
4	3 - 33	[0200C4] Concrete wall
5	6	[0200B1] Brick wall

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Quanto à vegetação de solo, foi utilizado o material *Grass 25 cm Aver Dense* (XX) em todas as áreas com gramado.

Para fins de representação, as diversas espécies arbóreas existentes foram simplificadas e agrupadas em três modelos disponíveis no programa ENVI-met, selecionados com base em características similares às espécies reais — como altura e diâmetro da copa. As espécies utilizadas foram: *Hungarian Oak* (41), *Persian Walnut* (30) e *Tree of Heaven* (37).

4.2.3.3 Configuração dos parâmetros de entrada para a simulação e seleção dos dados de saída

Para a definição do dia de simulação, optou-se pelo dia 18 de abril de 2022, marcado pelo recorde de temperatura na cidade, posicionando-a como a mais quente do Brasil. Os dados pertinentes foram obtidos de uma tabela da Estação Meteorológica A627 - Niterói, situada no bairro Barreto, através do portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2022). Esses dados foram então incorporados à configuração do *Simple Forcing* no ENVI-Guide V5.5.1, conforme indicado nos Quadros 3 e 4 a seguir. Conforme recomendação de Liu et al. (2021), é aconselhável iniciar a simulação à meia-noite ou ao nascer do sol. Assim, o início de cada simulação foi definido para as 00h, totalizando um período de 30 horas de simulação, das quais serão eliminadas as 6 horas iniciais que são consideradas de estabilização do modelo (Ouyang et al., 2022).

Quadro 3 - Configuração dos parâmetros de entrada

Dados metodológicos	Dia simulado (18/04/2022)
Horário Inicial	00h00
Duração total	30 horas
Intervalo do registro	1 hora
Velocidade média dos ventos em 10 m	1.40 m/s
Direção dos ventos	180°
Umidade em 2500 m	8,41 g/m ³ (tabela da University of Wyoming)
Rugosidade	0.01
Nuvens	0 (dia predominantemente sem nuvens)

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

Quadro 4 - Temperatura do ar e Umidade relativa hora a hora do dia 18 de abril de 2022

Horário	00h	01h	02h	03h	04h	05h	06h	07h	08h	09h	10h	11h
Temperatura do ar (C)	29	29	28	27	26	36	25	25	25	25	26	28
Umidade relativa (%)	61	62	70	72	73	76	80	80	82	84	76	71
Horário	12h	13h	14h	15h	16h	17h	18h	19h	20h	21h	22h	23h
Temperatura do ar (C)	29	30	32	34	36	37	37	36	34	32	31	31
Umidade relativa (%)	72	64	50	49	40	27	32	35	41	48	51	56

Fonte: Elaborado pela autora (2024)

5 RESULTADOS

Neste tópico, são apresentados os resultados das simulações dos três cenários parametrizados de forma comparativa, abrangendo o período entre 7h do dia 18 de abril de 2022 e 6h do dia 19 de abril de 2022.

A partir dos arquivos resultantes das simulações dos cenários 1, 2 e 3, foi utilizada uma extensão do ENVI-met denominada Leonardo, responsável pela geração de mapas temáticos com base nos dados de saída selecionados pelo usuário — sejam estes individuais ou combinados.

Com o auxílio deste plugin, foram elaborados mapas representativos hora a hora, cobrindo o período compreendido entre 7h da manhã do dia 18 e 6h da manhã do dia 19 de abril de 2022.

5.1 Umidade Relativa

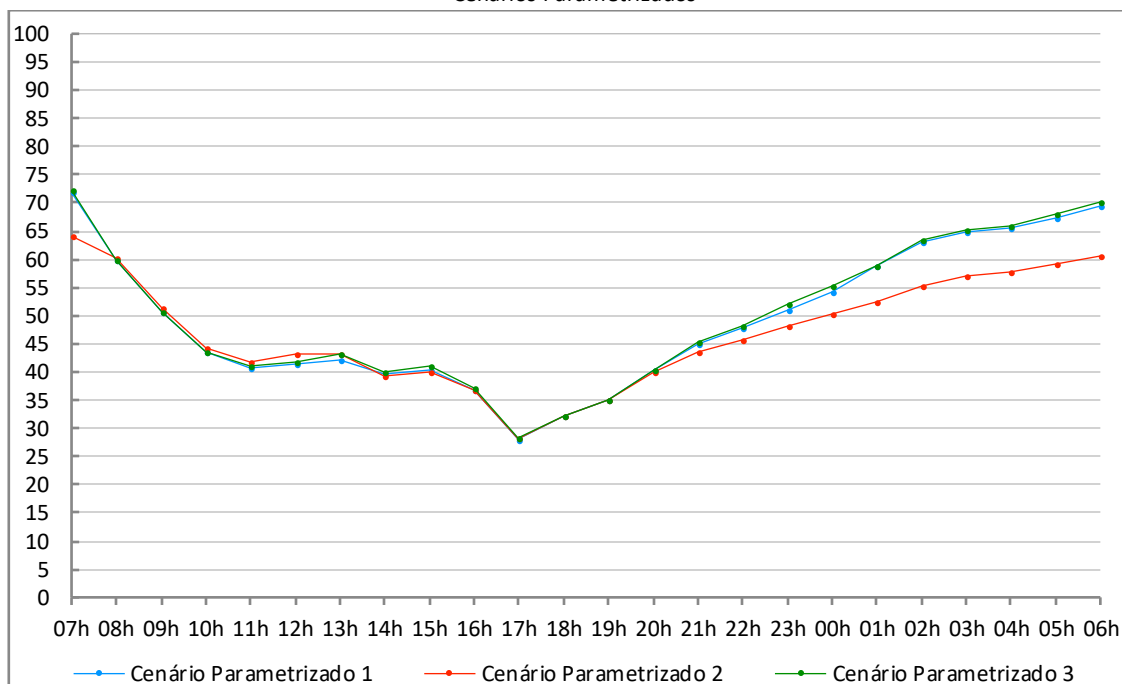
A Umidade Relativa (%) é uma medida que expressa a quantidade de vapor d'água presente no ar em relação à quantidade máxima que o ar poderia conter a uma determinada temperatura; ou seja, trata-se de uma porcentagem que indica o quão próximo o ar está de estar completamente saturado.

Foram elaborados mapas de variação da umidade relativa hora a hora para os três cenários parametrizados, por meio de simulações computacionais realizadas com a extensão Leonardo. Esses mapas fornecem dados detalhados na camada de 0,9 m acima do solo ($k=1$), permitindo uma análise precisa das variações de umidade ao longo do dia. Um total de 24 mapas foi produzido para cada cenário proposto.

5.1.1 Análise da Umidade Relativa

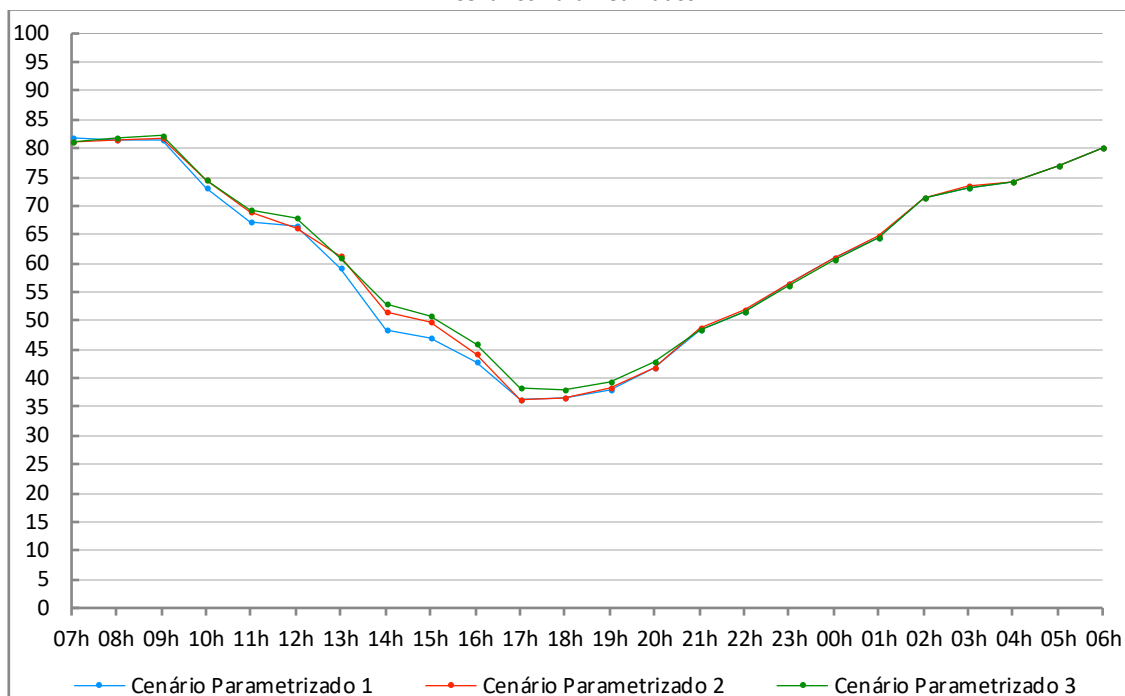
A partir das simulações realizadas, foi possível observar as variações na Umidade Relativa do Ar ao longo de um ciclo completo de 24 horas, considerando os três Cenários Parametrizados previamente definidos. Os resultados obtidos permitem comparar o comportamento microclimático da área estudada em diferentes configurações de uso do solo e cobertura, com destaque para os efeitos da vegetação e da presença edificada sobre a retenção e modulação da umidade do ar. A seguir, são apresentados os dados consolidados de Umidade Relativa Mínima e Máxima ao longo do dia:

Quadro 5 - Variação dos Valores Mínimos de Umidade Relativa do Ar (%) durante o período simulado para os 3 Cenários Parametrizados



Fonte: A autora

Quadro 6 - Variação dos Valores Máximos de Umidade Relativa do Ar (%) durante o período simulado para os 3 Cenários Parametrizados



Fonte: A autora

A análise da Umidade Relativa do Ar nos três Cenários Parametrizados revela comportamentos distintos ao longo das horas simuladas, especialmente em relação aos valores mínimos e máximos registrados.

De maneira geral, os valores máximos mostram-se bastante semelhantes entre os três cenários, com uma leve variação entre 11h e 18h. Nesse intervalo, o Cenário Parametrizado 1 apresenta os menores índices, seguido pelo Cenário 2, enquanto o Cenário 3 (com parque verde) registra os valores mais elevados. Essa diferença, ainda que sutil, indica a influência positiva da vegetação na manutenção de níveis ligeiramente mais altos de umidade durante as horas mais quentes do dia.

Durante o período noturno, os efeitos das transformações no uso do solo tornam-se mais evidentes, principalmente no Cenário Parametrizado 2. A partir das 20h, observa-se uma queda mais acentuada na umidade relativa nesse cenário, chegando a uma diferença de aproximadamente 10% em relação aos outros dois. Essa redução pode estar relacionada às características térmicas das superfícies construídas, que absorvem calor durante o dia e o liberam lentamente à noite. Esse comportamento retarda o resfriamento do ambiente e dificulta a condensação da umidade nas camadas mais próximas ao solo, o que contribui para a manutenção de níveis mais baixos de umidade relativa durante o período noturno.






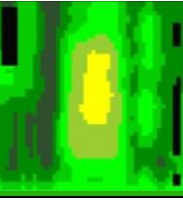
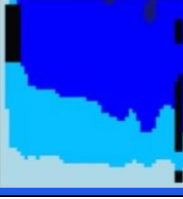

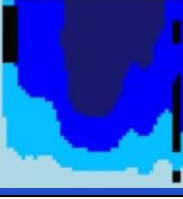



Os Cenários 1 e 3 — situação atual e parque verde, respectivamente — apresentam comportamentos bastante próximos tanto durante o dia quanto ao longo da noite, nos valores mínimos e máximos analisados. Isso sugere que a presença da edificação no Cenário 2 altera de forma significativa o comportamento da umidade relativa em relação à condição atual. A volumetria da construção simulada, associada à impermeabilização do solo e à ausência de



vegetação, parece interferir diretamente nos fluxos e na retenção de umidade do ar, sobretudo no período noturno, agravando as condições de seca e desconforto ambiental.

Com base nos padrões observados nos gráficos, foram selecionados seis horários estratégicos para uma análise comparativa mais detalhada entre os três cenários simulados. Os horários de 07h, 14h, 17h, 22h, 01h e 06h representam momentos importantes do ciclo diário: início da manhã, momento de alta radiação solar, final da tarde, início da noite e períodos de estabilização térmica durante a madrugada. A escolha desses intervalos permite observar mais detalhadamente os efeitos das diferentes configurações urbanas sobre o microclima local.

A tabela a seguir mostra a comparação entre os 3 Cenários nos 6 horários selecionados:

Quadro 7 - Comparativo de "Relative Humidity" entre os Cenários Parametrizados 1, 2 e 3, nos horários de 07h, 14h, 17h, 22h, 01h e 06h do dia 18 de abril 2022

		Cenário Parametrizado 1	Cenário Parametrizado 2	Cenário Parametrizado 3
07h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	71.84	64.10 (-7.74)	72.23 (+0.39)
	Umidade máxima (%)	81.02	81.05 (+0.03)	81.01 (-0.01)
14h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	39.56	39.24 (-0.32)	40.09 (+0.53)
	Umidade máxima (%)	48.55	51.52 (+2.97)	53.03 (+4.48)
17h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	28.09	28.15 (+0.06)	28.29 (+0.20)
	Umidade máxima (%)	36.31	36.26 (-0.05)	38.45 (+2.14)
22h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	47.62	45.63 (-1.99)	48.18 (+0.56)
	Umidade máxima (%)	51.46	51.79 (+0.33)	51.50 (+0.04)

01h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	58.70	52.49 (-6.21)	58.79 (+0.09)
	Umidade máxima (%)	64.44	64.67 (+0.23)	64.57 (+0.13)
06h	Mapa			
	Umidade mínima (%)	69.62	60.71 (-8.91)	70.31 (+0.69)
	Umidade máxima (%)	80.24	80.16 (-0.08)	80.24 (0.00)

Fonte: Imagem elaborada pela autora a partir dos mapas obtidos pela extensão *Leonardo* do programa ENVI-met

A partir das simulações, é possível traçar um panorama contínuo da variação da umidade relativa do ar nos três cenários ao longo de 24 horas, revelando não apenas os momentos mais críticos, mas também o comportamento de cada configuração urbana.

Logo às 7h da manhã, já se nota que o Cenário 2 (com o edifício) sofre uma perda de umidade mínima de 7,74%, especialmente na face norte da edificação, enquanto o Cenário 3 (com parque verde) mantém valores muito próximos aos do Cenário 1 (situação atual). Isso mostra que, ainda nas primeiras horas, a construção intensifica o aquecimento local e favorece a desidratação do ar, ao passo que a vegetação ameniza essa tendência.

Conforme o sol se eleva, chega-se ao pico de insolação por volta das 14h. Nesse horário, o parque verde do Cenário 3 consegue um aumento de 4,48% na umidade máxima, comprovando sua capacidade de retenção de vapor mesmo sob forte radiação. Em contraste, o Cenário 2 evidencia nova queda na umidade mínima, reforçando o impacto negativo da edificação em períodos de pico térmico.

Já às 17h, momento de menor umidade geral, o Cenário 3 mantém seu desempenho superior, com +2,14% na umidade máxima em relação ao cenário atual, enquanto o Cenário 2 registra nova redução, evidenciando a importância da vegetação para retardar o ressecamento ao fim da tarde.

Quando a noite avança, às 22h, a recuperação noturna da umidade mostra-se mais eficiente onde há vegetação: o Cenário 3 tem +1,31% na umidade máxima, enquanto o Cenário 2 sofre uma queda de 1,99% na umidade mínima em comparação ao cenário atual. Isso indica que, mesmo após a liberação de calor pelas construções, o parque favorece uma retomada mais rápida da umidade.

Na madrugada (01h), o ar estabiliza termicamente, mas o contraste entre edificação e vegetação persiste: o Cenário 3 apresenta uma umidade mínima mais de 6% superior à do Cenário 2, demonstrando que a ausência de cobertura vegetal prejudica a retenção noturna de umidade.

Finalmente, às 6h, pouco antes do novo ciclo de aquecimento, o Cenário 2 exibe sua maior penalidade, com uma queda acumulada de 8,91% na umidade mínima, enquanto o parque verde (Cenário 3) mantém a umidade estável ou com leve aumento, reforçando o papel da arborização na conservação de um microclima mais úmido durante toda a madrugada.

Em conjunto, esses dados mostram que a edificação projetada reduz de modo consistente tanto as umidades mínimas quanto máximas, agravando as condições de conforto, enquanto o parque verde, embora não altere drasticamente os níveis em relação à situação atual, exerce um efeito de moderação do ressecamento nos horários críticos e favorece a recuperação noturna da umidade. Essa síntese evidencia como diferentes estratégias de ocupação do solo influenciam o microclima urbano e sugere a necessidade de integrar vegetação com outras práticas, como superfícies permeáveis e sombreamento estratégico, para potencializar a regulação da umidade ao longo de todo o dia.

6 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo investigar a influência das áreas verdes urbanas sobre a Umidade Relativa do Ar em uma área da cidade de Niterói, RJ, utilizando simulações microclimáticas no software ENVI-met. A hipótese inicial sugeria que a presença de vegetação urbana, associada ao solo permeável, resultaria em um aumento significativo na umidade relativa do ar, especialmente nos períodos de maior aquecimento solar.

Os resultados das simulações mostraram que o Cenário Parametrizado 1 (situação atual) e o Cenário Parametrizado 3 (com a implementação do parque verde) apresentaram comportamentos muito semelhantes ao longo do dia, com pequenas variações em alguns momentos, especialmente no período da tarde, quando o Cenário 3 teve um ligeiro aumento nos valores de umidade relativa. No entanto, as diferenças entre os cenários não foram tão expressivas, o que sugere que, embora a presença de vegetação traga benefícios, seus efeitos sobre a umidade não foram tão impactantes nesse estudo quanto esperado. Isso indica que a estratégia de uso das áreas verdes para regulação da umidade relativa do ar pode precisar ser melhor estudada, considerando outras variáveis que possam potencializar esse efeito, como o tipo de vegetação, densidade e a integração com outras práticas urbanas sustentáveis.

Por outro lado, as simulações também demonstraram os grandes impactos causados pela presença de edificações, conforme observado no Cenário Parametrizado 2. A inserção de um edifício no local simulado causou uma redução significativa na Umidade Relativa do Ar, o que reforça a importância de se considerar os impactos das construções e da impermeabilização do solo no microclima urbano.

Em resumo, os resultados deste estudo não confirmam plenamente a hipótese de que a implantação do parque verde geraria um aumento significativamente maior na umidade relativa do ar em comparação à situação atual. Por outro lado, ficaram evidentes os impactos negativos da edificação projetada, que reduziu de forma expressiva os níveis de umidade ao longo do dia e da noite.

Como potenciais estudos futuros, sugere-se uma investigação mais detalhada sobre as formas de emprego da vegetação nas cidades, a fim de melhorar sua capacidade de regulação da umidade. Além disso, seria interessante explorar estratégias combinadas de vegetação com outras intervenções urbanas para maximizar os resultados. Futuros estudos também podem incluir uma análise mais aprofundada de outros parâmetros de conforto microclimático e suas relações com o uso do solo, ampliando a compreensão sobre como as áreas verdes podem ser planejadas de maneira mais eficaz.

7 REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

BASU, Rupa; SAMET, Jonathan M. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence. **Epidemiologic reviews**, v. 24, n. 2, p. 190-202, 2002.

CHATZINIKOLAOU, E.; CHALKIAS, C.; DIMOPOULOU, E. Urban microclimate improvement using ENVI-MET climate model. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 42, p. 69-76, 2018.

CLIMATE-DATA. *Climate-Data: dados climáticos para cidades mundiais, 2023. Página inicial*. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/americas-do-sul/brasil/rio-de-janeiro/niteroi-1772#climate-graph>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ENVI-met GmbH. *ENVI-met: High-resolution 3D modeling for climate adaptation*. Essen, Alemanha: ENVI-met GmbH, 2023. Disponível em: <https://envi-met.com>. Acesso em: 17 jul. 2024.

DINIZ, Fernanda Rodrigues. **Ondas de calor e a mortalidade de idosos por doenças respiratórias e cardiovasculares nas capitais dos estados brasileiros: Uma análise no presente (1996-2016) e projeções para o futuro próximo (2030-2050) e futuro distante (2079-2099) em diferentes**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

GARCIA, Miguel Pocharski. Avaliação dos impactos das ondas de calor na saúde e produtividade dos trabalhadores rurais: município de Campo Bom-Rio Grande do Sul, Brasil. 2023.

HUTTNER, Sebastian; BRUSE, Michael; DOSTAL, Paul. Using ENVI-met to simulate the impact of global warming on the microclimate in central European cities. In: **5th Japanese-German Meeting on Urban Climatology**. Freiburg, Germany: Meteorological Institute, Albert-Ludwigs-University, 2008. p. 307-312.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Estatísticas do século XX*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2132983>. Acesso em: fev. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. *Informativo Meteorológico nº 15 – 18/04/2022*. Brasília, 18 abr. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/informativo-meteorol%C3%B3gico-n%C2%BA-15-18-04-2022>. Acesso em: 17 julho 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Genebra: IPCC, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM_final.pdf. Acesso em: 07 junho 2024.

LONDE, Patrícia Ribeiro; MENDES, Paulo Cezar. A influência das áreas verdes na qualidade de vida urbana. **Hygeia-Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde**, v. 10, n. 18, p. 264-272, 2014.

LIU, Zhixin et al. Heat mitigation benefits of urban green and blue infrastructures: A systematic review of modeling techniques, validation and scenario simulation in ENVI-met V4. **Building and Environment**, v. 200, p. 107939, 2021.

MENDONÇA, Francisco. Clima, tropicalidade e saúde: uma perspectiva a partir da intensificação do aquecimento global. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, 2005.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e clima urbano: um projeto e seus caminhos. **Clima urbano**, 2003.

OUYANG, Wanlu et al. Evaluating the thermal-radiative performance of ENVI-met model for green infrastructure typologies: Experience from a subtropical climate. **Building and Environment**, v. 207, p. 108427, 2022.

PERKINS-KIRKPATRICK, Sarah et al. Extreme terrestrial heat in 2023. **Nature Reviews Earth & Environment**, v. 5, n. 4, p. 244-246, 2024.

PNUD – PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO; IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA; FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. *Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil 2013: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) 2010*. Brasília: PNUD, 2013. Disponível em: <https://www.atlasbrasil.org.br/>. Acesso em: 15 ago. 2024.

TSOKA, Stella; TSICALOUDAKI, A.; THEODOSIOU, T. Analyzing the ENVI-met microclimate model's performance and assessing cool materials and urban vegetation applications—A review. **Sustainable cities and society**, v. 43, p. 55-76, 2018.

YADAV, Namita et al. Systematic exploration of heat wave impact on mortality and urban heat island: A review from 2000 to 2022. **Urban Climate**, v. 51, p. 101622, 2023.

DECLARAÇÕES

CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Steffany Martins dos Santos.
- **Curadoria de Dados:** Steffany Martins dos Santos.
- **Análise Formal:** Steffany Martins dos Santos.
- **Aquisição de Financiamento:** Louise Land Bittencourt Lomardo.
- **Investigação:** Steffany Martins dos Santos.
- **Metodologia:** Steffany Martins dos Santos.
- **Redação - Rascunho Inicial:** Steffany Martins dos Santos e Gabriel Souza Freitas.
- **Redação - Revisão Crítica:** Steffany Martins dos Santos e Gabriel Souza Freitas.
- **Revisão e Edição Final:** Steffany Martins dos Santos e Gabriel Souza Freitas.
- **Supervisão:** Louise Land Bittencourt Lomardo.

DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, Steffany Martins dos Santos, Gabriel Souza Freitas e Louise Land Bittencourt Lomardo, declaro(amos) que o manuscrito intitulado "**A influência do design urbano nos níveis da Umidade Relativa do Ar: um estudo de simulação microclimática em Niterói, RJ**":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho. Nenhuma instituição ou entidade financiadora esteve envolvida no desenvolvimento deste estudo.
 2. **Relações Profissionais:** Não possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados. Nenhuma relação profissional relevante ao conteúdo deste manuscrito foi estabelecida.
 3. **Conflitos Pessoais:** Não possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito. Nenhum conflito pessoal relacionado ao conteúdo foi identificado
-