



Análise dos impactos no conforto térmico a partir de simulações computacionais relacionadas às modificações na cobertura do solo: Vila dos Atletas, Rio 2016

Lucivaldo Dias Bastos e Patricia Regina Chaves Drach

Lucivaldo DIAS BASTOS

Universidade Federal do Rio de Janeiro; Faculdade de Arquitetura;
Programa de Pós-graduação em Urbanismo;
ldiasbastos@gmail.com

Patricia Regina Chaves DRACH

Universidade Federal do Rio de Janeiro; Faculdade de Arquitetura;
Programa de Pós-graduação em Urbanismo;
patricia.drach@gmail.com

DIAS BASTOS, Lucivaldo; DRACH, Patricia Regina Chaves. Análise dos impactos no conforto térmico a partir de simulações computacionais relacionadas às modificações na cobertura do solo: Vila dos Atletas, Rio 2016. *Thesis*, Rio de Janeiro, v. 9, n. 20, e 566, nov. 2025

data de submissão: 20/04/2025

data de aceite: 14/10/2025

DOI: 10.51924/revthesis.2025.v10.566

Contribuição de autoria: Concepção; Curadoria de dados; Análise; Coleta de dados; Metodologia; Validação; Visualização; Redação - revisão e edição: DIAS BASTOS, L; DRACH, P. R. C. Redação – rascunho original: DIAS BASTOS, L.

Conflitos de interesse: Os autores certificam que não há conflito de interesse.

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES)

Uso de I.A.: Os autores certificam que não houve uso de inteligência artificial na elaboração do texto.

Editores responsáveis: Ana Claudia Cardoso e Isis Pitanga

Resumo

A intensa urbanização, caracterizada pelo aumento de superfícies impermeáveis e pelo uso de materiais de construção com alta capacidade de absorção e retenção de calor, tem alterado o equilíbrio natural de energia e radiação na superfície terrestre, contribuindo para o aquecimento das cidades. Este estudo investigou as alterações microclimáticas associadas à implantação da Vila Olímpica e Paralímpica Rio 2016, com o objetivo principal de avaliar os impactos da modificação da cobertura do solo sobre o microclima urbano local. A análise foi realizada por meio de simulações computacionais utilizando o software ENVI-met 3.1, abrangendo análises quantitativas, qualitativas e simulações em três diferentes recortes temporais. Os resultados mostraram que a Zona de Vegetação Remanescente apresentou, de forma consistente, as temperaturas mais baixas nos três momentos analisados. O Momento 2 concentrou os maiores picos térmicos, especialmente em áreas com elevada impermeabilização. Já no Momento 3, a introdução de arborização contribuiu para uma redução generalizada das temperaturas, evidenciando a efetividade das estratégias baseadas em vegetação na mitigação das ilhas de calor urbanas.

Palavras-chave: Microclima, Simulação Computacional, ENVI-met

Abstract

Intense urbanization, characterized by the increase in impervious surfaces and the use of construction materials with high heat absorption and retention capacity, has altered the natural balance of energy and radiation at the Earth's surface, contributing to urban warming. This study investigated microclimatic changes associated with the development of the Rio 2016 Olympic and Paralympic Village, with the main objective of assessing the impacts of land cover modification on the local urban microclimate. The analysis was conducted through computational simulations using ENVI-met 3.1 software, including quantitative and qualitative analyses across three different time periods. The results showed that the Remnant Vegetation Zone consistently presented the lowest temperatures across all three analyzed moments. Moment 2 recorded the highest thermal peaks, especially in areas with high levels of impervious surfaces. In contrast, in Moment 3, the introduction of vegetation contributed to a general reduction in temperatures, highlighting the effectiveness of vegetation-based strategies in mitigating urban heat islands.

Keywords: Microclimate, Computational Simulation, ENVI-met

Resumen

La urbanización intensiva, caracterizada por el aumento de superficies impermeables y el uso de materiales de construcción con alta capacidad de absorción y retención de calor, ha alterado el equilibrio natural de energía y radiación en la superficie terrestre, contribuyendo al calentamiento de las ciudades. Este estudio investigó los cambios microclimáticos asociados a la implantación de la Villa Olímpica y Paralímpica Río 2016, con el objetivo principal de evaluar los impactos de la modificación de la cobertura del suelo sobre el microclima urbano local. El análisis se llevó a cabo mediante simulaciones computacionales con el software ENVI-met 3.1, abarcando análisis cuantitativos, cualitativos y simulaciones en tres períodos distintos. Los resultados mostraron que la Zona de Vegetación Remanente presentó, de manera consistente, las temperaturas más bajas en los tres momentos analizados. El Momento 2 concentró los picos térmicos más altos,

especialmente en zonas con alta impermeabilización. En cambio, en el Momento 3, la introducción de vegetación contribuyó a una reducción generalizada de las temperaturas, evidenciando la efectividad de las estrategias basadas en vegetación para mitigar las islas de calor urbanas.

Palabras-clave: Microclima, Simulación Computacional, ENVI-met

Introdução

O acelerado processo de urbanização tem provocado alterações significativas na atmosfera urbana, resultando em impactos como poluição do ar, formação de ilhas de calor e mudanças nos padrões de precipitação. Esses fenômenos acarretam consequências relevantes, como o aumento da geração de calor, inversões térmicas, modificações nos padrões de ventilação e umidade relativa, desconforto térmico e elevação do consumo energético, comprometendo o equilíbrio térmico em escalas locais e regionais. Projeções apontam que, até 2040, mais de dois bilhões de pessoas poderão enfrentar um aumento adicional de pelo menos 0,5°C na temperatura, em decorrência das mudanças climáticas e da urbanização desordenada (ONU HABITAT, 2024).

Nos últimos dois séculos, o crescimento populacional e urbano desencadeou graves problemas ambientais, incluindo a alteração do clima local como consequência direta da ação antrópica sobre o meio. Jatobá (2014) destaca que a concentração de pessoas e atividades produtivas em áreas urbanas restritas gera impactos ambientais que extrapolam seus limites físicos. A urbanização intensiva, marcada pelo aumento das superfícies impermeáveis e pela utilização de materiais que retêm calor, modifica o balanço energético e radiativo da superfície terrestre, tornando as cidades mais quentes. Esse cenário favorece a intensificação das ilhas de calor e agrava os efeitos das mudanças climáticas, sobretudo em áreas metropolitanas. Como alertam Lombardo e Fruehauf (2021), é fundamental que o planejamento urbano incorpore estratégias de mitigação desses impactos, promovendo a sustentabilidade e a resiliência das cidades frente às transformações climáticas em curso.

No contexto brasileiro, o acelerado crescimento urbano a partir da segunda metade do século XX resultou em uma ocupação desordenada, marcada pela ausência de planejamento territorial adequado. Tal expansão implicou no aumento da malha urbana, verticalização, uso intensivo do solo nas áreas centrais, impermeabi-

lização excessiva e substituição de áreas verdes por edificações que frequentemente desconsideram as características do sítio físico. Rodrigues, Lima Júnior e Medeiros (2015) enfatizam que o clima urbano está diretamente relacionado a diversos fatores naturais — como relevo, solo e recursos hídricos —, e que alterações nessas dinâmicas geram modificações significativas no espaço urbano, produzindo um clima local distinto daquele das áreas menos urbanizadas.

A discussão sobre a importância do estudo do clima nas cidades, como instrumento de apoio ao planejamento urbano e ambiental, iniciou-se no século XX, especialmente nas metrópoles de São Paulo e Rio de Janeiro (SILVA et al., 2024), e tem ganhado força nos dias atuais diante da contínua expansão urbana e de seus impactos sobre a qualidade de vida (OLIVEIRA et al., 2021). O campo da climatologia urbana busca compreender o comportamento climático nas cidades, partindo da escala local e estendendo-se às esferas regionais e globais, destacando a crescente influência dos centros urbanos sobre essas escalas (COLTRI, 2006; NASCIMENTO; BARROS, 2009). A relação entre clima urbano, conforto térmico e sustentabilidade tem se consolidado como uma área estratégica para o desenvolvimento de cidades mais adaptadas e habitáveis em diferentes contextos climáticos (ÉGERHÁZI; KOVÁCS; UNGER, 2013; RODRIGUES et al., 2023).

Diversos estudos têm investigado o papel dos microclimas intra urbanos no planejamento urbano, reconhecendo a necessidade de métodos ajustados às especificidades locais (FARIA; MENDES, 2004). Gomes e Lamberts (2009) apontam que, para compreender a dinâmica do clima urbano e sua relação com a forma urbana, foram desenvolvidos modelos empíricos, escalares e numéricos. Investigações como as de Assis (2005), Duarte (2002), Roriz e Barbugli (2003) e Barbosa et al. (2019) correlacionam as variáveis urbanas (densidade, vegetação, tipo de solo) com a temperatura do ar e a umidade relativa, evidenciando como a morfologia urbana interfere nas condições microclimáticas locais. Os resultados desses estudos reforçam a necessidade de considerar a interação entre urbanização, clima e conforto térmico como base para políticas de desenvolvimento urbano sustentável.

Neste contexto, o estudo analisou as transformações microclimáticas em um trecho da Barra da Tijuca, no Rio de Janeiro, onde foi implantada a Vila Olímpica e Paralímpica dos Jogos Rio 2016. O objetivo geral consistiu em avaliar os impactos da modificação da cobertura do solo sobre o microclima urbano, com

ênfase no conforto térmico, por meio de simulações computacionais realizadas com o software ENVI-met. Entre os objetivos específicos, destacam-se: a modelagem e comparação de cenários urbanos (pré-ocupação, pós-implantação e projeção futura), considerando diferentes configurações de uso e cobertura do solo; a análise da interação de elementos urbanos (vegetação, materiais de cobertura, tipologia edificada e espaços livres) com as variáveis microclimáticas, especialmente temperatura, umidade e ventilação; a investigação do papel da arborização na mitigação de ilhas de calor urbanas; e a avaliação do potencial do ENVI-met como ferramenta de apoio ao diagnóstico ambiental e ao planejamento urbano sustentável. Para o estudo foram elaborados cenários com variações da superfície urbana que foram simulados e analisados.

A Simulação Computacional e o Envi-Met 3.1

A escolha pela simulação computacional nesta pesquisa se deve à sua capacidade de explorar diferentes cenários urbanos, considerando variações nas edificações, vegetação e materiais de solo. Além de permitir análises comparativas, essa abordagem possibilita diagnosticar e propor melhorias nas condições de conforto em diferentes escalas. A modelagem do desempenho ambiental é essencial para avaliar a sustentabilidade do ambiente construído, já que um bom desempenho contribui para a redução do consumo energético necessário à manutenção do conforto térmico (PENG; ELWAN, 2012; DRACH et al, 2018; HAMADA; DRACH, 2022; MARQUES; DRACH, 2024).

Os estudos sobre conforto térmico, tanto em ambientes internos quanto externos, vêm sendo desenvolvidos com o suporte da simulação computacional. Diversos softwares têm se destacado nesse campo, entre eles: Ecotect, Design Builder, Transit, Solweig, RayMan (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2010) e ENVI-met (BRÜSE, 1998). No desenho urbano, o ENVI-met é amplamente utilizado por sua capacidade de integrar e analisar quatro variáveis climáticas essenciais ao conforto térmico: temperatura do ar, temperatura média radiante (T_{mrt}), velocidade do vento e umidade relativa. Desenvolvido por Michael Bruse e sua equipe na Universidade de Bochum (1998), o software foi um dos primeiros a simular processos atmosféricos que influenciam o microclima, com base nas leis da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica. É um modelo tridimensional voltado à simulação de variáveis climáticas em áreas urbanas, integrando interações entre superfície, vegetação e atmosfera. Ele calcula o ba-

lanço de energia considerando fatores como radiação, sombreamento, fluxo de ar, temperatura, umidade, turbulência e trocas de calor e água no solo. Baseado nas leis da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica, destaca-se como uma ferramenta avançada de simulação urbana. Nesta pesquisa, foi utilizada a versão 3.1 por sua eficácia em análises comparativas e por ser uma ferramenta consolidada e de acesso gratuito.

Procedimento Metodológico

Localização da área do recorte de estudo

A área de estudo está situada no bairro da Barra da Tijuca (Figura 1a), na Zona Oeste do município do Rio de Janeiro. Planejado no final da década de 1960, o bairro passou, em pouco mais de 40 anos, de uma região com baixa densidade populacional para um dos principais vetores da expansão urbana da cidade. A Figura 1b delimita os contornos da Barra da Tijuca e destaca, em laranja, a área onde foi implantada a Vila dos Atletas para os Jogos Olímpicos e Paralímpicos Rio 2016, denominada Ilha Pura.

A região do estudo, por muitos anos, teve seu processo de ocupação lento. A Figura 2 apresenta o processo de modificação da área nos anos de 2006, 2011, 2012 e 2016 respectivamente. No ano de 2012 (Figura 2c) iniciou-se a construção do projeto das residências que

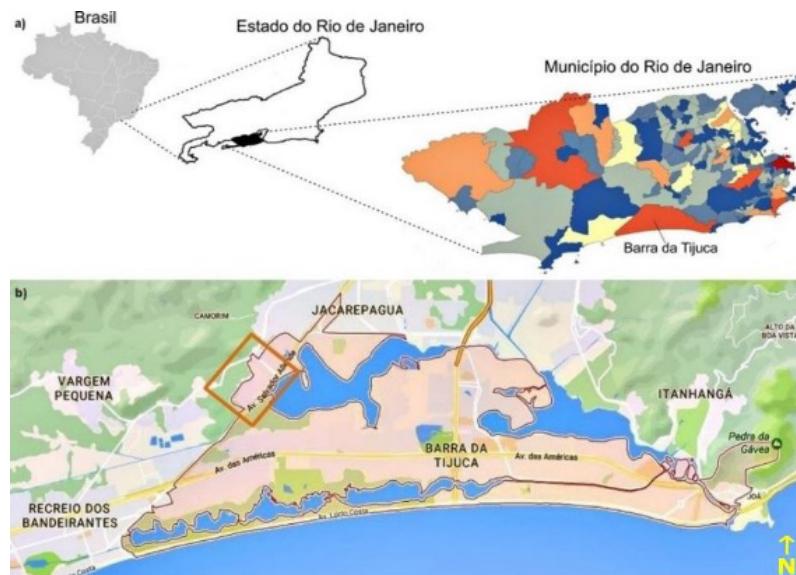


Figura 1
Localização da área do recorte de estudo: a) Localização do bairro Barra da Tijuca, b) Localização (em laranja) da área de construção da Vila dos Atletas. Fonte: Elaboração própria



Figura 2
Estágios de modificação: a) 2006, b) 2011, c) 2012, d) 2016, e) vista aérea da Vila dos atletas em 2016. Fonte: Google Earth (a, b, c, d) e Ricardo Sete Câmara (e) – adaptada

iriam abrigar os atletas e técnicos durante os Jogos Olímpicos e Paralímpicos Rio 2016. A Figura 2e apresenta uma imagem da Vila em 2016, ano dos jogos.

Observando a Figura 2 é possível perceber a intensa transformação que essa região sofreu em um intervalo de tempo relativamente pequeno, considerando o volume construído.

A Vila dos Jogos Olímpicos e Paralímpicos Rio 2016 foi projetada para abrigar 17.950 atletas e equipes técnicas. Ela possui 31 edifícios de 17 pavimentos cada, distribuídos em sete condomínios independentes totalizando 3.604,00 apartamentos de 2, 3 e 4 quartos. Conta ainda com um parque de 72 mil m² de área verde, 1,1 km de ciclovia e 5.500m² de espelho d'água.

De acordo com os seus idealizadores, a Vila dos Atletas nasceu como um bairro planejado e sustentável, e por suas iniciativas sustentáveis, recebeu 3 certificações em sustentabilidade. Em 2014 recebeu a

certificação Aqua-HQE Bairros e Loteamentos, e com isso tornou-se o primeiro bairro no Rio de Janeiro certificado. Para receber essa certificação, o projeto foi avaliado em relação ao cumprimento de 17 objetivos de desempenho ambiental divididos em três temas: integração e coerência do bairro; recursos naturais, qualidade ambiental e sanitária do bairro; vida social e dinâmicas econômicas. Ainda em 2014, o projeto recebeu o Selo Casa Azul, que classifica projetos habitacionais que seguem requisitos de sustentabilidade. A categoria concedida ao projeto foi o Selo Ouro, por seguir 53 requisitos obrigatórios nas categorias: qualidade urbana, projeto e conforto, eficiência energética, conservação de recursos materiais, gestão da água e práticas sociais. Para completar, no mesmo ano, recebeu o selo LEED ND - LEED for Neighborhood Development (LEED para Desenvolvimento de Bairros) - concedido pelo Green Building Council, tornando-se assim o primeiro bairro planejado da América Latina a receber a mais importante certificação em sustentabilidade do mundo.

O projeto adotou diversas medidas sustentáveis, como a redução de emissões de gases de efeito estufa durante a obra, uso de madeira nativa certificada, reutilização e reciclagem de resíduos e reuso da água por meio de uma estação de tratamento para chuveiros e lavatórios. Também houve redução no consumo de energia com o uso de lâmpadas LED, sensores de presença, painéis fotovoltaicos e elevadores com sistema regenerativo. No paisagismo do parque de 72 mil m², projetado pelo Escritório Burle Marx, foram utilizadas 163 espécies e mais de 35 mil mudas cultivadas localmente, minimizando impactos de transporte.

O recorte de estudo

Dadas as limitações de área que o programa ENVI-met 3.1 consegue simular foi necessário fazer um recorte menor da Vila dos Atletas para ser analisado. Este possui dimensões de 400x500m totalizando uma área de 200.000m². O fator determinante para a escolha do recorte considerou a maior diversidade de superfície, como por exemplo, edificações, vegetações diversas, espelhos d'água artificiais, vias e passeios; além de conter a zona verde próxima da lagoa e parte da lagoa. A Figura 3 apresenta o projeto da Vila dos Atletas para os jogos e também o recorte de estudo (cor vermelha). Para os jogos a vila foi setorizada em duas partes: a residencial (em preto) e uma área de apoio (em amarelo).



Figura 3
Limites (em vermelho) do trecho escolhido para o estudo
Fonte: Projeto Ilha Pura – adaptada

Caracterização do recorte

Para avaliar os efeitos causados pela modificação da cobertura do solo e os seus reflexos no microclima local foram realizadas análises microclimáticas antes e após a implantação do projeto. Para isso foram criados três cenários para uma melhor compreensão do ambiente estudado. Esses cenários foram chamados de Momento 01 - Cenário de Pré-ocupação, Momento 02 - Cenário Pós-implementação (sem vegetação adulta) e Momento 03 - Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta). A escolha do recorte aconteceu a partir do Momento 02 (cenário exatamente posterior à implantação do projeto – janeiro de 2017). A partir dessa delimitação retornou-se ao passado, mais especificamente julho de 2011, para registrar a área correspondente ao Momento 01. O recorte do Momento 01 - Cenário de Pré-ocupação foi reproduzido a partir de imagem obtida na base de imagens históricas do Google Earth. O Momento 03 - Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta) representa projeção de futuro onde a arborização proposta no projeto se encontraria adulta. A Figura 4 mostra o recorte nos três momentos.

O Momento 01 - Cenário de Pré-ocupação (Figura 4a) representa o recorte de estudo antes da implantação

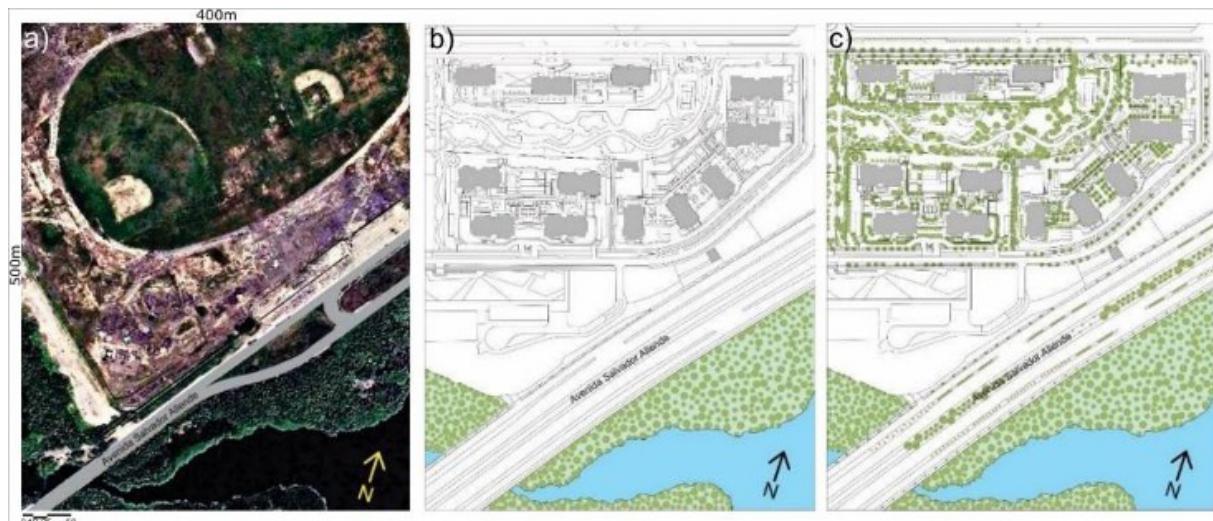


Figura 4
Recorte de estudo: a) Momento 01-julho de 2011, b) Momento 02-janeiro de 2017, c) Momento 03-projeção futura.
Fonte: Elaboração própria

do projeto e de toda a mudança ocorrida no local. O estudo realizado nesse momento teve por objetivo conhecer como a interação das variáveis: temperatura, umidade relativa e velocidade do vento atuavam nessa área antes do projeto ser implantado de forma a avaliar melhor os impactos através da comparação com o pós-implantação.

O Momento 02 - Cenário Pós-implementação (sem vegetação adulta) -Figura 4b - se define como o cenário pós-implantação do projeto, porém sem vegetação arbórea, somente gramínea. Os dados sobre cobertura do solo foram coletados após os Jogos Olímpicos Rio 2016 (janeiro de 2017). O objetivo do recorte pós-projeto implantado, porém não arborizado, foi para se ter conhecimento sobre o comportamento da nova cobertura do solo no conforto térmico do indivíduo.

O Momento 03 - Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta) - Figura 4c - cenário pós-implantação do projeto com projeção futura da arborização adulta. Para esse momento as árvores consideradas foram as do próprio projeto, levando em consideração apenas as dimensões das copas, pois não foi possível conhecer as espécies arbóreas. A proposta desse momento foi avaliar os reflexos da arborização no recorte. Saber se após alguns anos estas iriam conseguir melhorar os índices de conforto (redução de calor, aumento da umidade relativa, velocidade do vento, redução da radiação solar direta), principalmente nos trechos que possivelmente apresentassem maior produção de calor no Momento 02.

Análise descritiva e quantitativa

Foi efetuada uma análise acerca da cobertura do solo de forma a quantificar os elementos presentes (naturais e artificiais), tanto os retirados quanto os adicionados no recorte. O Cenário de Pré-ocupação (Figura 4a) mostra como estava o trecho estudado em 2011, um ano antes de se iniciar a construção da Vila dos Atletas. Era basicamente composto por uma grande área com solo exposto e vegetação rasteira de capim ou grama; uma área de natureza remanescente composta por árvores e lagoa cortadas pela Avenida Salvador Allende, e a própria avenida com seu canteiro central. A cobertura vegetal da grande área acima da Avenida Salvador Allende é recente, tendo em vista que em 2001 essa região foi a sede do Rock in Rio. Nesse momento a distribuição da cobertura do solo apresentou a seguinte distribuição dos elementos naturais e artificiais: solo exposto e vegetação rasteira 67%, vegetação remanescente e lagoa 26%, asfalto (Av. Salvador Allende) 4% e canteiro (vegetação rasteira) 3%. Importante destacar que nesse momento a cobertura artificial do solo era de apenas 4%, sendo estes relativos ao asfalto da Avenida Salvador Allende.

Para o Cenário Pós-implementação (sem vegetação adulta) - Figura 4b - foi realizado um zoneamento do recorte para facilitar a análise. A vegetação arbórea proposta pelo projeto foi desconsiderada nesta análise, tendo em vista que estava recém-plantada e não possuía tamanho suficiente para interferir no conforto do lugar. Espacialmente o recorte foi dividido em 3 Zonas e mais a Avenida Salvador Allende, como mostra a Figura 5.

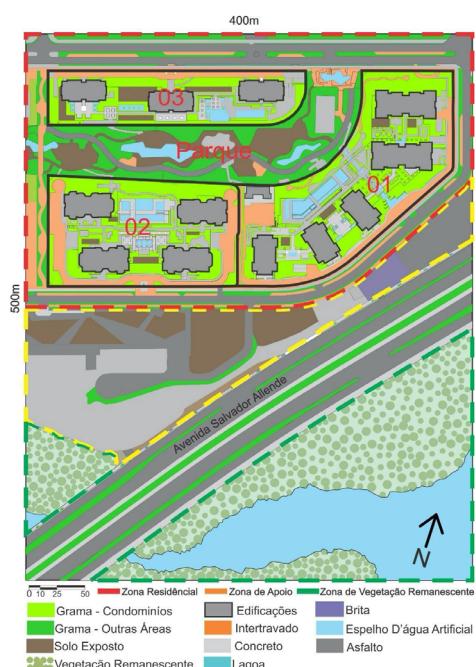


Figura 5. Recorte de estudo com zoneamento e cobertura do solo – Momento 02.
Fonte: Elaboração própria

A primeira área analisada é a Zona Residencial (Figura 5 – tracejado vermelho), com 92.286,88 m². Ela é composta por três condomínios (01, 02 e 03), totalizando 12 edifícios de 17 pavimentos cada, além de uma área comum (o parque) e das vias de acesso para pedestres, ciclistas e veículos. A cobertura do solo nessa zona inclui edificações, piso em concreto, piso intertravado, solo exposto, grama, espelho d’água artificial (piscina), e vias asfaltadas.

Localizada abaixo da Zona Residencial, encontra-se a Zona de Apoio (Figura 5 – tracejado amarelo), com 29.550,45 m², que foi utilizada como área de suporte durante as Olimpíadas. Sua cobertura de solo é composta por solo exposto, grama, concreto, brita e asfalto.

A terceira zona é a denominada Zona de Vegetação Remanescente (Figura 5 – tracejado verde), composta por um trecho de vegetação preservada às margens da lagoa e pela própria lagoa. Essa zona está dividida em duas partes: uma localizada de um lado da Avenida Salvador Allende e outra entre a Zona de Apoio e a avenida.

Além dessas três zonas, a própria Avenida Salvador Allende faz parte da área analisada. A cobertura do solo nessa região foi objeto de análise quantitativa, devido às transformações ocorridas que impactam diretamente no conforto térmico.

Como observado nas Figuras 4a e 4b, o Momento 02 apresenta mudanças significativas na cobertura do solo. Uma das transformações mais expressivas ocorreu na Avenida Salvador Allende, que foi ampliada com novas pistas para veículos, corredores de ônibus (BRT), ciclovias e calçadas. Essa ampliação também afetou a Zona de Vegetação Remanescente. A Tabela 1 apresenta, em ordem decrescente, os elementos que passaram a compor a cobertura do solo no Momento 02. A Figura 6 compara a cobertura do solo nos Momentos 01 e 02, classificando-a em Cobertura Natural e Cobertura Artificial. Após a implantação do projeto (Momento 02), houve um aumento de 47% na cobertura artificial, tornando-a predominante na área analisada.

Conhecer os elementos artificiais utilizados em um ambiente aberto permite avaliar previamente aspectos como emissão de calor e permeabilidade do solo. A Tabela 1 mostrou que o asfalto (21%) e o concreto (17%) são os principais elementos artificiais, somando 38% da cobertura, enquanto a grama é o elemento

Cobertura do solo por elementos	(M ²)	(%)
Asfalto	42.066,52	21%
Grama	35.221,20	18%
Concreto	34.647,60	17%
Vegetação remanescente (árvores)	28.085,55	14%
Lagoa	17.566,96	9%
Intertravado	13.914,38	7%
Solo exposto sem vegetação	13.202,35	7%
Edificações	10.564,45	5%
Espelho d'água artificial	3.626,85	1,5%
Brita	1.104,14	0,5%
Total	200.000,00	100%

Tabela 1

Elementos de cobertura do solo - Momento 02

Fonte: Elaboração própria

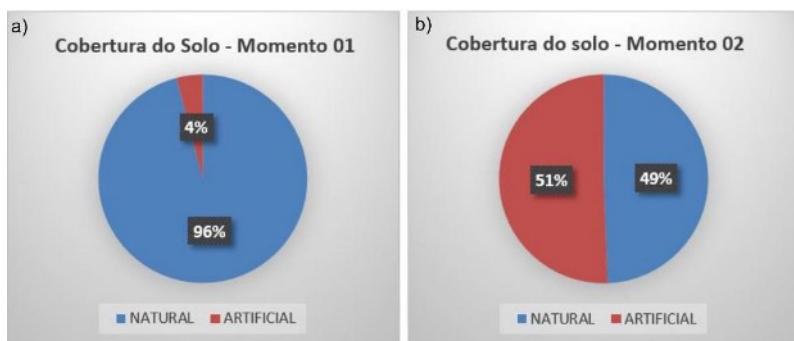


Figura 6

Cobertura de solo: a) Momento 01, b) Momento 02.

Fonte: Elaboração própria

natural predominante (18%). O aumento de asfalto e concreto está ligado às obras na Avenida Salvador Allende, como duplicação de vias e implantação de faixas para BRTs, ciclovias e calçadas. No Momento 01, esses materiais representavam apenas 4% da área, limitados ao asfalto. A permeabilidade do solo não foi analisada devido à localização subterrânea dos estacionamentos e à ausência de dados precisos, o que não comprometeu o estudo, pois a cobertura do solo é o fator mais relevante para o conforto ambiental urbano. O Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta) não foi analisado separadamente, por ser igual ao Momento 02, com a adição da vegetação adulta.

Simulações

As simulações foram realizadas no mesmo recorte para os três momentos (Cenário de Pré-ocupação, Cenário Pós-implementação (sem vegetação adulta) e Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta)). Os dados para as simulações foram agrupados em 3

categorias: elementos artificiais, elementos naturais, dados climáticos e meteorológicos. Tendo em vista as limitações do programa, foi necessário estabelecer correlações entre os elementos presentes no projeto (piso de concreto, piso intertravado, asfalto, edificações, solo exposto, grama, brita, árvores de copa pequena e média, árvores de copa grande, palmeira pequena e média, palmeira grande) com os que o software possui e, em alguns casos até agrupar mais de um elemento presente do projeto para que fosse possível adequar aos existentes no Envi-met. Isso foi mais presente com os elementos naturais. As árvores do projeto foram categorizadas pelas dimensões de suas copas de forma que se adequassem às categorias disponíveis no programa, porém isso não representa variação significativa nos resultados. Estas foram classificadas de acordo com Mascaró (2005 apud AGUIRRE JUNIOR; LIMA, 2007) em: pequeno porte (altura entre 4 - 6m e copa menor que 4m); médio porte (altura entre 6 - 10m e copa entre 4 - 6m) e grande porte (altura maior que 10m e copa maior que 6m).

Dados Climáticos

- Temperatura = 300,69K: Os dados para temperatura foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o mês de janeiro de 2017. O valor usado foi a média do mês e estes foram convertidos em Kelvin (parâmetro de temperatura usado no programa).
- Umidade relativa = 75,01%: A umidade relativa também foi trabalhada com o valor médio mensal do mesmo mês. Seus valores também foram obtidos no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para o mesmo mês e ano.
- Umidade Específica (g water/kg air) = 9,8: A umidade específica (g/kg) a 2000 m de altura também foi utilizada com o valor médio do mês e suas informações foram retiradas da Estação Meteorológica do Galeão (83746SBGL) cujos dados estão disponibilizados em University of Wyoming (www.weather.uwyo.edu).
- Velocidade do vento (m/s) = 3,0: Os dados sobre o vento também foram trabalhados como a média do vento dominante (direção sudeste = 135°) da cidade do Rio de Janeiro.
- O Dia = 16/01/2017: O dia-tipo foi definido com base nos valores médios das variáveis climáticas referentes ao mês de janeiro de 2017, sendo escolhido o dia 16 de janeiro, pois, dentre todos os dias, ele se destacou

por apresentar o maior valor de temperatura, por isso foi escolhido para nomear o dia-tipo. A necessidade de se definir um dia foi apenas para atender a uma exigência do programa que precisa de uma data, mas os valores utilizados na simulação foram valores médios do mês de janeiro de 2017.

- O tempo de simulação = 48h: O tempo de simulação foi definido considerando a necessidade de estabilização do modelo para obtenção de resultados mais precisos, especialmente nas últimas 24 horas. O início da simulação foi programado para 21h (horário local), correspondente à meia-noite em Greenwich (UTC+0), já que o Rio de Janeiro está na zona UTC-3.

- Registro de dados: Para o registro de dados foi estabelecido o intervalo de 60 minutos.

Resultados

Os resultados foram apresentados em uma mesma escala, permitindo a comparação direta entre as variáveis analisadas (temperatura do ar, umidade rela-

Horário: 09:00h

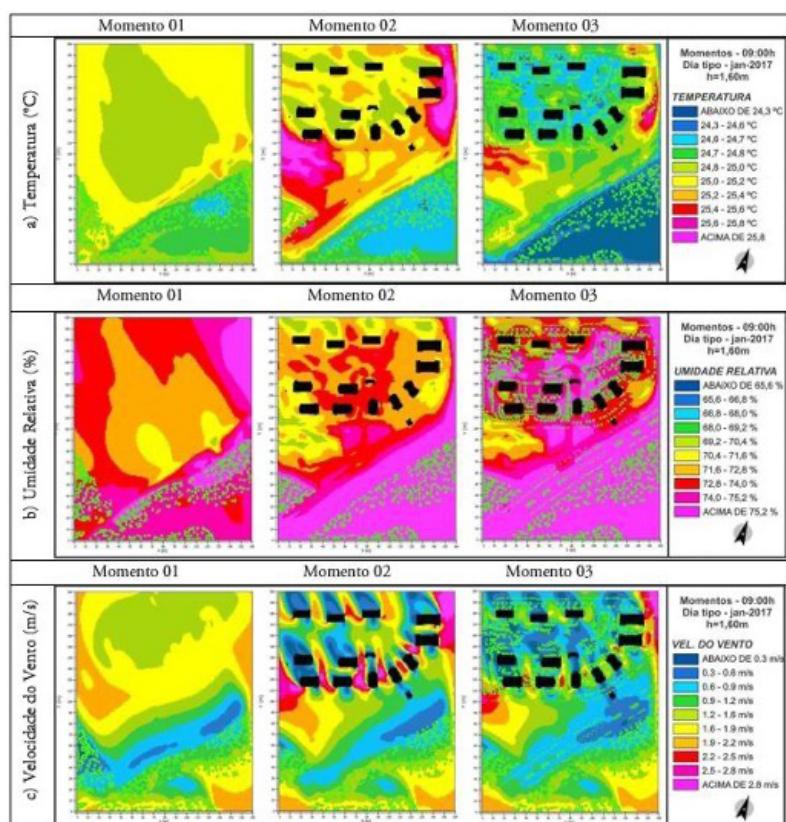


Figura 7. Resultados de 09:00h para os 03 momentos: a) Temperatura (°C), b) Umidade Relativa (%), c) Velocidade do Vento (m/s).
Fonte: Elaboração própria

Horário: 14:00h

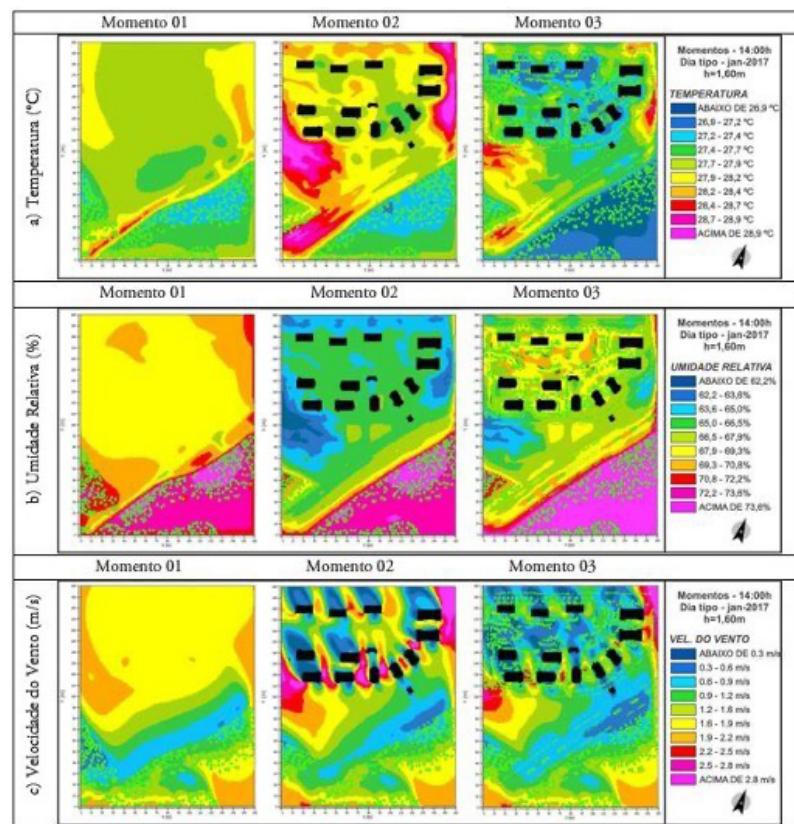


Figura 8. Resultados de 14:00h para os 03 momentos: a) Temperatura (°C), b) Umidade Relativa (%), c) Velocidade do Vento (m/s). Fonte: Elaboração própria

Horário: 21:00h

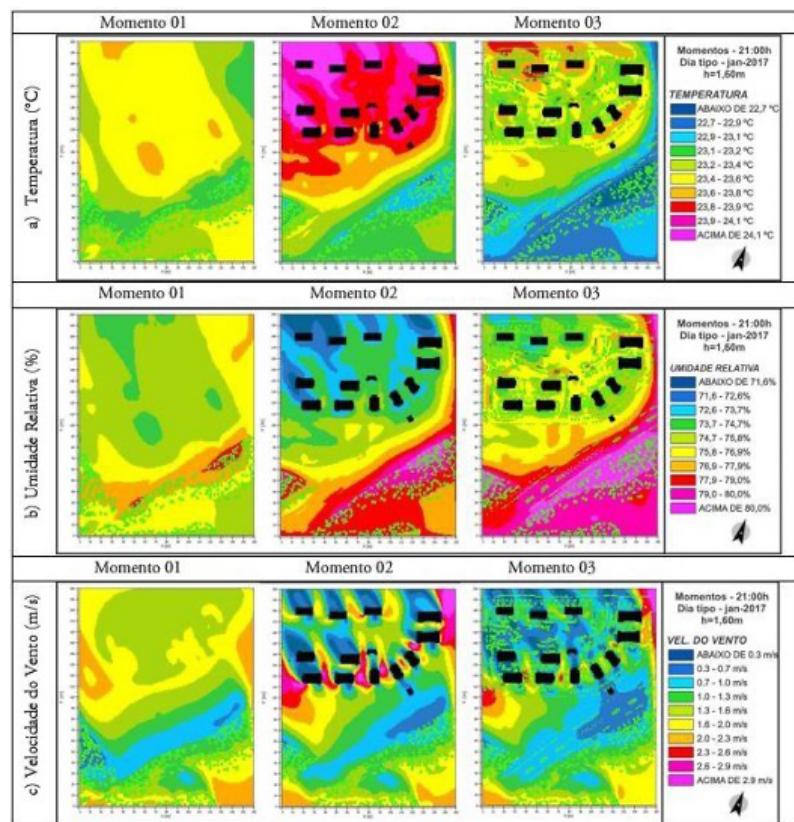


Figura 9. Resultados de 21:00h para os 03 momentos: a) Temperatura (°C), b) Umidade Relativa (%), c) Velocidade do Vento (m/s). Fonte: Elaboração própria

tiva e velocidade do vento) nos diferentes horários, o que evidencia as alterações geradas por cada cenário simulado. Para facilitar a compreensão, as temperaturas originalmente em Kelvin foram convertidas para graus Celsius. Todos os dados foram obtidos a uma altura de 1,6 metros para representar a percepção de conforto térmico de um indivíduo.

As Figuras 7, 8 e 9 apresentam os resultados dos três Momentos analisados, correspondendo, respectivamente, aos horários de 09:00, 14:00 e 21:00 horas.

A padronização das pranchas favoreceu a visualização equilibrada dos dados, facilitando o entendimento sequencial das análises e permitindo comparações entre cenários e horários, o que contribuiu para a clareza e fluidez na interpretação dos resultados.

Análise dos Resultados

A análise de cada variável foi realizada nos três horários estudados, com o objetivo de aprofundar a compreensão da dinâmica observada para os três momentos analisados.

Temperatura do Ar (°C) – 09:00h

Em todos os experimentos, as temperaturas mais baixas foram registradas na Zona de Vegetação Remanescente. No Momento 01 (Figura 7a – Momento 01), a variação térmica foi pequena, com os pontos mais quentes localizados na Av. Salvador Allende (1°C), onde predominava o asfalto. No Momento 02 (Figura 7 – Momento 02), houve maior variação térmica, com aumento de até $\Delta T=1,6^{\circ}\text{C}$ em áreas da Zona de Apoio e Zona Residencial, que possuem cobertura de asfalto e concreto. Apesar da duplicação da avenida e introdução de vias de BRT, ciclovias e calçadas, apenas o trecho próximo à Zona de Apoio apresentou temperaturas elevadas. As demais áreas foram resfriadas pela presença da Zona de Vegetação Remanescente, sombreamento e canteiros centrais com vegetação. No Condomínio 01, edifícios próximos às zonas de calor apresentaram aquecimento nas bordas, associado à insolação e ao tipo de solo (asfalto, concreto, piso intertravado). As imagens da Figura 7a (Momentos 01 e 02) indicam que a área analisada passou de uma escala predominantemente verde para tons amarelos com pontos em laranja, representando aumento da temperatura do ar. Os trechos em laranja, com elevação de até $\Delta T=1,2^{\circ}\text{C}$, correspondem a superfícies cobertas por asfalto e concreto. Já o caminho asfaltado que atravessa o parque não apresentou temperaturas

elevadas, possivelmente por estar cercado por vegetação (grama), solo exposto e espelhos d'água. As áreas com solo exposto também registraram temperaturas mais amenas, contribuindo para a contenção das manchas de calor, como observado tanto na Zona de Apoio quanto no Parque.

No Cenário de Projeção Futura com vegetação adulta (Figura 7a – Momento 03), com a introdução de arborização no projeto, houve redução da mancha de calor na Av. Salvador Allende, passando de $\Delta T=1,6^{\circ}\text{C}$ para $\Delta T=1^{\circ}\text{C}$. Regiões anteriormente mais quentes também apresentaram queda de temperatura. A Zona Residencial, por exemplo, teve redução de $25,2^{\circ}\text{C}$ para $24,7^{\circ}\text{C}$. A vegetação implantada contribuiu para a diminuição da radiação direta, criação de sombra e melhora geral do conforto térmico. Na Tabela 2 pode ser observada uma síntese comparativa de temperatura do ar por Zona/Área para os três Momentos, no horário de 9 horas.

Umidade Relativa (%) – 09:00h

No Momento 01 (Figura 7b – Momento 01), a umidade relativa variou entre 70,4% e 75,2%, com predominância de valores elevados (72,8% a 75,2%) e pou-

Região	Momento 01	Momento 02	Momento 03	Variação Observada
Zona de Vegetação Remanescente (ZVR)	Valores mais baixos de temperatura.	Valores mais baixos de temperatura.	Valores mais baixos de temperatura.	- Apresentou temperaturas mais homogêneas. - Permaneceu como área mais fresca em todos os momentos.
Av. Salvador Allende	Apresentou os trechos mais quentes entre todas as regiões.	Aumento de temperatura com picos em alguns pontos.	Redução de $0,6^{\circ}\text{C}$ no trecho mais quente.	- A maior presença de asfalto e concreto produziu regiões com temperaturas elevadas. - A arborização reduziu as áreas com temperaturas elevadas.
Zona de Apoio	-	Surgimento de áreas com aquecimento acentuado.	Redução significativa das maiores temperaturas.	- Aumento no Momento 02 - Redução no Momento 03
Zona residencial	-	Surgimento de áreas com aquecimento acentuado.	Redução de temperatura.	- A arborização provocou uma redução de temperatura.

Tabela 2

Comparação da Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) às 09:00h por Zona/Área – Três Momentos. Fonte: Elaboração própria

cos trechos com 71,6%. No Momento 02 (Figura 7b – Momento 02), após a implantação da Vila dos Atletas, as menores taxas de umidade coincidiram com as áreas de maior temperatura (Zona de Apoio e acesso ao Condomínio 01). A máxima de 75,2% foi registrada na Zona de Vegetação Remanescente e na Av. Salvador Allende, mesmo em trechos com altas temperaturas. A Zona Residencial manteve-se majoritariamente entre 72,8% e 75,2%, com algumas áreas pontuais em 71,6%, influenciadas pela presença de espelhos d'água. No Momento 03 (Figura 7b – Momento 03), a arborização elevou os índices de umidade, especialmente na Zona Residencial, cujos valores passaram de 72,8% (Momento 02) para 74,0% a 75,2%. A Zona de Apoio também apresentou aumento, com máximas atingindo áreas internas. Nenhuma região registrou umidade abaixo de 70,4%. A Zona de Vegetação Remanescente e a Av. Salvador Allende mantiveram os maiores índices (75,2%).

Velocidade do Vento (m/s) – (09:00h, 14:00h e 21:00h)

A direção predominante do vento adotada nas simulações foi de 135° (sudeste), conforme o Software Sol-Ar¹, sendo favorável ao projeto por atravessar uma área de vegetação remanescente, contribuindo para o resfriamento do ar. Como a direção e intensidade do vento inicial foram mantidas nos três Momentos e horários (09h, 14h e 21h), e o ENVI-met não altera essa direção durante a simulação, os resultados apresentam padrões semelhantes. Variações observadas estão associadas ao aquecimento do solo, que intensifica o movimento vertical do ar. A Figura 7c (referência para os três horários) resume esses resultados. No Momento 01, o vento chega com 2,2 m/s, reduzindo gradativamente na Zona de Vegetação Remanescente até atingir 0,6 m/s (aragem, segundo Beaufort), aumentando novamente após atravessá-la. No Momento 02, após cruzar a vegetação, o vento encontra as edificações, perdendo velocidade e mudando de direção. Nos corredores entre prédios, há aceleração, atingindo 2,8 m/s. O parque apresenta ventos moderados a fracos e formam-se zonas de sombra de vento atrás dos obstáculos. A maior velocidade ocorre nas extremidades da Zona Residencial. No Momento 03, a presença da nova vegetação reduziu a velocidade do vento entre os edifícios, passando de intensa para moderada e fraca (entre 1,2 m/s e 0,3 m/s).

¹ Sol-Ar Software: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações -- LabEEE, Departamento de Engenharia Civil (ECV) -- Universidade de Santa Catarina (UFSC). Pesquisa e desenvolvimento: Roberto Lamberts e Alexandra Albuquerque Maciel. Programação: Edson T. Ono.

Temperatura do Ar (°C) – 14:00h

No Momento 01 (Figura 8a – Momento 01), a Av. Salvador Allende apresentou um trecho com aumento de temperatura de $\Delta T=2,0^{\circ}\text{C}$, relacionado à maior largura da faixa de asfalto. Trechos com canteiros centrais não sofreram aquecimento significativo, indicando que essas áreas ajudaram a mitigar a radiação e o calor. No Momento 02 (Figura 8a – Momento 02), as zonas mais quentes (ΔT de até $2,0^{\circ}\text{C}$) incluíram um trecho da via de acesso ao Condomínio 01, parte da Zona de Apoio e da Avenida Salvador Allende. Apesar da concentração de calor na via, este não alcançou os edifícios, provavelmente devido à posição solar, vegetação rasteira e ação dos ventos. Entre três edifícios do Condomínio 01, surgiram áreas com menor temperatura ($27,7^{\circ}\text{C}$), atribuídas ao sombreamento, espelhos d’água e solo exposto. A Zona Residencial apresentou aumento moderado de temperatura, com os pontos mais quentes ($28,4^{\circ}\text{C}$; $\Delta T=1,5^{\circ}\text{C}$), localizados no parque (áreas de concreto e asfalto) e vias de circulação ao norte do recorte. No Momento 03 (Figura 8a – Momento 03), a arborização teve papel importante na redução do calor local. As zonas quentes identificadas anteriormente

Região	Momento 01	Momento 02	Momento 03	Variação Observada
Zona de Vegetação Remanescente (ZVR)	Valores mais baixos de temperatura..	Valores mais baixos de temperatura.	Valores mais baixos de temperatura.	- Apresentou temperaturas mais homogêneas. - Permaneceu como área mais fresca em todos os momentos.
Av. Salvador Allende	Apresentou os trechos mais quentes entre todas as regiões. $\Delta T = +2,0^{\circ}\text{C}$ em relação a ZVR.	Acréscimos de temperatura. $\Delta T = +2,0^{\circ}\text{C}$ em relação a ZRV.	Redução significativa dos trechos com temperaturas elevadas.	- A maior presença de asfalto e concreto produziu regiões com temperaturas elevadas. - A arborização reduziu as áreas com temperaturas elevadas.
Zona de Apoio	-	Acréscimos de temperatura. $\Delta T = +2,0^{\circ}\text{C}$ em relação a ZRV	Redução significativa dos trechos com temperaturas elevadas.	- Aumento no Momento 02. - Redução no Momento 03.
Zona Residencial	-	Elevação de temperatura com variação $\Delta T = +1,5^{\circ}\text{C}$ em relação a ZRV em alguns pontos.	Redução significativa de temperatura.	A arborização conseguiu amenizar os reflexos da radiação na produção de calor.

Tabela 3
Comparação da Temperatura do Ar (°C) às 14:00h por Zona/Área – Três Momentos. Fonte: Elaboração própria

te apresentaram redução significativa, inclusive na Av. Salvador Allende. No Parque, a intensidade de temperatura caiu três níveis: de $\Delta T=1,3^{\circ}\text{C}$ (amarelo) para $\Delta T=0,8^{\circ}\text{C}$ (verde escuro) e até $\Delta T=0,5^{\circ}\text{C}$ (azul claro). Áreas entre edifícios dos Condomínios 1 e 3 também apresentaram temperaturas próximas às da Zona de Vegetação Remanescente, resultado da combinação entre sombra dos edifícios, vegetação e presença de água. As vias superiores do recorte também foram beneficiadas pela arborização. A Tabela 3 apresenta uma síntese comparativa de temperatura do ar por Zona/Área para os três Momentos, no horário de 14 horas.

Umidade relativa (%) – 14:00h

Os valores de umidade relativa variaram entre 62,2% e 73,6% em todos os Momentos, com os máximos sempre registrados na Zona de Vegetação Remanescente. No Momento 01 (Figura 8b – Momento 01), os maiores índices ocorreram nessa zona, enquanto nas demais áreas a umidade variou entre 69,3% e 70,8%, sendo a faixa de 69,3% predominante. Canteiros da Av. Salvador Allende também apresentaram alta umidade (72,2%). No Momento 02 (Figura 8b – Momento 02), regiões com maior temperatura apresentaram as menores umidades (62,2%). A Av. Salvador Allende, embora com temperatura elevada, registrou 67,9%, provavelmente devido à proximidade da vegetação remanescente e à ação dos ventos. A umidade na Zona Residencial caiu de 69,3% (Momento 01) para 66,5%. No Parque, três pontos com materiais impermeáveis (concreto e asfalto) registraram os menores valores (65,0%). No Momento 03 (Figura 8b – Momento 03), a arborização do projeto elevou os níveis de umidade, especialmente na Zona Residencial. Enquanto no Momento 02 os valores (fora da Zona de Vegetação Remanescente) variavam entre 62,2% e 66,5%, agora se concentraram entre 67,9% e 70,8%, com exceções pontuais de 62,2% em áreas ainda expostas ao calor intenso. O Parque permaneceu com índices entre 69,3% e 70,8%.

Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) – 21:00h

Em todos os experimentos, as temperaturas mais baixas foram registradas na Zona de Vegetação Remanescente. A região da lagoa apresentou temperaturas consistentemente superiores, devido ao maior calor específico da água, que dissipava calor mais lentamente à noite. No Momento 01 (Figura 9a – Momento 01), a Av. Salvador Allende apresentou temperatura semelhante à da vegetação remanescente ($23,4^{\circ}\text{C}$), até inferior a áreas sem asfalto ($23,6^{\circ}\text{C}$). Isso se deve,

possivelmente, à rápida perda de calor e à presença de vegetação e vento, que resfriam a região. No Momento 02 (Figura 9a – Momento 02), a Zona Residencial concentrou as maiores temperaturas ($24,1^{\circ}\text{C}$), $\Delta T=1,2^{\circ}\text{C}$ acima da mínima ($23,0^{\circ}\text{C}$). Esse aquecimento está ligado à radiação absorvida durante o dia e à baixa ventilação noturna. A Av. Salvador Allende, mesmo com maior cobertura artificial, manteve temperatura próxima à da vegetação ($23,4^{\circ}\text{C}$), beneficiada pela ventilação e ausência de obstáculos. No Momento 03 (Figura 9a – Momento 03), a arborização reduziu significativamente a temperatura na Zona Residencial, que passou de $23,8\text{--}24,1^{\circ}\text{C}$ (Momento 02) para $23,1\text{--}23,6^{\circ}\text{C}$. As áreas mais quentes ($24,1^{\circ}\text{C}$) ficaram restritas a pequenos pontos e apresentaram valores menores do que no cenário anterior. A síntese comparativa de temperatura do ar por Zona/Área para os três Momentos, no horário de 21 horas, é apresentada na Tabela 4.

Umidade relativa (%) – 21:00h

Os maiores valores de umidade relativa foram observados na Zona de Vegetação Remanescente em todos os momentos. No Momento 01 (Figura 9b – Momento 01), os índices ficaram em níveis medianos, predominando entre 75,8% e 76,9%, sem atingir o valor

Região	Momento 01	Momento 02	Momento 03	Variação Observada
Zona de Vegetação Remanescente (ZVR)	Predominância de temperaturas mais baixas.	Predominância de temperaturas mais baixas.	Predominância de temperaturas mais baixas.	Estável (referência de mínima térmica).
Av. Salvador Allende	Mesma faixa de temperatura que a ZVR.	Temperaturas próximas aos da ZVR.	Temperaturas próximas aos da ZVR.	A arborização contribuiu para um resfriamento mais acentuado.
Zona de Apoio	-	Temperaturas moderadas. Resfriamento moderado.	Resfriamento mais acentuado. Eliminação dos picos de temperatura.	A arborização contribuiu para um resfriamento mais acentuado.
Zona Residencial	-	Maiores temperaturas. $\Delta T = +1,2^{\circ}\text{C}$ em relação a ZVR.	Redução de temperatura.	Redução de até 1°C com arborização

Tabela 4

Comparação da Temperatura do Ar ($^{\circ}\text{C}$) às 21:00h por Zona/Área – Três Momentos. Fonte: Elaboração própria

máximo da escala (80%). O pico (79,0%) ocorreu na Av. Salvador Allende, justamente onde foram registradas temperaturas mais baixas, atribuídas à presença de canteiros. Não houve registros de umidade mínima nesse horário. No Momento 02 (Figura 9b – Momento 02), a Zona Residencial, que apresentou as temperaturas mais altas, registrou os menores índices de umidade, chegando a 71,6% em alguns pontos, com média em torno de 74,7%. A Zona de Vegetação Remanescente manteve os maiores valores, enquanto a Av. Salvador Allende foi beneficiada pela umidade transportada pelos ventos vindos da área vegetada. No Momento 03 (Figura 9b – Momento 03), os valores máximos de umidade se expandiram sobre a Av. Salvador Allende e alcançaram as bordas da Zona de Apoio, coincidindo com as áreas de menor temperatura. A Zona de Apoio apresentou altos índices (76,9% a 77,9%). A Zona Residencial manteve níveis moderados (74,7% a 76,9%) e o Parque registrou índices superiores (74,7% a 76,9%) aos do interior dos condomínios (73,7% a 75,8%). A umidade máxima continuou predominante sobre a Zona de Vegetação Remanescente.

Discussões

Os resultados apresentados indicam que, embora a implantação da Vila dos Atletas tenha considerado parcialmente aspectos ambientais, como a orientação das edificações e a introdução de elementos paisagísticos, os efeitos sobre o microclima urbano foram limitados, sobretudo no Cenário Pós-implementação (sem vegetação adulta). Somente no Cenário de Projeção Futura (com vegetação adulta) observou-se uma mitigação mais eficaz das ilhas de calor e melhoria dos índices de conforto térmico.

Esse comportamento se alinha com experiências observadas em outras Vilas Olímpicas ao redor do mundo. A Vila Olímpica de Barcelona (1992), por exemplo, foi um marco na requalificação urbana, priorizando a integração com a frente marítima e introduzindo grandes áreas de vegetação, resultando em efeitos positivos sobre o microclima e a ventilação natural conforme apontado por González (1992). Por outro lado, a Vila de Atenas (2004), construída em uma região periférica e pouco conectada com o tecido urbano, enfrentou críticas pelo alto grau de impermeabilização e pela carência de estratégias climáticas passivas, o que contribuiu para a intensificação do desconforto térmico durante o verão mediterrâneo. ARAVOSSI (2014) aponta os impactos da degradação pós-evento devido à manutenção insuficiente.

No caso de Pequim (2008), a Vila Olímpica foi planejada com foco em tecnologias verdes e eficiência energética, marcadas por Zhou et al. (2008), incluindo telhados verdes, pavimentos permeáveis e reaproveitamento de água, o que trouxe ganhos relevantes tanto em conforto térmico quanto em sustentabilidade urbana. No entanto, conforme destacam Zhou et al. (2008) a escala do empreendimento e a densidade edificada ainda apresentaram desafios em termos de ventilação e retenção de calor noturno, semelhantes ao que se observou na Zona Residencial da Vila do Rio 2016 no Momento 02.

Outro exemplo relevante é a Vila Olímpica de Londres (2012), que adotou um modelo urbano compacto com forte presença de infraestrutura verde, estratégias de sombreamento e ventilação cruzada (ODA, 2009; ARUP, 2012). A área foi posteriormente transformada em bairro residencial, mantendo os princípios de sustentabilidade (GOLD e GOLD, 2012). Estudos mostraram que essa abordagem favoreceu a redução das temperaturas médias e melhorou os níveis de umidade relativa em comparação com os bairros adjacentes (FAIRBRASS, et al., 2018).

Em contraste, a Vila dos Atletas Rio 2016 não conseguiu cumprir plenamente as promessas do chamado “legado olímpico”. A baixa ocupação das unidades, a ausência de comércio e serviços no entorno e o modelo de condomínio fechado contribuíram para o isolamento funcional e para a intensificação de dinâmicas de segregação socioespacial. Do ponto de vista climático, os resultados demonstraram que a arborização dispersa e as áreas vegetadas remanescentes desempenham papel fundamental na regulação térmica, mas foram subutilizadas no desenho original. A depender das medidas de retrofit e do uso efetivo da vegetação, como observado no Cenário de Projeção Futura, é possível reverter parte dos impactos ambientais negativos.

Essas comparações reforçam a importância de integrar o planejamento climático desde as fases iniciais dos projetos urbanos de larga escala, sobretudo quando associados a grandes eventos. As estratégias de arborização, conectividade entre espaços livres, uso de materiais com baixa capacidade térmica e priorização da ventilação natural devem ser tratadas como diretrizes estruturantes, e não como elementos acessórios. O uso de simulações microclimáticas, como as realizadas com o ENVI-met, demonstra-se uma ferramenta indispensável para diagnosticar fragilidades e testar soluções com antecedência.

Portanto, o caso da Vila dos Atletas no Rio 2016 evidencia não apenas os desafios técnicos relacionados ao conforto térmico urbano, mas também a fragilidade de políticas públicas que negligenciam a integração entre ambiente construído, justiça espacial e sustentabilidade climática. Aprendizados obtidos com outras Vilas Olímpicas podem orientar futuras intervenções urbanas que conciliem desempenho ambiental, função social e permanência urbana após os grandes eventos.

Conclusões

A instalação da Vila dos Atletas no trecho do Ilha Pura promoveu, conforme esperado, alterações nas dinâmicas microclimáticas locais. As conclusões deste estudo são apresentadas em tópicos, a fim de evidenciar os impactos identificados em cada dimensão analisada.

Implantação das edificações: O projeto foi favorecido por estar posicionado no caminho do vento predominante, e as edificações não atuaram como grandes barreiras à circulação do ar. Isso permitiu que todas as regiões, especialmente a Zona Residencial, recebessem ventilação em maior ou menor intensidade. O posicionamento das edificações em um projeto urbano é fator determinante, uma vez que a rugosidade da superfície modifica o fluxo de vento e reduz sua velocidade à medida que se aproxima do solo. Nesse sentido, observa-se uma concepção urbana orientada ao controle climático, pois os espaços abertos contribuíram para a promoção de conforto ambiental aos usuários da área.

Cobertura do solo: Os resultados evidenciaram que a configuração espacial dos elementos construídos influenciou diretamente a produção de calor. As áreas com maior cobertura artificial apresentaram emissões térmicas mais elevadas. Por outro lado, nas regiões onde houve maior equilíbrio entre cobertura natural e artificial, os valores elevados de temperatura do ar foram atenuados, mesmo na ausência de vegetação arbórea expressiva.

Arborização: Em relação à vegetação e à sua distribuição no projeto, as simulações indicaram resultados positivos. A estratégia de dispersar, em vez de concentrar a arborização apenas no parque, revelou-se benéfica. A vegetação conseguiu amenizar a temperatura em todos os períodos simulados, inclusive nas áreas mais quentes do recorte. Ao observar as áreas com vegetação rasteira e arbórea, pode-se afirmar que a Vila dos Atletas, concebida para os Jogos de 2016, apresenta, no nível do pedestre, princípios

de desenvolvimento urbano com qualidade ambiental, proporcionando melhores condições de vida aos seus usuários. Destaca-se, ainda, a relevância da relação entre arborização e ruas, como apontado pelos resultados do Momento 03, especialmente durante o dia. As estratégias projetuais adotadas — tais como o arranjo das edificações, a presença de espaços livres, o cuidado com a cobertura do solo e a criação do parque com vegetação diversificada, especialmente na Zona Residencial — contribuíram positivamente para o conforto térmico em microescala.

Simulação computacional: O uso da simulação computacional como método de análise microclimática foi fundamental, pois possibilitou a realização de análises presentes, regressivas e prospectivas. Essa flexibilidade metodológica permitiu uma avaliação comparativa de diferentes cenários temporais para um mesmo espaço urbano — algo inviável por meio de métodos tradicionais. Além de permitir diagnósticos, a simulação se mostrou uma ferramenta útil para testar alternativas voltadas ao desenvolvimento urbano sustentável das cidades, uma vez que, este opera no princípio do equilíbrio entre interesses e consequências para a sociedade.

Uso do ENVI-met 3.1: Como ferramenta de apoio, o ENVI-met 3.1 foi relevante por sua capacidade de operar com as mais importantes variáveis climáticas — temperatura do ar, velocidade do vento e umidade relativa — em áreas urbanas, considerando a interação entre superfície, vegetação e atmosfera. Este possibilita diagnósticos de qualidade ou não do ambiente, bem como a simulação de possibilidades para melhorar o conforto térmico da área estudada. Uma das limitações que a versão 3.1 apresenta é a tipologia das árvores, uma vez que este possui pouca variedade de espécies.

Aspectos econômicos e sociais: Para além dos aspectos ambientais — foco central desta pesquisa —, destaca-se a necessidade de considerar os desdobramentos econômicos e sociais do projeto. Do ponto de vista socioeconômico, o chamado “legado olímpico” não se concretizou. O Ilha Pura foi considerada a vila olímpica mais luxuosa da história dos Jogos, com unidades de alto valor, o que resultou em um elevado número de imóveis ainda não comercializados. Em um contexto de déficit habitacional significativo no Rio de Janeiro e no Brasil, o empreendimento não contribuiu para mitigar esse problema. Tal realidade evidencia o descompromisso dos agentes públicos com o uso social da terra em benefício da coletividade. Além disso, o pro-

jeto reforçou dinâmicas de segregação socioespacial, ao reproduzir o modelo de condomínios fechados, que perpetuam políticas de exclusão e medo. Sua localização isolada, a escassez de comércio e serviços nas proximidades, bem como a dependência quase exclusiva do sistema BRT, estimulam o uso do transporte particular. Esse fator contribui para o agravamento dos congestionamentos — já frequentes na região —, comprometendo a qualidade de vida dos residentes e de quem transita pela área. Outros impactos ambientais, como a poluição do ar e a poluição sonora, também merecem atenção e devem ser avaliados em escala ampliada, contemplando todo o entorno do bairro.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES).

Referências

- ARAVOSSIS, Konstantin G. et al. Economic aspects and the sustainability impact of the Athens 2004 Olympic Games. In: WSEAS Transactions on Environment and Development, v. 10, n. 10, p. 378–388, 2014. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/257869784>.
- ARUP. London 2012 Olympic Games Sustainability. Londres: Arup, 2013.
- ASSIS, E. S. De. A abordagem do clima urbano e aplicações no planejamento da cidade: reflexões sobre uma trajetória. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2005, Maceió. Anais [...]. Maceió: ANTAC, 2005.
- BARBOSA, G. S.; DRACH, P. R. C.; CORBELLA, O. D. Intraurban temperature variations: urban morphologies of the densification process of Copacabana neighborhood, Brazil. Climate, v. 7, n. 65, p. 1–17, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/cli7050065>.
- DRACH, P. R. C.; KRÜGER, E. L.; EMMANUEL, R. Effects of atmospheric stability and urban morphology on daytime intra-urban temperature variability for Glasgow, UK. Science of the Total Environment, v. 627, p. 782–791, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.285>.
- DUARTE, D. H. S. Estado da arte em clima urbano e planejamento. In: NUTAU 2002: Sustentabilidade, Arquitetura e Desenho Urbano, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: NUTAU/USP, p. 1102–1111, 2002.
- ÉGERHÁZI, L. A.; KOVÁCS, A.; UNGER, J. Application of microclimate modelling and onsite survey in planning practice related to an urban micro-environment. Advances in Meteorology, p. 1–10, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2013/251586>.
- FAIRBRASS, Alison J. et al. Green infrastructure for London: a review of the evidence. London: University College London, Engineering Exchange, 2018.

FARIA, J. R. G. De; MENDES, J. F. G. Sobre o uso e ocupação do solo urbano e a temperatura do ar. *Ambiente Construído*, v. 4, n. 3, p. 7-17, 2004.

GOLD, J. R.; GOLD, M. M. Legacy, sustainability and Olympism: crafting urban outcomes at London 2012. *Revue STAPS*, n. 105, p. 23-35, 2014. DOI: 10.3917/sta.105.0023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/276324292>.

GOMES, P. S.; LAMBERTS, R. O estudo do clima urbano e legislação urbanística: considerações a partir do caso Montes Claros – MG. *Ambiente Construído*, v. 9, n. 1, p. 73-91, 2009.

GONZÁLEZ, S. Bilbao and Barcelona 'in motion': how urban regeneration 'models' travel and mutate in the global flows of policy tourism. *Urban Studies*, v. 48, n. 7, p. 1397-1418, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0042098010374510>.

HAMADA, L.; DRACH, P. R. C. Análise da inter-relação entre a legislação urbanística e as estratégias bioclimáticas recomendadas para a região de clima quente e úmido. *Revista Projetar – Projeto e Percepção do Ambiente*, v. 7, n. 2, p. 177-191, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.21680/2448-296X.2022v7n2ID26903>.

JATOBÁ, S. U. S. Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social. Brasília: IPEA, 2014. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5567/1/BRU_n05_urbanizacao.pdf.

JUNIOR, J. H. de A.; LIMA, A. M. L. P. Uso de árvores e arbustos em cidades brasileiras. *Revista da Sociedade Brasileira de Arborização Urbana*, v. 2, n. 4, p. 50-66, 2007. DOI: 10.5380/revsbau.v2i4.66337. Disponível em: <https://doi.org/10.5380/revsbau.v2i4.66337>.

LOMBARDO, M. A.; FRUEHAUF, A. L. Clima urbano nas metrópoles e seus impactos ambientais. 2021. Disponível em: <https://pluris2020.faac.unesp.br/Paper1198.pdf>.

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

NASCIMENTO, D. T. F.; BARROS, J. R. Identificação de ilhas de calor por meio de sensoriamento remoto: estudo de caso no município de Goiânia – GO/2001. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 29, n. 1, p. 119-134, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.5216/bgg.v29i1.7112>.

OLYMPIC DELIVERY AUTHORITY. Sustainable Development Strategy. Londres: ODA, 2009. Disponível em: <PDF na Olympic World Library>.

PENG, C.; ELWAN, A. F. A. Bridging outdoor and indoor environmental simulation for assessing and aiding sustainable urban neighbourhood design. *Archnet IJAR*, v. 6, n. 3, p. 72-90, 2012.

RODRIGUES, L. C.; JÚNIOR, C. F. de L.; MEDEIROS, W. F. De. Discussão sobre planejamento e clima urbano. In: CONGRESSO DE GEOGRAFIA E ATUALIDADES, 1., 2015, Rio Claro. Anais [...]. Rio Claro: UNESP, 2015.

RORIZ, M.; BARBUGLI, R. A. Mapeamento e análise de microclimas urbanos. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7., 2003, Curitiba. Anais [...]. Curitiba: ANTAC, v. 3, p. 592-599.

ONU HABITAT. Relatório mundial das cidades: 2 bilhões de pessoas podem enfrentar aumento de temperatura até 2040. ONU-Habitat, 2024.

Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/283054-relat%C3%B3rio-mundial-das-cidades-2-bilh%C3%BDes-de-pessoas-podem-enfrentar-aumento-alarmante-de>.

SILVA, A. M. M. Da; DRACH, P. R. C. Explorando as Soluções Baseadas na Natureza: conceitos e princípios. *Cidades Verdes*, v. 12, n. 35, p. 195–207, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.17271/23178604123520245104>.

ZHOU, Xiaoqin et al. Green strategies in the planning and construction of the 2008 Beijing Olympic venues. *Building and Environment*, v. 43, n. 4, p. 806–816, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.002>.