XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Mudanças climáticas e o desempenho bioclimático de Belo Horizonte: impactos e perspectivas

Cambio climático y el desempeño bioclimático de Belo Horizonte: impactos y perspectivas

Climate Change and the Bioclimatic Performance of Belo Horizonte: impacts and perspectives

Clima e Planejamento Urbano / *Clima y Planificación Urbana / Climate and Urban Planning*

de Oliveira Veloso, Ana Carolina
Dra, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, acoveloso@gmail.com

Vieira Gonçalves de Souza, Roberta
Dra, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, robertavgs@ufmg.br

Resumo

As mudanças climáticas são um dos maiores desafios globais do século XXI, com impactos no meio ambiente e nas atividades humanas. Compreender esses efeitos no ambiente construído é essencial para redefinir parâmetros do planejamento urbano. Este artigo analisa a previsão de evolução climática de Belo Horizonte em cenários futuros, avaliando as horas de conforto e desconforto térmico (calor e frio) com base no clima atual e nas projeções para 2050 e 2080, segundo cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways) do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Os resultados indicam variações nas amplitudes térmicas, com aumento de até 320% nas temperaturas acima de 31°C e uma ampliação de 200% na duração das ondas de calor em 2050 em relação ao clima atual. Esses dados reforçam a necessidade de alinhar estratégias projetuais às condições climáticas futuras, promovendo resiliência térmica e eficiência energética das edificações diante dos impactos crescentes das mudanças climáticas.

Palavras-chave: Mudanças climáticas. Ondas de calor. Conforto térmico. Estratégicas bioclimáticas.

Resumen

El cambio climático es uno de los mayores desafíos globales del siglo XXI, con impactos en el medio ambiente y en las actividades humanas. Comprender estos efectos en el entorno construido es esencial para redefinir los parámetros de la planificación urbana. Este artículo analiza la previsión de la evolución climática de Belo Horizonte en los escenarios SSP1-2.6 y SSP5-8.5 (Trayectorias Socioeconómicas Compartidas) del IPCC (Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático), considerando el clima actual y las proyecciones para 2050 y 2080. Se evalúan las horas de confort e incomodidad térmica (calor y frío). Los resultados indican variaciones en las amplitudes térmicas, con un aumento de hasta el 320% en las temperaturas superiores a 31°C y una ampliación del 200% en la duración de las olas de calor en 2050 en relación con el clima actual. Estos datos refuerzan la necesidad de alinear las estrategias proyectuales a las condiciones climáticas futuras, promoviendo la resiliencia térmica y la eficiencia energética.

Palabras clave: Cambio climático. Olas de calor. Confort térmico. Estratégicas bioclimáticas.

Abstract

Climate change is one of the greatest global challenges of the 21st century, with impacts on the environment and human activities. Understanding these effects on the built environment is essential for redefining urban planning parameters. This article analyzes the projected climate evolution of Belo Horizonte under future scenarios, evaluating thermal comfort and discomfort hours (due to heat and cold) based on the current climate and projections for 2050 and 2080, according to the IPCC's (Intergovernmental Panel on Climate Change) SSP1-2.6 and SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways) scenarios. The results indicate variations in thermal amplitudes, with up to a 320% increase in temperatures above 31°C and a 200% extension in heatwave duration by 2050 compared to the current climate. These findings underscore the need to align design strategies with future climatic conditions, promoting thermal resilience and energy efficiency in buildings in the face of the growing impacts of climate change.

Keywords: Climate change. Heatwaves. Thermal comfort. Bioclimatic strategies.

Introdução

As mudanças climáticas representam um dos principais desafios globais da atualidade, com impactos importantes sobre o meio ambiente e as atividades humanas. Entre os setores mais afetados está o de edificações, cuja demanda por energia é diretamente influenciada por variações climáticas (Guarda et al, 2024; Hong et al., 2023; Ascione et al., 2022). Enquanto o aumento das temperaturas e a maior frequência de eventos climáticos extremos podem levar a um maior consumo de energia e emissões nos edifícios, também podem resultar em interrupções de energia e impactar o conforto ambiental interno dos edifícios (Soudian e Beraldi, 2025). Assim, as projeções climáticas globais apontam para mudanças nos padrões térmicos, precipitações e eventos extremos até o final do século.

Conforme indicado no Sexto Relatório de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), prevê-se um aumento na temperatura média global de 1,4°C a 1,7°C até o final do século XXI, em relação aos níveis pré-industriais, se as emissões de gases de efeito estufa continuarem no ritmo atual (IPCC, 2022). Isso pode levar à redução do período de aquecimento e ao aumento da duração da estação de resfriamento, mesmo em climas mais temperados, resultando em maior demanda por resfriamento e, consequentemente, em maior consumo de energia nos edifícios (Andric et al., 2019).

Para avaliar os impactos das mudanças climáticas, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) adota os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways* – SSPs), que projetam possíveis alterações climáticas integradas a variáveis socioeconômicas, como crescimento populacional, desenvolvimento tecnológico e políticas de mitigação. Esses cenários abrangem trajetórias que variam de emissões muito baixas (SSP1-1.9) a emissões extremamente elevadas (SSP5-8.5), permitindo analisar os impactos potenciais das mudanças climáticas e explorar estratégias de mitigação e adaptação.

À medida que as temperaturas aumentam e as ondas de calor se tornam mais frequentes e intensas, a exposição prolongada ao calor extremo pode ter sérios efeitos na saúde, representando um desafio importante para os sistemas de saúde pública e exigindo a implementação de medidas preventivas e adaptativas para proteger a população mais vulnerável (Ebi et al., 2021). Esses impactos manifestam-se localmente de formas distintas.

Em Belo Horizonte, com seu clima subtropical de altitude e características urbanas específicas, projeta-se um aumento expressivo no consumo de energia elétrica de edificações. No cenário mais pessimista (SSP5-8.5), este aumento pode, por exemplo, alcançar 77% em edificações de escritório até 2080 (Veloso e Souza, 2024). Esse panorama reforça a necessidade de estratégias adaptativas, como avaliado por Krelling et al. (2024), dado que tecnologias projetuais atuais podem se tornar insuficientes diante de ondas de calor mais frequentes e severas.

Neste contexto, compreender os impactos das mudanças climáticas no ambiente construído é fundamental para redefinir os parâmetros de projeto das edificações (Moazami et al., 2019). As alterações climáticas influenciam diretamente a demanda energética para aquecimento e resfriamento, enquanto estratégias de mitigação, como o aprimoramento dos materiais da envoltória, a adoção de ventilação natural e o uso de equipamentos eficientes - como painéis fotovoltaicos e sistemas de iluminação de baixo consumo - podem contribuir para a redução dos impactos climáticos (Andric et al, 2019).

Sendo assim, este artigo tem como objetivo analisar a evolução climática na cidade de Belo Horizonte no contexto de cenários futuros de mudanças climáticas, avaliando as horas de conforto e desconforto térmico (por calor e frio) com base no clima atual e em projeções para os anos de 2050 e 2080, conforme os cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 do IPCC. Além disso, busca identificar recomendações projetuais que possam assegurar condições adequadas de conforto térmico frente às mudanças climáticas previstas. Reconhece-se que os SSPs são cenários globais e que sua aplicação em escala local pode envolver incertezas, principalmente em variáveis socioeconômicas específicas. Ainda assim, sua adoção neste estudo permite comparar os impactos climáticos projetados e explorar estratégias projetuais no contexto urbano de Belo Horizonte.

Metodologia

Este estudo avalia as condições climáticas atuais, representadas pelo uso do arquivo climático TMYx (2007-2021), e as projeções climáticas futuras baseadas nos cenários SSP1-2.6 e SSP5-8.5 para os anos de 2050 e 2080. Esses cenários foram selecionados por representarem perfis contrastantes de emissões de gases de efeito estufa, permitindo uma análise dos impactos das mudanças climáticas nas condições térmicas na cidade de Belo Horizonte-Brasil.

Caracterização do clima

A cidade de Belo Horizonte está localizada na região Sudeste do Brasil, apresenta um clima tropical de altitude (classificação de Köppen-Geiger: Cwa), caracterizado por temperaturas elevadas no verão variando de 23 a 27°C, e alta umidade e invernos amenos e secos com temperaturas variando de 15 a 20°C. A temperatura média anual da cidade é de 21,2°C, com máximas nos meses de verão de dezembro e janeiro, quando a média varia entre 23°C e 25°C, e mínimas nos meses de inverno, especialmente em junho e julho, com médias de 17°C a 19°C. O regime pluviométrico é sazonal, com uma precipitação média anual de 1.100 a 1.600 mm, concentrada principalmente entre outubro e março, enquanto os meses secos (maio a agosto) apresentam baixos índices de precipitação e umidade relativa média abaixo de 30%.

Para a análise climática nos cenários futuros projetados para 2050 e 2080, foi utilizado o software 'Future Weather Generator' (Rodrigues et al., 2023), que realiza a adaptação de dados climáticos. Esse programa transforma os dados climáticos atuais no formato WeatherPlus Energy (epw) com base nas projeções climáticas do CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6), publicado em 2022. Para a análise deste trabalho, considerou dois cenários extremos descritos no relatório IPCC AR6 (IPCC, 2022): SSP1-2.6 e SSP5-8.5, que representam trajetórias opostas de emissões de gases de efeito estufa. A escolha desses cenários se justifica por sua ampla aceitação em estudos sobre os impactos das mudanças climáticas no desempenho energético de edificações, permitindo comparações e compreensão mais aprofundadas dos efeitos potenciais das alterações climáticas. As análises foram realizadas com base nos arquivos climáticos atual e os projetados para os cenários futuros, gerados pelo software 'Future Weather Generator'.

Ondas de calor

Para entendimento de como será esse aumento de temperatura nos cenários futuros, foi estudada a presença de ondas de calor. Para que um período seja classificado como de onda de calor, o método de Ouzeau (Ouzeau et al., 2016) estabelece que as temperaturas devem permanecer acima de um determinado limiar por um número mínimo de dias consecutivos, que pode variar de acordo com o clima local e os critérios específicos da análise.

O método define uma onda de calor (ou *heatwave*) quando a temperatura diária máxima e mínima ultrapassam certos percentis de uma distribuição climatológica local. Com base nos arquivos climáticos, são definidos percentis de temperatura máxima diária: 99,5% (Spic), 97,5% (Sdeb) e 95% (Sint). Os percentis Sdeb, Spic e Sint foram calculados baseados em dados de mortalidade devidos a ondas de calor (Machard et al, 2020), onde Spic representa o limite a partir do qual a onda de calor é detectada, Sdeb define o começo e o fim da onda de calor e Sint é o limite de interrupção, usado para unir duas ondas de calor consecutivas sem uma queda expressiva de temperatura.

Para detecção de ondas de calor, com base nos arquivos climáticos atuais e futuros, considerou dias consecutivos em que a temperatura diária máxima excedeu os seguintes limiares: (1) uma onda de calor inicia-se quando as temperaturas ultrapassam o limiar Sdeb por pelo menos cinco dias consecutivos e (2) a interrupção ocorre se a temperatura cair abaixo do limiar Sint por pelo menos três dias consecutivos. A partir desses critérios, foram contabilizadas as ocorrências e a duração das ondas de calor em cada cenário analisado.

Análise de conforto

Para a análise das horas de conforto e desconforto térmico nos cenários projetados, foi adotada a metodologia da ASHRAE 55-2023. A faixa de conforto térmico foi definida como ±3,5°C em torno da temperatura operativa de referência, conforme recomendado pela norma. As horas em que as temperaturas operativas permaneceram dentro dessa faixa foram classificadas como conforto térmico, enquanto as horas fora desse intervalo foram contabilizadas como desconforto térmico por calor e por frio.

Para a definição das estratégias bioclimáticas, foi utilizada a Carta Bioclimática de Givoni, para orientar soluções projetuais. As estratégias que foram consideradas são ventilação natural, massa térmica para aquecimento, resfriamento evaporativo e condicionamento artificial. A seleção e quantificação dessas estratégias foi baseada na frequência de ocorrência das condições climáticas compatíveis, conforme estabelecido pela Carta de Givoni. As estratégias foram determinadas com base na frequência das condições climáticas atual e futuras gerados no software 'Future Weather Generator'.

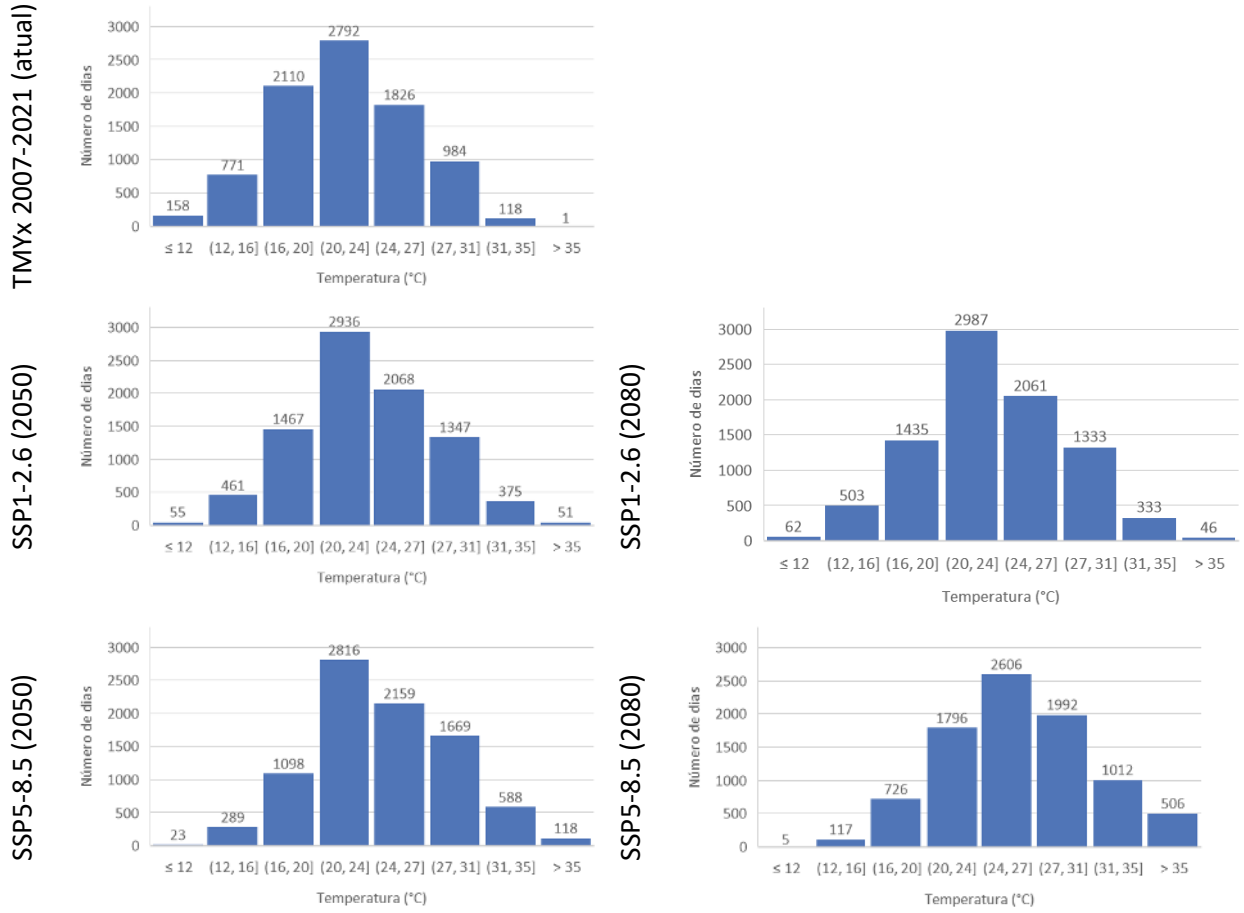
Resultados

Os dados climáticos do período atual (TMYx 2007-2021) indicam predominância de temperaturas médias anuais na faixa de 20°C a 24°C, correspondendo à maioria dos dias analisados, com raras ocorrências de temperaturas extremas, acima de 35°C (Figura 1). Essa estabilidade climática reflete um padrão ameno, com poucas variações nas temperaturas mais baixas ou mais altas. No cenário SSP1-2.6, projetado para 2050 e 2080, observa-se intensificação de 13% das faixas de temperatura mais altas, especialmente entre 24°C e 27°C, enquanto as temperaturas mais baixas (≤12°C a 16°C) apresentam reduções perceptíveis. Apesar haver aumento da ocorrência de temperaturas extremas (>35°C), sua ocorrência ainda é pequena, evidenciando impacto moderado das mudanças climáticas nesse cenário.

Por outro lado, o cenário SSP5-8.5 projeta alterações maiores, com um aumento substancial nas temperaturas extremas (Figura 1). Em 2050, temperaturas entre 31°C e 35°C crescem consideravelmente, e em 2080, a frequência de temperaturas acima de 35°C aumenta mais de 300 vezes em relação ao clima atual. As temperaturas predominantes (20°C - 24°C e 24°C - 27°C) também sofrem alterações, com redução na primeira faixa e crescimento na segunda. Essas mudanças mostram uma intensificação do desconforto térmico e podem resultar em maior estresse térmico na população, além de impactos na eficiência energética das edificações e na saúde pública, especialmente em cenários de altas emissões como o SSP5-8.5.

Com base na análise das ondas de calor identificadas pelo método de Ouzeau (Ouzeau et al., 2016) e nos cenários apresentados na Figura 2, observa-se uma clara tendência de aumento na frequência e duração das ondas de calor ao longo do tempo, especialmente nos cenários futuros de mudanças climáticas. No período histórico TMYx (2007-2021), foram identificadas em média 2 ondas de calor, com uma duração total aproximada de 10 dias de ocorrência. No cenário SSP1-2.6 (2050), as ondas de calor permanecem em números semelhantes, mas com um ligeiro aumento na duração média, refletindo um impacto moderado das mudanças climáticas nesse cenário de baixa emissão. No entanto, em 2080, ainda no cenário SSP1-2.6, há um expressivo aumento tanto no número de ondas de calor, crescendo 100% das ocorrências e frequência, indicando que mesmo em cenários de baixa emissão há intensificação das ondas de calor.

Figura 1: Perfil de temperatura em frequência de ocorrência para a cidade de Belo Horizonte.



Os cenários de altas emissões (SSP5-8.5) apresentam os impactos mais severos. Em 2050, a duração das ondas de calor aumenta em 200% em relação ao clima atual (TMYx 2007-2021), enquanto a frequência de ocorrência cresce cerca de 100%. Em 2080, a situação tem um aumento na duração das ondas de calor de 300% e a frequência de ocorrência cresce em 150%, quando comparadas ao período histórico.

Como pode ser visto na Figura 3, no período atual (TMYx 2007-2021), as condições de conforto variam de 30 a 50% ao longo do ano, com maior ocorrência nos meses de janeiro a março e de outubro a dezembro, enquanto o desconforto por frio se concentra nos meses mais frios (junho a agosto), com incidências superiores a 60%. Já o desconforto por calor é moderado nos meses

de verão, ocorrendo em maiores quantidade nos meses de novembro a fevereiro, com média de 15% mensal.

Figura 2: Ondas de calor segundo método de Ouzeau et al. (2016).

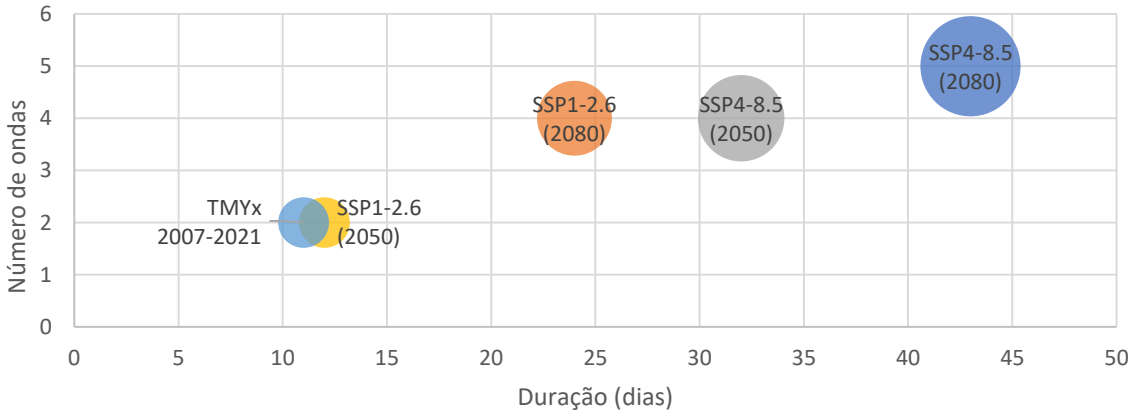
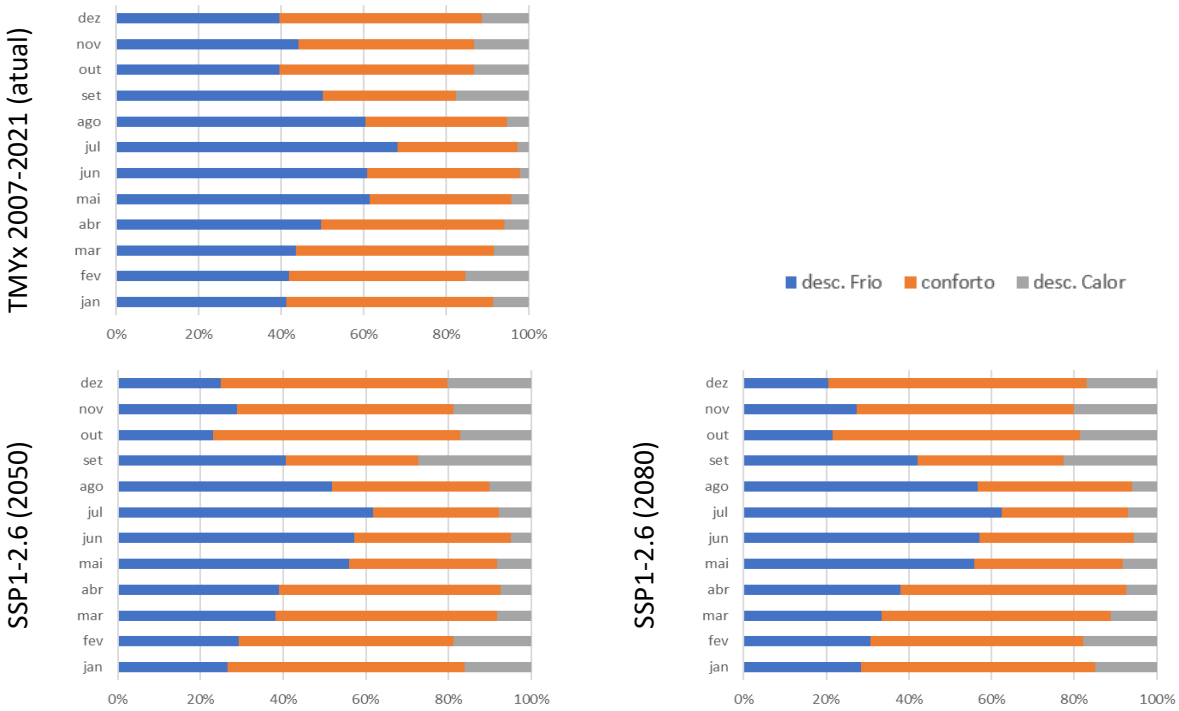
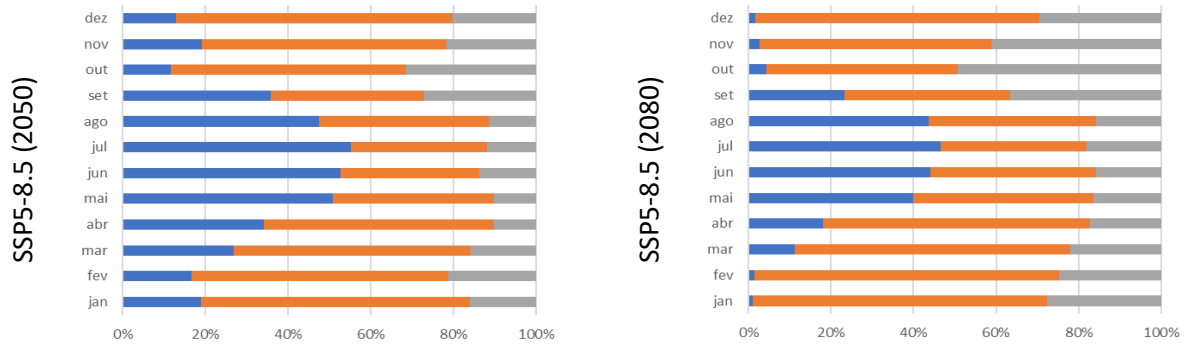


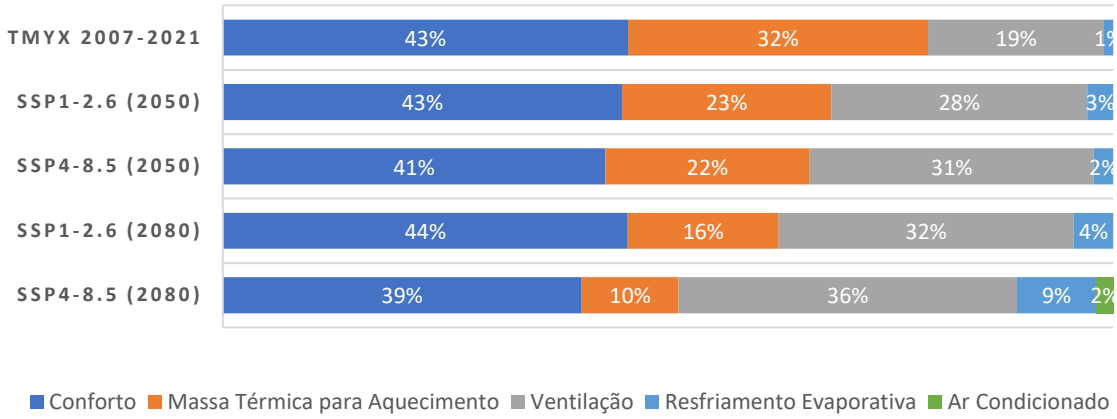
Figura 3: Percentual de conforto e desconforto térmico.





Este panorama reforça a necessidade de estratégias projetuais adaptativas, incluindo o uso de ventilação natural, materiais de alta inércia térmica, resfriamento evaporativo, para mitigar os efeitos das mudanças climáticas e assegurar o conforto térmico nos próximos anos (Figura 4). A análise dos cenários climáticos revela uma mudança nas estratégias bioclimáticas predominantes para Belo Horizonte ao longo do tempo, evidenciando o impacto das mudanças climáticas no desempenho térmico das edificações. No período atual (TMYx 2007-2021), observa-se um equilíbrio entre conforto térmico e a necessidade de massa térmica para aquecimento, com ventilação natural sendo uma estratégia complementar. Essa configuração apresenta uma caracterização climática de temperaturas moderadas.

Figura 4: Estratégias bioclimáticas para a cidade de Belo Horizonte.



Nos cenários futuros, especialmente em SSP5-8.5, há uma redução da demanda por massa térmica para aquecimento em relação ao clima atual, acompanhada por um aumento na necessidade de ventilação natural e resfriamento evaporativo. Aparece neste cenário também a necessidade de uso de condicionamento artificial do ar, apesar de ainda em um pequeno percentual das horas do ano. Essas mudanças mostram uma transição de um clima moderado para um perfil mais quente, em que estratégias de resfriamento se tornam essenciais. No SSP1-2.6, a configuração é menos impactada, mantendo uma maior proximidade com o período histórico, o que demonstra a influência de ações mitigatórias na manutenção do conforto térmico e na redução da necessidade de intervenções mais drásticas.

Essas mudanças destacam a crescente relevância de estratégias bioclimáticas passivas, como ventilação natural e resfriamento evaporativo, para mitigar o desconforto por calor nos cenários futuros. A redução da necessidade de massa térmica para aquecimento reflete a diminuição do desconforto por frio. Dessa forma, os resultados reforçam a importância de alinhar estratégias projetuais às condições climáticas projetadas, promovendo resiliência térmica e eficiência energética em edificações frente às mudanças climáticas.

Conclusão

Este artigo analisou os impactos das mudanças climáticas no desempenho bioclimático de Belo Horizonte, evidenciando que as projeções futuras apontam para desafios relacionados ao conforto térmico e à eficiência energética das edificações. A redução das horas de conforto térmico e o aumento do desconforto, principalmente por calor, nos cenários de altas emissões, confirmam a necessidade de se prever estratégias projetuais adaptativas que mitiguem os efeitos das mudanças climáticas.

Com relação à análise das ondas de calor e do desconforto térmico verifica-se a vulnerabilidade que a cidade de Belo Horizonte tem frente às condições climáticas extremas, o que pode comprometer o bem-estar dos ocupantes e a resiliência das edificações. Estratégias como ventilação natural, resfriamento evaporativo e uso de materiais com inércia térmica mostram-se essenciais para enfrentar os desafios futuros. Além disso, os resultados reforçam a importância de incorporar considerações climáticas às políticas públicas e ao planejamento urbano, promovendo edificações mais sustentáveis.

Portanto, este estudo mostra a necessidade de uma abordagem mais integrada entre pesquisa, projetos arquitetônicos e gestão pública, com formulação de diretrizes urbanas baseadas em projeções climáticas futuras e a promoção de incentivos a projetos arquitetônicos sustentáveis. Alinhar as estratégias projetuais às condições climáticas futuras será essencial para assegurar conforto térmico, eficiência energética e qualidade de vida. Ainda que os cenários utilizados apresentem limitações, sua aplicação neste estudo permite antecipar desafios e planejar decisões projetuais mais adequadas as mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Agência de Financiamento à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro para esta pesquisa.

Referências

ANDRIC, I; KOC, M; AL-GHAMDI, S. G. A review of climate change implications for built environment: impacts, mitigation measures and associated challenges in developed and developing countries. Journal of Cleaner Production, v. 211, 2019, p. 83-102.

ASCIONE, F; DE MASI, R. F.; GIGANTE, A.; VANOLI, G. P. Resilience to the climate change of nearly zero energy-building designed according to the EPBD recast: Monitoring, calibrated energy models and perspective simulations of a Mediterranean nZEB living lab. Energy & Buildings, v. 262, 2022, p. 112004.

ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55 – 2023: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Peachtree Corners, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2023.

EBI, K. L.; VANOS, J.; BALDWIN, J. W.; BELL, J. E.; HONDULA, D. M.; ERRETT, N. A.; BERRY, P. Extreme weather and climate change: population health and health system implications. Annual Review of Public Health, v. 42, n. 1, 2021, p. 293–315.

GUARDA, E. L. A.; MIZGIER, M. G. O.; KRAMER, D. Variação do potencial bioclimático em São Paulo frente ao cenário de mudanças climáticas. Paranoá. Brasília: Universidade de Brasília, v. 17, e43180, 2024.

HONG, T.; MALIK, J.; KRELLING, A.; O'BRIEN, W.; SUN, K.; LAMBERTS, R.; WEI, M. Ten questions concerning thermal resilience of buildings and occupants for climate adaptation. Building and Environment, v. 244, 2023, p. 110806.

IPCC. Summary for Policymakers. In: PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D. C.; POLOCZANSKA, E. S.; MINTENBECK, K.; TIGNOR, M.; ALEGRÍA, A.; CRAIG, M.; LANGSDORF, S.; LÖSCHKE, S.; MÖLLER, V.; OKEM, A. (Eds.). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. p. 3–33.

KRELLING, A. F.; LAMBERTS, R.; MALIK, J.; ZHANG, W.; SUN, K.; HONG, T. Defining weather scenarios for simulation-based assessment of thermal resilience of buildings under current and future climates: A case study in Brazil. Sustainable Cities and Society, v. 107, 2024, p. 105460.

MACHARD, A.; INARD, C.; ALESSANDRINI, J.; PELE, C.; RIBERON, J. A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data. Energies, v.13, 2020, p.3424.

MOAZAMI, A.; NIK, V. M.; CARLUCCI, S.; GEVING, S. Impacts of future weather data typology on building energy performance – Investigating long-term patterns of climate change and extreme weather conditions. Applied Energy, v. 238, 15 mar. 2019, p. 696–720.

OUZEAU, G.; SOUBEYROUX, J. M.; SCHNEIDER, M.; VAUTARD, R.; PLANTON, S. Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. Climate Services, v. 4, 2016, p. 1–12. Doi: https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002

RODRIGUES, E.; FERNANDES, M. S.; CARVALHO, D. Future weather generator for building performance research: an open-source morphing tool and an application. Building and Environment, v. 233, 2023, p. 110104.

SOUDIAN, S.; BERARDI, U. Impact of future climate scenarios on thermal performance and resilience of building façades: Canadian climate case study. Building and Environment, v. 267, parte A, 1 jan. 2025, p. 112245.

VELOSO, A. C. O.; SOUZA, R. V. G. Climate change impact on energy savings in mixed-mode ventilation office buildings in Brazil. Energy and Buildings, v. 318, 2024, p. 114418.