

Análise do conforto térmico para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais

Analysis of thermal comfort for different regions of the state of
Minas Gerais

Análisis del confort térmico para diferentes regiones del estado
de Minas Gerais

Tiago de Freitas Paulino¹

Resumo

O conforto térmico no interior de uma edificação está relacionado ao bem-estar do ser humano, bem como a sua saúde, produtividade e aprendizagem. Como efeitos das mudanças climáticas pode-se relatar alterações de temperatura e umidade relativa do ar, aspectos diretamente ligados ao conforto térmico. Existem diferentes trabalhos que analisam as condições atuais de conforto térmico, mas as análises para o contexto ambiental brasileiro são escassas. Assim, o presente trabalho visa realizar uma análise de condições de conforto térmico para as dez regiões do estado de Minas Gerais, considerando uma cidade para cada região. A análise é realizada a partir de dados meteorológicos disponibilizados entre os anos de 2003 e 2024. A maior temperatura média anual observada é de 25,15°C, em Uberlândia em 2015. Além disso, em todas as cidades analisadas há uma tendência de aumento da temperatura média anual e em 7 delas, a maior média anual ocorre em 2024. Já a maior temperatura máxima, 41,7°C é observada em Governador

¹ Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor Lotado no Departamento de Engenharia de Materiais e Credenciado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (CEFET-MG). Líder do Grupo de Pesquisa em Refrigeração, Aquecimento e Climatização (GRAC), credenciado junto ao CNPq. Membro do Centro de Pesquisa em Energia Inteligente. E-mail: tfpaulinoeng@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-2446-0373>

Valadares no ano de 2023. Em 9 cidades se observa uma tendência de aumento da temperatura máxima anual. A menor temperatura é de 0,8°C, observada em Varginha no ano de 2021. O maior valor de CDD (*cooling degree days*), entre as cidades analisadas, é de 2757 em Governador Valadares. Em Uberlândia, no ano de 2023, em 1243 horas (mais de 14% do total anual) a umidade relativa do ar esteve abaixo de 30%. Para 8 das cidades analisadas há uma tendência de aumento do número de horas com umidade relativa abaixo dos 30%. Os resultados apresentados neste trabalho podem auxiliar em investigações futuras que visem a melhorar a qualidade de vida da população, em particular com sistemas de climatização que possam atenuar os efeitos das mudanças climáticas. Essas análises são particularmente importantes para as populações que dispõe de menos recursos financeiros pois podem direcionar investimentos, ao menos, aos locais de uso coletivo.

Palavras-chave: Conforto térmico. CDD. Umidade relativa. Análise de dados. Minas Gerais.

Abstract

The concept of thermal comfort within a built environment is intrinsically linked to human well-being, encompassing aspects such as health, productivity and educational performance. In the context of climate change, fluctuations in temperature and relative humidity can be observed, thereby impacting thermal comfort. A paucity of studies has been conducted that analyze the current conditions of thermal comfort, particularly in the context of the Brazilian environment. The objective of this study is to analyze thermal comfort conditions in the ten regions of the state of Minas Gerais, with one city selected from each region. The analysis is conducted using meteorological data available between 2003 and 2024. The highest average annual temperature observed was 25.15°C, in Uberlândia in 2015. Furthermore, the analysis of all cities demonstrated a general tendency for the average annual temperature to increase. In seven of these cities, the highest annual average was recorded in 2024. The maximum temperature of 41.7°C was recorded in Governador Valadares in 2023. In nine cities, a tendency for the maximum annual temperature increase is observed. The lowest recorded temperature was 0.8°C, which was observed in Varginha in 2021. The highest CDD (*cooling degree days*) value among the cities analyzed is 2757 in Governador Valadares. In Uberlândia, in 2023, 1243 hours

(more than 14% of the annual total) were recorded as having a relative humidity below 30%. For 8 of the cities analyzed there is a tendency for an increase in the number of hours with relative humidity below 30%. The findings presented in this study have the potential to inform future research endeavors aimed at enhancing the quality of life of the population, particularly in the context of air conditioning systems that have the capacity to mitigate the adverse effects of climate change. These analyses are of particular importance for populations with fewer financial resources, as they can direct investments, at least, to places of collective use.

Keywords: Thermal comfort. CDD. Relative humidity. Data analysis. Minas Gerais.

Resumen

El confort térmico en el interior de un edificio está relacionado con el bienestar humano, así como con su salud, productividad y aprendizaje. Como efectos del cambio climático se pueden reportar cambios en la temperatura y la humedad relativa, aspectos directamente ligados al confort térmico. Hay diferentes trabajos que analizan las condiciones actuales de confort térmico, pero los análisis para el contexto ambiental brasileño son escasos. Así, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis de las condiciones de confort térmico para las diez regiones del estado de Minas Gerais, considerando una ciudad por cada región. El análisis se realiza utilizando datos meteorológicos disponibles entre 2003 y 2024. La temperatura media anual más alta observada fue de 25,15 °C, en Uberlândia en 2015. Además, en todas las ciudades analizadas existe una tendencia al aumento de la temperatura media anual y, en 7 de ellas, el promedio anual más alto se produjo en 2024. La temperatura máxima más alta, 41,7 °C, se observó en Governador Valadares en 2023. En 9 ciudades, existe una tendencia al aumento de la temperatura máxima anual. La temperatura más baja es de 0,8 °C, observada en Varginha en 2021. El valor más alto de CDD (grados día de enfriamiento), entre las ciudades analizadas, es de 2757 en Governador Valadares. En Uberlândia, en el año 2023, en 1243 horas (más del 14% del total anual) la humedad relativa estuvo por debajo de 30%. Para 8 de las ciudades analizadas existe una tendencia al aumento del número de horas con humedad relativa por debajo del 30%. Los resultados presentados en este trabajo pueden coadyuvar en futuras

investigaciones orientadas a mejorar la calidad de vida de la población, en particular con sistemas de aire acondicionado que puedan mitigar los efectos del cambio climático. Estos análisis son especialmente importantes para las poblaciones con menos recursos financieros, ya que pueden orientar las inversiones, al menos, hacia lugares de uso colectivo. **Palabras claves:** Confort térmico. CDD. Humedad relativa. Análisis de datos. Minas Gerais.

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico tem propiciado ao ser humano soluções que melhoram sua qualidade de vida. Nesse contexto, percebe-se por exemplo, a melhora do conforto térmico no interior das edificações através do uso dos sistemas de climatização. O conforto térmico do ser humano no interior de uma edificação é um parâmetro importante para a qualidade de vida e desenvolvimento integral de suas capacidades. Estimativas dão conta da previsão de aumento dos sistemas de climatização, seja em virtude das mudanças climáticas (Davis e Gertler, 2015) ou da possibilidade de aquisição da tecnologia por uma maior parcela da população (IEA, 2018). Estudos analisando as perspectivas de ampliação dos sistemas de climatização são amplamente encontrados na literatura (Deroubaix et al, 2021; Mutschler et al, 2021; Andrade, Mourato e Ramos, 2021; Mehmood, et al, 2023)

Por definição, ter conforto térmico representa que uma pessoa, utilizando uma quantidade normal de roupas não tenha sensação nem de frio, nem de calor. O corpo humano atua para manter a temperatura do corpo em torno 36,9°C. Existem parâmetros ambientais que afetam o conforto térmico: (i) temperatura de bulbo seco; (ii) umidade relativa;

(iii) velocidade do ar; e (iv) temperaturas de objetos próximos. De igual modo, há parâmetros pessoais que também afetam: (i) atividade executada; e (ii) tipo de roupa utilizada. De uma forma geral, os parâmetros de controle de conforto térmico são definidos para uma condição que atenda de forma satisfatória à um número superior a 80% das pessoas. A norma brasileira NBR 16401-2 que trata de Instalações de Ar Condicionado - Sistemas Centrais e Unitários parte 2 - Parâmetros de Conforto Térmico (ABNT, 2008) estabelece que no verão as condições de conforto devem estar delimitas por: (i) temperatura operativa variando entre 22,5°C e 26°C e a umidade relativa variando entre 65% e 35%; e que (ii) a velocidade do ar para distribuição convencional não deve ultrapassar 0,2 m/s.

Diferentes trabalhos são observados na literatura no intuito de se investigar a adequação às condições de conforto térmico (Coulibaly et al, 2013; Chandrashekhar et al, 2024). Gamero-Salinas; Monge-Barrio e Sánchez-Ostiz (2020) avaliaram as condições de superaquecimento em edificações de Tegucigalpa/Honduras, localidade de clima quente e tropical. Os autores identificaram que em localidades nas quais equipamentos de ar-condicionado são menos acessíveis, o uso de telhados que tenham materiais que apresentam menores coeficientes globais de transferência de calor, estratégias de sombreamento e ventilação noturna são estratégias importantes para melhora do conforto térmico no interior das edificações. Nedel et al (2021) investigaram o conforto térmico em edificações instaladas em Pelotas/Brasil. O monitoramento indicou que de maneira geral, as condições operacionais

estavam acima das estabelecidas para o conforto térmico no período do verão e abaixo das condições adequadas no período do inverno. Um estudo complementar, realizado na mesma cidade brasileira apontou que o desconforto térmico é maior nas tardes de verão e nas noites de inverno (Da Costa Trassante et al, 2024). Mohammadpourkarbasi et al (2022) apresentaram um estudo experimental sobre o conforto térmico adaptativo em prédios de bibliotecas na cidade de Kumasi / Gana, uma localidade de clima tropical, considerando aspectos de ventilação natural e ar-condicionado. Os autores identificaram que o controle do conforto térmico garantido o cumprimento dos requisitos atuais pode estar subestimando as preferências dos ocupantes em regiões quentes e úmidas. Zhang et al. (2023) avaliaram o ar ambiente em uma sala de aula durante horas típicas de uso. Eles observaram que quando a temperatura sobe para valores próximos a 27°C os ocupantes relatam insatisfação com o conforto térmico. Os autores observam ainda que nessas condições é preciso aumentar as taxas de renovação de ar.

Características relacionadas a saúde, produtividade e aprendizagem também estão relacionada as condições internas da edificação. Wolkoff (2024) destaca a importância da manutenção da umidade do ar no interior das edificações entre 40 e 60%. O autor reforça que quando a umidade relativa está abaixo dessa faixa ocorrem problemas de ressecamento dos olhos e vias aéreas, redução na defesa imunológica e menor produtividade no trabalho. A literatura também aponta que valores altos de umidade relativa causam desconforto térmico

(Watanabe et al, 2024). Ma et al (2023) reforça a importância da temperatura ambiente e umidade relativa no processo de aprendizado.

Como apresentado, as condições de conforto térmico no ambiente são parâmetros importantes para o bom desenvolvimento e qualidade de vida do ser humano. Apesar de existirem trabalhos que analisam as condições de conforto térmico para o clima brasileiro (Nedel et al, 2021; Da Costa Trassante et al, 2024), as discussões estão bastante localizadas. Diante disso, o presente trabalho busca analisar a partir de dados meteorológicos as condições de conforto térmico para as diversas regiões do estado de Minas Gerais, o que não foi identificado na literatura. Serão utilizados dados horários entre os anos de 2003 e 2024 e realizadas análises de: (i) temperatura média anual, temperatura máxima anual e temperatura mínima anual; (ii) análise de quantidade horas no ano em que a umidade relativa está abaixo de 30%; (iii) cálculo de CDD (*cooling degree days*) e HDD (*heating degree days*); e (iv) e análise de conforto térmico por meio do parâmetro ASHRAE “y”.

2. Metodologia

O estado de Minas Gerais, objeto de estudo desse trabalho, está dividido em dez regiões como apresenta a Figura 1. Para cada uma das regiões foi selecionada uma cidade para a qual os dados climáticos foram obtidos e analisados. Informações principais sobre as cidades escolhidas estão apresentadas na Tabela 1. Os dados climáticos das cidades foram obtidos no site do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

(INMET, 2025). No site estão disponíveis dados climáticos desde o ano 2000. Entretanto, as cidades foram sendo incorporadas ano a ano. A análise aqui apresentada considera somente os anos cujos dados estão disponíveis desde o dia 01 de janeiro para a cidade analisada.

A metodologia utilizada no presente trabalho está apresentada na Figura 2. O primeiro bloco refere-se aos dados disponibilizados pelo INMET. São disponibilizados dados climáticos para cada cidade analisada a cada hora do ano considerado. Para esse estudo foram utilizados como entrada: (a) data; (b) hora; (c) temperatura do ar – bulbo seco, horária; (d) temperatura máxima do ar na hora; (e) temperatura mínima do ar na hora; (f) umidade relativa do ar, horária.

Figura 1 – Regiões do Estado de Minas Gerais.
Minas Gerais (2025).

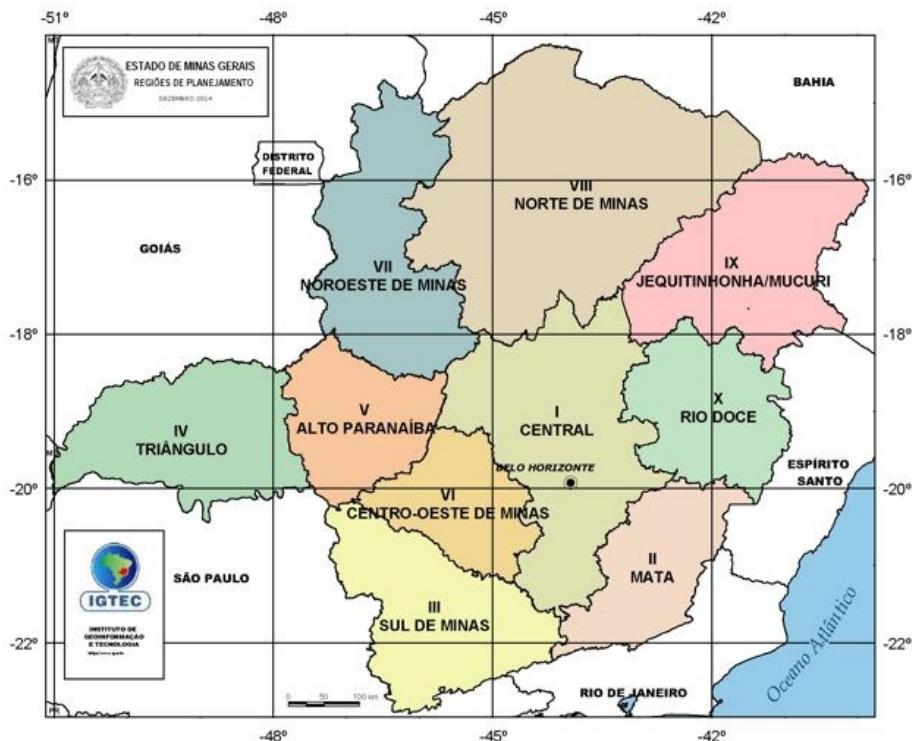


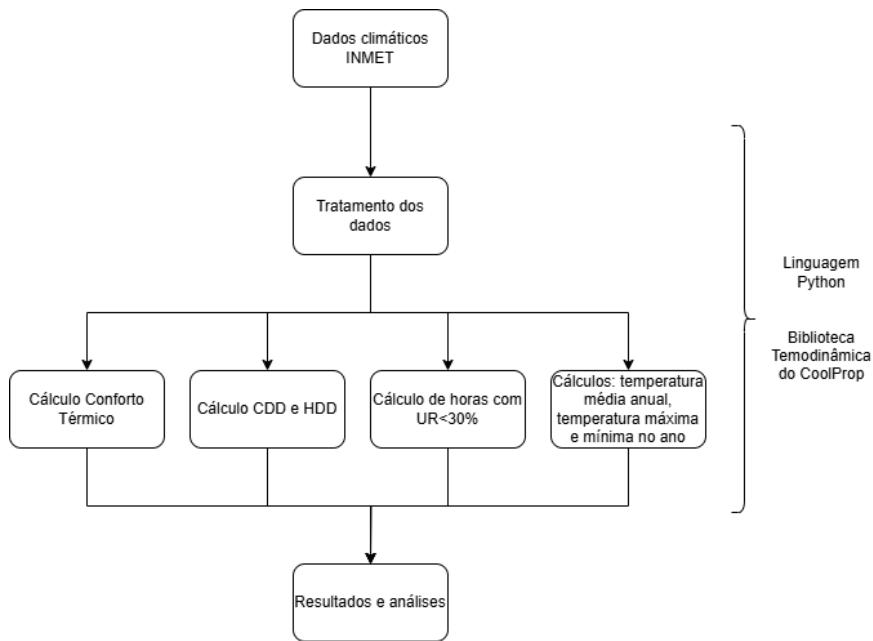
Tabela 1 – Cidades selecionadas por região.
IBGE (2025).

Região	Cidade Representativa	População	Período de dados disponíveis
Central	Ibirité	170.537	2009-2024
Zona da Mata	Juiz de Fora	540.756	2008-2024
Sul de Minas	Varginha	136.467	2007-2024
Triângulo Mineiro	Uberlândia	713.224	2003-2024
Alto Paranaíba	Patos de Minas	159.235	2018-2024
Centro-oeste de Minas	Divinópolis	231.091	2018-2024
Noroeste de Minas	Paracatu	94.023	2019-2024
Norte de Minas	Montes Claros	414.240	2003-2024
Jequitinhonha / Mucuri	Teófilo Otoni	137.418	2007-2024

Rio Doce	Governador Valadares	2008-2024 257.171
----------	-------------------------	----------------------

Ocorre, porém, que alguns dos dados de entrada apresentam erros, esses valores são identificados no arquivo como “-9999”. Objetivando desconsiderar esses valores, os seguintes filtros foram aplicados: (a) temperaturas devem variar entre -50°C e 50°C; (b) umidade relativa deve variar entre 0% e 100%. O que está aqui apresentado refere-se ao segundo bloco da Figura 2. Os blocos seguintes referem-se aos cálculos que serão apresentados nas próximas seções. Para facilitar o tratamento de dados foi desenvolvido um código em Linguagem *Python*. As propriedades termodinâmicas necessárias foram obtidas através do uso da biblioteca *CoolProp*. Para possibilitar uma análise mais rápida foi considerada que a condição do ambiente interno será a mesma do ambiente externo.

Figura 2 – Quadro metodológico deste estudo.



2.1. Cálculo do conforto térmico

A análise do conforto térmico foi realizada através do parâmetro “y”. Esse parâmetro foi apresentado pela ASHRAE (2017) por meio de equações de regressão de forma a representar a sensação térmica para diferentes grupos (homens, mulheres e ambos) em diferentes tempos de exposição (1 hora, 2 horas ou 3 horas). A Equação 1 será utilizada para cálculo do parâmetro “y”, ela considerada o grupo ambos para um tempo de exposição de 2 horas. A relação entre os valores de y e a sensação térmica são observados na Tabela 2.

$$y = 0,252 \times T + 0,24 \times P - 6,859 \quad (1)$$

Onde T é a temperatura de bulbo seco em °C e P é a pressão parcial do vapor de água em kPa. A pressão parcial de vapor é calculada pela Equação 2.

$$P = RH \times P_{sat} \quad (2)$$

Onde RH é a umidade relativa e P_{sat} é a pressão de saturação da água na temperatura de bulbo seco do ar, medida em kPa.

Tabela 2 – Escala de sensação térmica.
ASHRAE (2017).

Valor de y	Faixa de y considerada na análise	Sensação Térmica
+3	$y > 3$	Muito Quente
+2	$2 < y < 3$	Quente
+1	$1 < y < 2$	Levemente Quente
0	$0 < y < 1$ e $-1 < y < 0$	Neutro
-1	$-2 < y < -1$	Levemente frio
-2	$-3 < y < -2$	Frio
-3	$y < -3$	Muito frio

2.2. Cálculo do CDD e HDD

O CDD (*cooling degree days*) mede a necessidade de resfriamento indicando quantos graus por dia uma localidade acumula acima de uma temperatura de base. Por sua vez, o HDD (*heating degree days*) é um indicador utilizado para estimar a necessidade de aquecimento em uma determinada região ao longo do tempo. De forma geral, o período estabelecido para os cálculos de CDD e HDD é de um ano. Os cálculos do CDD e HDD são apresentados nas Equação 3 e 4, respectivamente (Işık; İnalli; Celik, 2019).

$$CDD = \sum_{dias} (T_{med} - T_b)^+ \quad (3)$$

$$HDD = \sum_{dias} (T_b - T_{med})^+ \quad (4)$$

Onde T_b representa a temperatura de referência. Para o trabalho 18°C, a definição dessa temperatura de base é um ponto sensível dessa análise (Krese, Prek e Butala, 2012; Bhatnagar, Mathur e Garg, 2018). T_{med} é a média entre a temperatura máxima ($T_{max,d}$) e mínima ($T_{min,d}$) observada no dia, e é calculada através da Equação 5, ambos os valores °C. O sinal positivo nas Equações 3 e 4, representa que somente os valores maiores que zero são considerados no somatório.

$$T_{med} = \frac{T_{max,d} - T_{min,d}}{2} \quad (5)$$

2.3. Avaliação da umidade relativa do ar e temperaturas

Umidades relativas muito baixas podem acarretar diversos problemas ao ser humano, tais como: (a) ressecamento das vias respiratórias (Takada, 2020); (b) ressecamento da pele e lábios (Engebretsen et al, 2016); (c) irritação dos olhos (Chlasta-Twardzik et

al, 2021); (d) aumento da propagação de vírus (Arundel et al, 1986; Wolkoff, 2024); (e) sensação de desconforto térmico (Liu et al, 2021; Watanabe et al, 2024); (f) redução de produtividade no trabalho (Wolkoff, 2024); e (g) ocasionar dificuldades no processo de aprendizado (Ma et al, 2023). Nesse sentido, um dos pontos de análise desse trabalho refere-se à avaliação de umidades relativas abaixo de 30%. Para cada ano, em cada cidade, foram contabilizadas quantas horas havia ocorrência dessa situação, como apresenta a Equação 6.

$$NºHorasUR < 30\% = \sum_{ano} HorasUR < 30\% \quad (6)$$

Outros parâmetros observados no trabalho foram: (a) temperatura média anual ($T_{med,ano}$) por cidade, através da Equação 7; (b) temperatura máxima ($T_{max,ano}$) observada no ano na cidade, pela Equação 8 e; (c) temperatura mínima ($T_{min,ano}$) observada no ano na cidade, por meio da Equação 9.

$$T_{med,ano} = \frac{\sum_{i=1}^n T}{n} \quad (7)$$

Onde n é o número total de horas com medições válidas no ano para a cidade analisada.

$$T_{max,ano} = \max(T) \quad (8)$$

$$T_{min,ano} = \min(T) \quad (9)$$

3. Resultados

De forma a possibilitar uma avaliação das condições de conforto térmicos nas cidades analisadas serão apresentadas na seção os cálculos da temperatura média anual, temperatura máxima e mínima anual, número do CDD, número de dias com umidade relativa abaixo de 30% e somatório de horas em cada faixa de “y”.

A temperatura média anual e as temperaturas máxima e mínima anual são apresentadas nas Figuras 3 e 4. Na Figura 3 para as cidades de Varginha, Uberlândia, Montes Claros, Teófilo Otoni e Governador Valadares. Por sua vez, na Figura 4 para as cidades de Ibirité, Juiz de Fora, Patos de Minas, Divinópolis e Paracatu. Para todas as cidades analisadas observa-se uma curva de tendência de aumento da temperatura média anual. No que se refere a temperatura máxima anual também se observa uma curva de tendência de aumento, exceto para Paracatu. Quanto a temperatura mínima anual, verifica-se tendências menos homogêneas: (i) redução para as cidades de Uberlândia e Varginha; (ii) aumento para as cidades de Divinópolis, Governador Valadares, Montes Claros, Patos de Minas, Paracatu e Teófilo Otoni; e (iii) de estabilidade para Ibirité e Juiz de Fora.

Cabe ainda menção que das 10 cidades analisadas, 7 apresentaram as maiores médias anuais de temperatura no ano de 2024. As exceções são as cidades de Montes Claros (2015), Paracatu (2023) e Teófilo Otoni (2021). Quando analisamos a temperatura máxima anual, observa-se 7 ocorrências no ano de 2023. As exceções são as cidades de Montes Claros, Patos de Minas e Uberlândia, ambas para o ano de 2020. Por fim, a análise da temperatura mínima anual indica o ano de 2022 como o de maior ocorrência, representando 6 cidades. As exceções são as cidades de Divinópolis (2021), Juiz de Fora (2021), Uberlândia (2015) e Varginha (2021). Observa-se também que a amplitude entre a máxima e mínima anual tem tendência de aumento em 8 das 10 cidades analisadas, as exceções são Paracatu e Teófilo Otoni.

Para avaliação da umidade relativa foi criado um filtro identificando a quantidade de horas nas quais ela foi menor ou igual a 30%, os dados estão apresentados na Figura 5. A curva de tendência mostra uma expectativa de aumento do número de horas com umidade relativa abaixo de 30% para as cidades de Divinópolis, Ibirité, Governador Valadares, Montes Claros, Patos de Minas, Teófilo Otoni, Uberlândia e Varginha. Por sua vez, em Juiz Fora observa-se estabilidade e em Paracatu redução da quantidade de horas com umidade relativa abaixo de 30%. Observa-se que na maioria das cidades o ano de 2024 foi o que apresentou o maior número de horas com umidade relativa abaixo de 30%. Exceções ocorrem em Governo Valadares (2015), Montes Claros (2023), Paracatu (2021) e Teófilo Otoni (2015). Os maiores números absolutos são identificados em Montes Claros e Uberlândia. No

ano de maior ocorrência, 14% e 12% do total de horas anuais, respectivamente. Faz-se importante uma avaliação posterior para identificar se essa ocorrência horária está estratificada ao longo do ano ou se ocorre de forma concentrada em um turno / período específico.

No intuito de avaliar a demanda por climatização nas diferentes cidades o cálculo do número de CDD foi realizado. Os dados obtidos são exibidos na Figura 6 para as cidades de Varginha, Uberlândia, Montes Claros, Teófilo Otoni e Governador Valadares e na Figura 7 para as cidades de Ibirité, Juiz de Fora, Patos de Minas, Divinópolis e Paracatu. Os maiores valores de CDD foram observados nos anos de 2023 e 2024, com 4 cidades no primeiro ano (Governador Valadares, Montes Claros, Paracatu e Teófilo Otoni) e 6 cidades no segundo ano destacado (Divinópolis, Ibirité, Juiz de Fora, Patos de Minas, Uberlândia e Varginha). Se olharmos os últimos dois anos os maiores valores médios são observados na cidade de Governador Valadares, Paracatu e Montes Claros com 2716, 2526 e 2509 respectivamente. Observa-se ainda uma tendência de alta no número de CDD para todas as cidades analisadas.

Figura 3 – Temperatura média anual, temperaturas máxima e mínima anual para Varginha, Uberlândia, Montes Claros, Teófilo Otoni e Governador Valadares.

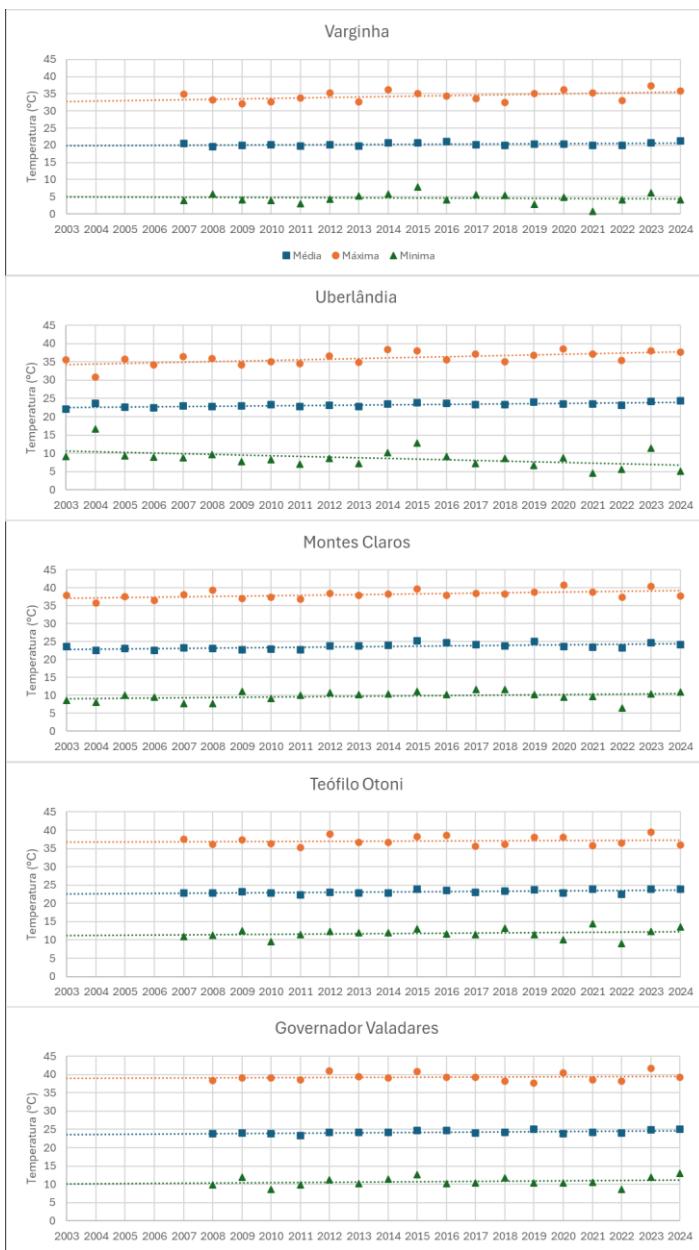


Figura 4 – Temperatura média anual, temperaturas máxima e mínima anual para Ibirité, Juiz de Fora, Patos de Minas, Divinópolis e Paracatu.

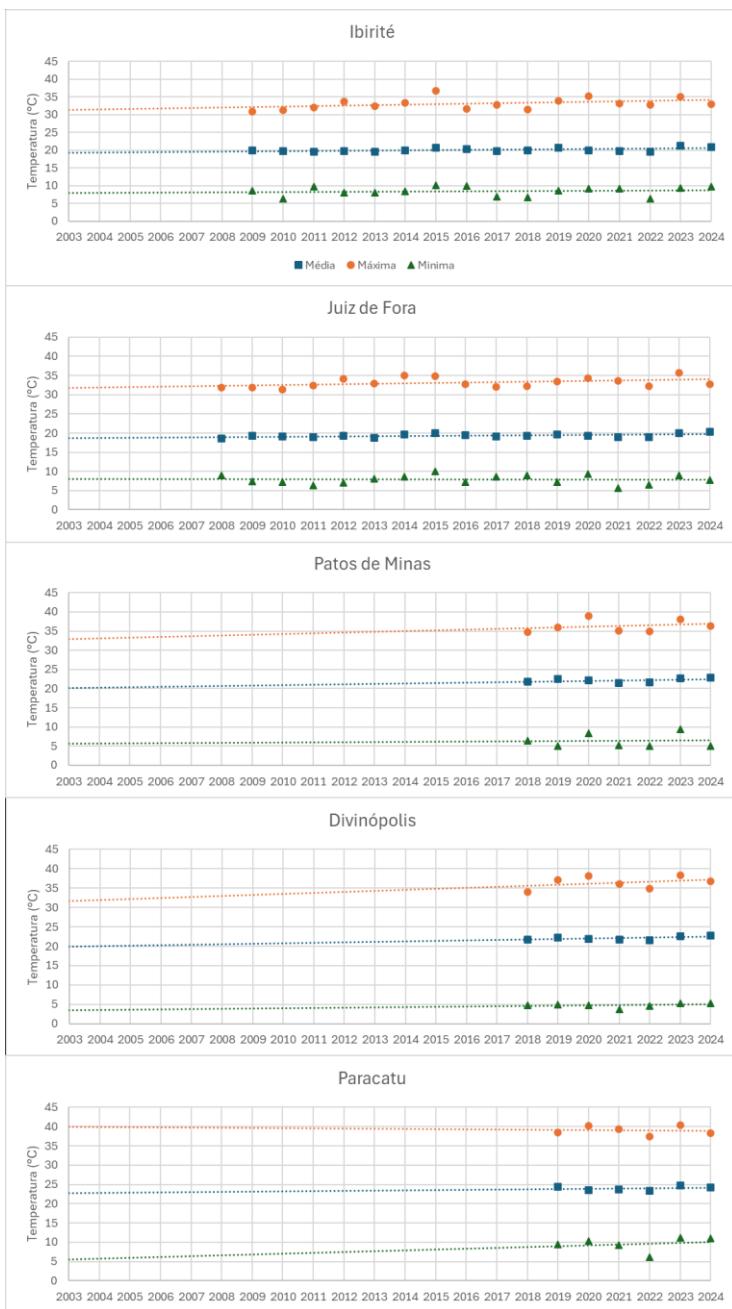


Figura 5 – Número de horas no ano com umidade relativa abaixo de 30%.

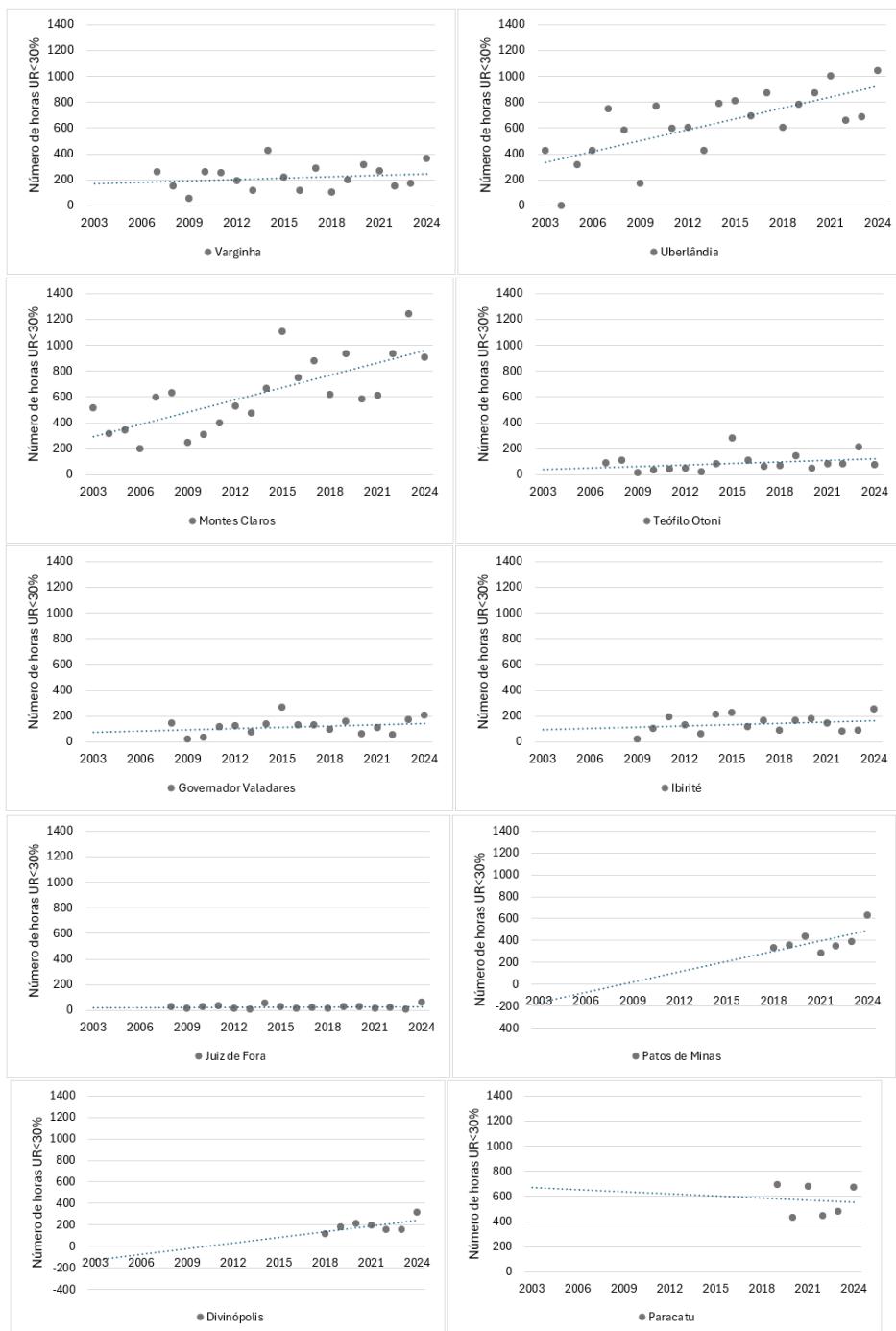


Figura 6 – Número de CDD para Varginha, Uberlândia, Montes Claros, Teófilo Otoni e Governador Valadares.

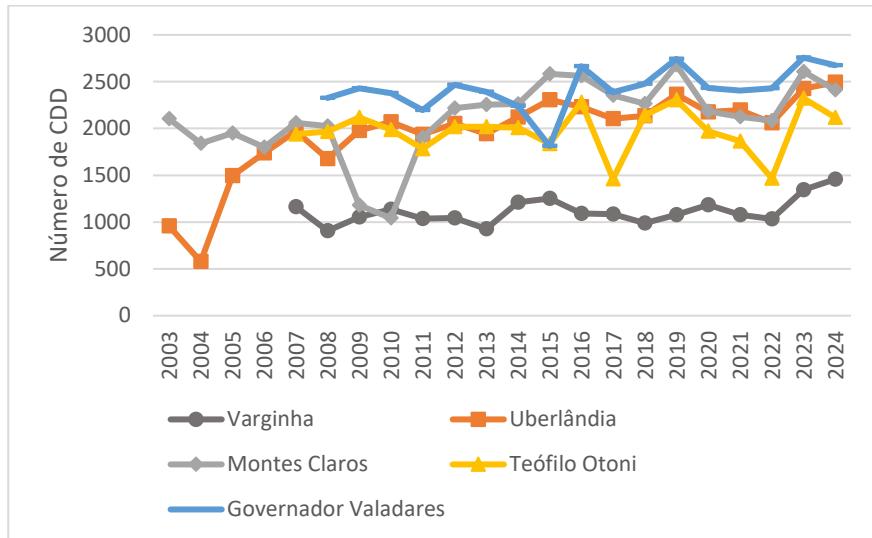
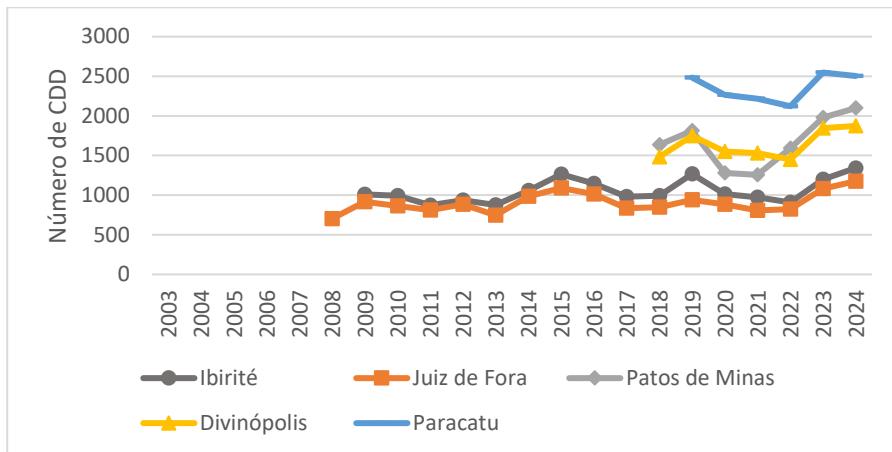


Figura 7 – Número de CDD Ibirité, Juiz de Fora, Patos de Minas, Divinópolis e Paracatu.



A última análise realizada deu-se em relação às faixas do parâmetro de conforto térmico “y”. Os valores observados estão nas Figuras 8 (Divinópolis), 9 (Ibirité), 10 (Governador Valadares), 11 (Juiz de Fora), 12 (Montes Claros), 13 (Paracatu), 14 (Patos de Minas), 15 (Teófilo Otoni), 16 (Uberlândia) e 17 (Varginha). Nessas figuras é possível observar quais faixas de “y” tiveram maior incidência percentual ao longo dos anos. De forma complementar, uma análise percentual para o ano de 2024 é apresentada na Tabela 3. Nela observa-se que a maioria dos pontos está concentrada na faixa de sensação neutra ($-1 < y < 1$). Como destaques nas outras faixas identifica-se uma ocorrência importante da sensação quente nas cidades de Divinópolis, Governador Valadares, Montes Claros, Teófilo Otoni e Uberlândia. Análises posteriores podem ser realizadas para identificar se essa ocorrência está concentrada em uma faixa de horário específica, se ela está bem diluída ao longo do ano ou concentrada em alguma estação. Essa análise pode sugerir a importância de uso dos sistemas de climatização nas referidas

cidades de forma a melhorar a sensação de conforto térmico da população. Indicativos de sistemas de climatização com baixo impacto ambiental (Paulino, Duarte e Oliveira, 2023) e reduzido consumo energético (Haase e Amato, 2009) devem ser analisados nesse sentido. Por outro lado, em todas as cidades analisadas observa-se a ocorrência de sensação térmica de frio (levemente frio, frio e/ou muito frio), evidenciado por valores de “y” na faixa negativa. O que pode indicar para algumas cidades a ocorrência de um clima mais temperado. Cabe ainda analisar se essa ocorrência está concentrada em uma faixa de horário específica, se ela está bem diluída ao longo do ano ou concentrada em alguma estação. De maneira análoga essa análise pode sugerir a instalação de sistemas de climatização para aumentar o conforto térmico. A análise do HDD, pela equação 4, sugere que a demanda de aquecimento é baixa, apesar da sensação de desconforto. Por serem menos representativos para as cidades analisadas, os valores de HDD não foram apresentados em sua totalidade. Os maiores valores de HDD observados são 263,1 (Juiz de Fora, 2011), 135,8 (Varginha, 2011) e 125,3 (Patos de Minas, 2020).

Figura 8 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Divinópolis.

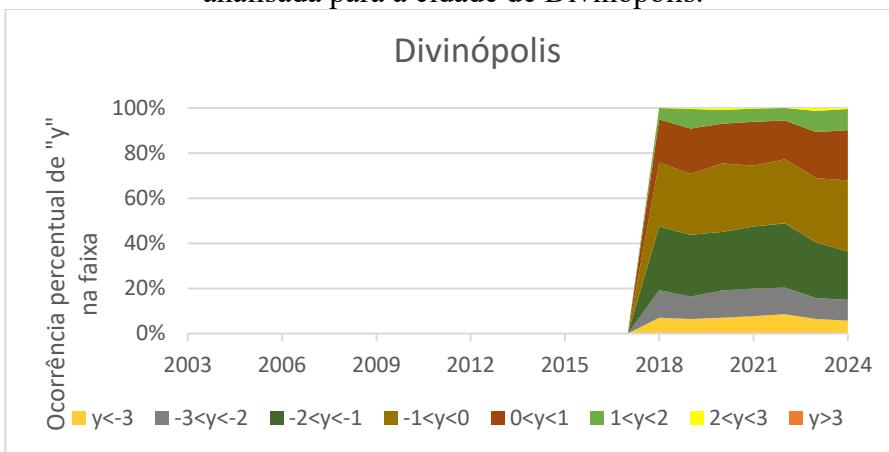


Figura 9 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Ibirité.

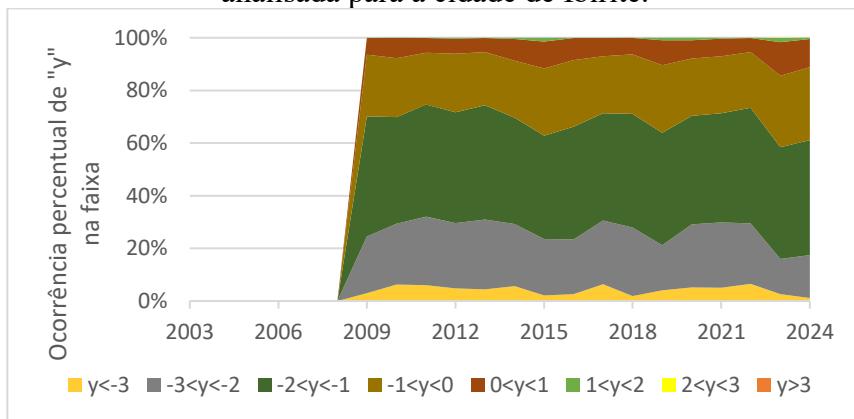


Figura 10 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Governador Valadares.

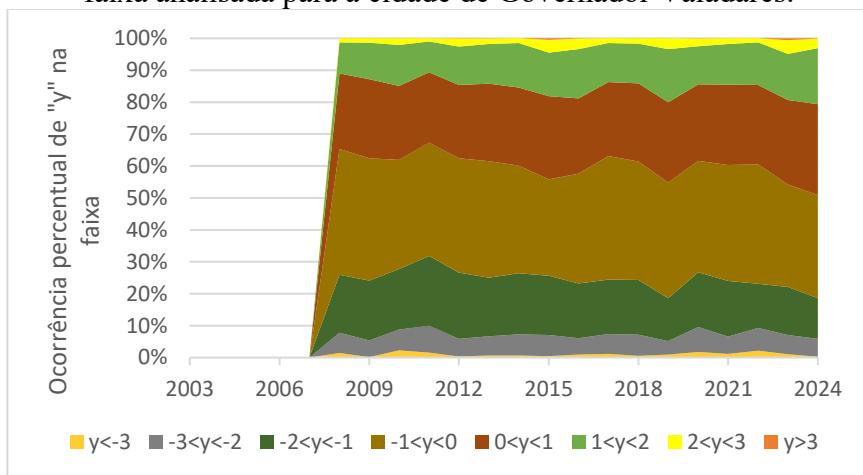


Figura 11 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Juiz de Fora.

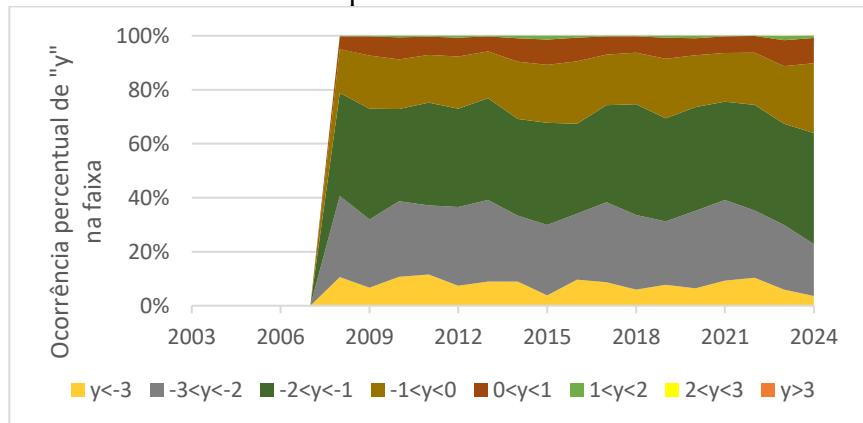


Figura 12 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Montes Claros.

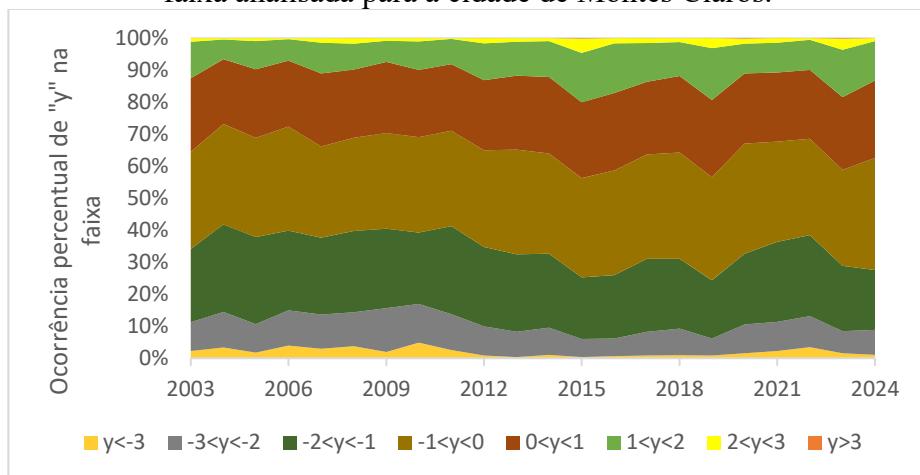


Figura 13 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Paracatu.

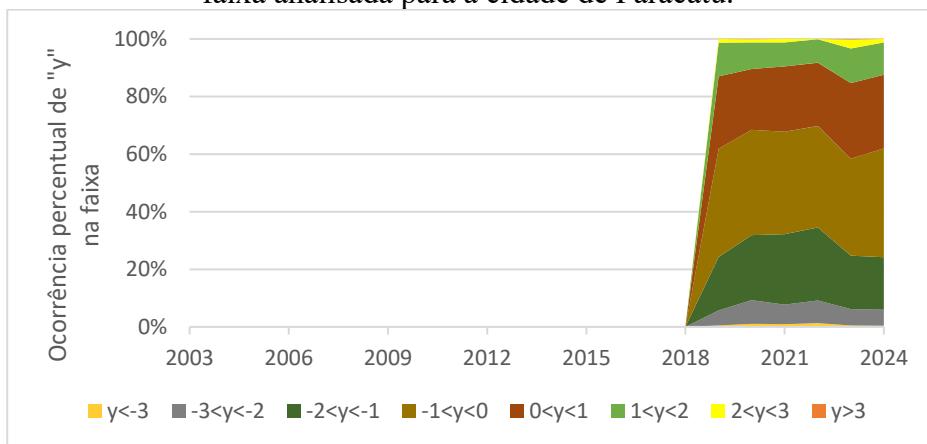


Figura 14 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Patos de Minas.

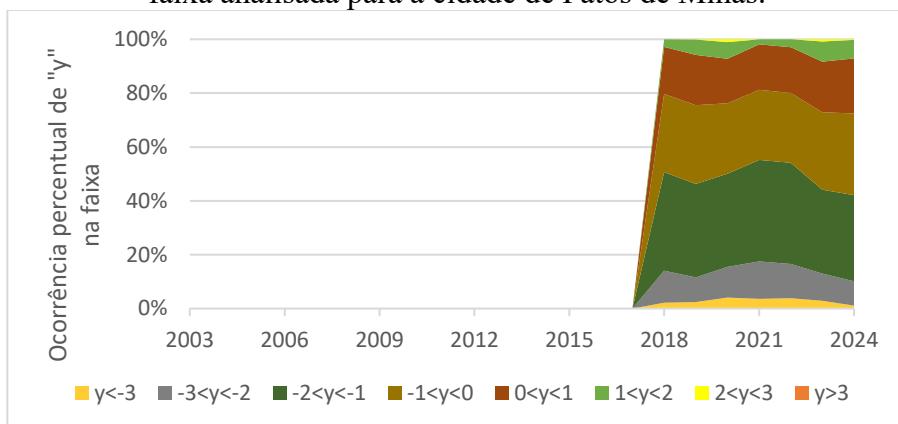


Figura 15 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Teófilo Otoni.

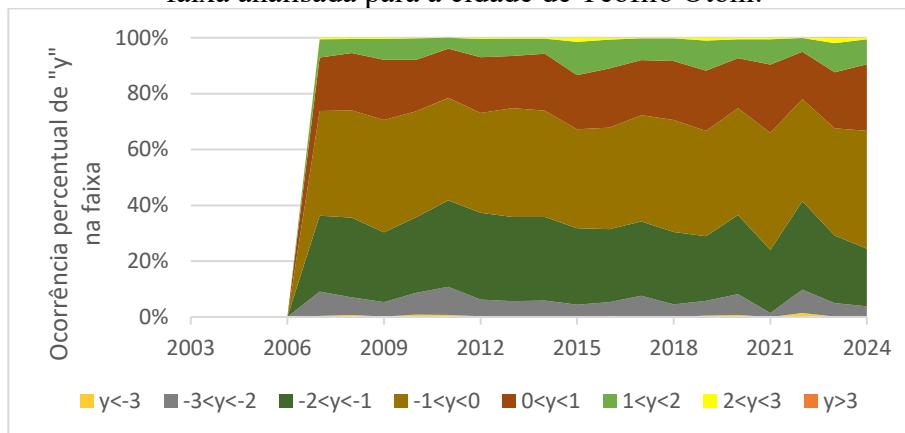


Figura 16 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Varginha.

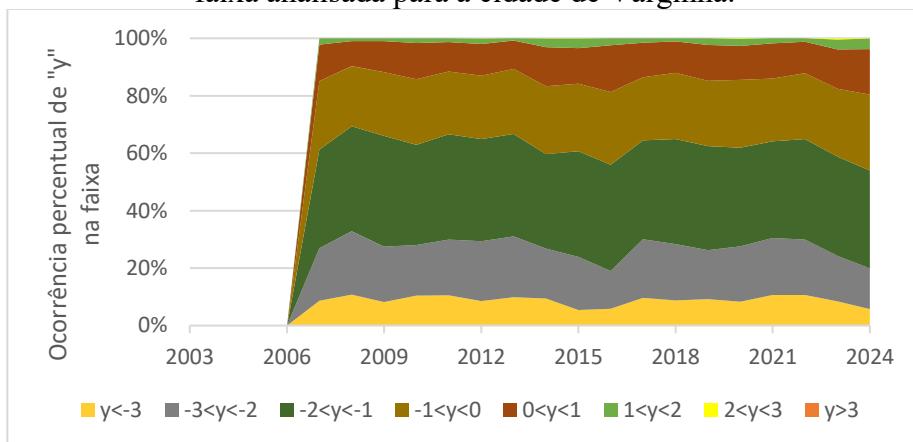
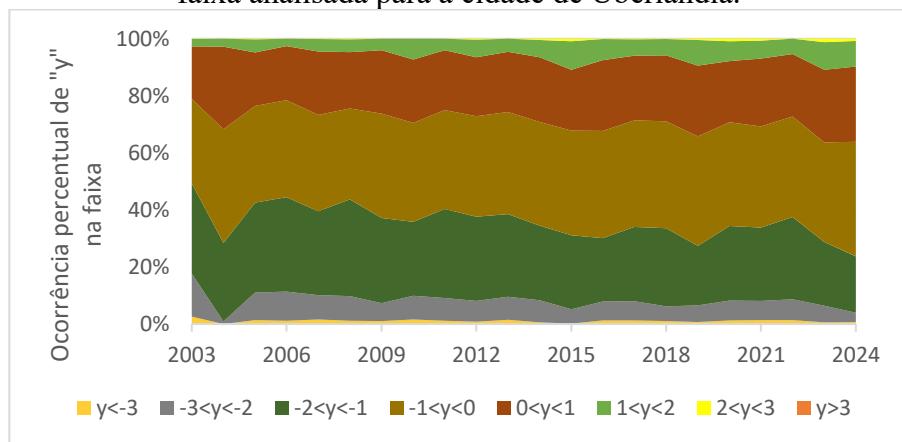


Figura 17 – Número de horas com ocorrência do parâmetro “y” na faixa analisada para a cidade de Uberlândia.



Cabe ainda observar que os dados obtidos pelo CDD podem ser muito úteis para geração de estimativas de consumo energético associado aos sistemas de climatização (Krese, Prek e Butala, 2012; Moustris, et al, 2015). Dados esses que permitem análises de previsão do consumo de

energia elétrica nesses sistemas (atual e futuro) bem como do impacto ambiental resultante do uso desses sistemas.

Tabela 3 – Percentual de ocorrência horária na escala de sensação térmica no ano de 2024 para as cidades analisadas.

Cidade	Divinópolis	Ibirité	Governador Valadares	Juiz de Fora	Montes Claros
$y>3$	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
$2\leq y < 3$	0,4%	0,0%	3,0%	0,0%	0,9%
$1\leq y < 2$	9,4%	0,5%	17,5%	0,8%	12,3%
$0\leq y < 1$	22,2%	10,7%	28,5%	9,3%	24,2%
$-1\leq y < 0$	31,5%	27,7%	32,3%	25,9%	35,1%
$-2\leq y < -1$	21,4%	43,6%	12,7%	41,1%	18,7%
$-3\leq y < -2$	9,1%	16,3%	5,7%	19,2%	7,8%
$y \leq -3$	5,8%	1,1%	0,2%	3,6%	1,0%
Cidade	Paracatu	Patos de Minas	Teófilo Otoni	Uberlândia	Varginha
$y>3$	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
$2\leq y < 3$	1,2%	0,2%	0,6%	0,8%	0,1%
$1\leq y < 2$	11,2%	6,8%	8,8%	9,0%	3,7%
$0\leq y < 1$	25,6%	20,6%	23,9%	26,3%	15,8%
$-1\leq y < 0$	37,8%	30,2%	42,2%	40,2%	26,5%
$-2\leq y < -1$	18,2%	32,0%	20,6%	19,8%	34,1%
$-3\leq y < -2$	5,6%	9,0%	3,8%	3,3%	14,2%
$y \leq -3$	0,4%	1,1%	0,0%	0,7%	5,8%

4. Conclusão

No presente realizou-se uma análise de conforto térmico de 10 cidades do estado de Minas Gerais, sendo uma cidade representativa para cada região. Foram utilizados dados meteorológicos disponibilizados

pelo INMET entre os anos de 2003 e 2024. As análises consistiram em avaliar: (i) as temperaturas média, máxima e mínima; (ii) a quantidade horas no ano em que a umidade relativa está abaixo de 30%; (iii) o cálculo de CDD; e (iv) o conforto térmico por meio do parâmetro ASHRAE “y”. As principais conclusões obtidas com o trabalho são:

- Há uma tendência de aumento da temperatura média anual em todas as cidades e em sete das dez analisadas, a maior média anual foi observada em 2024;
- Identificou-se uma tendência de aumento da temperatura máxima anual, o que foi observado em nove das dez cidades analisadas. Cabe ainda mencionar que a amplitude entre a máxima e mínima anual tem tendência de aumento em oito das dez cidades analisadas.
- Há ainda uma tendência de aumento do número de horas com umidade relativa abaixo dos 30%, o que foi identificado em oito das cidades analisadas. O maior valor foi observado na cidade de Uberlândia, no ano de 2023, onde em mais de 14% das horas do ano essa ocorrência foi registrada;
- Por fim, há também uma tendência de alta no número de CDD para todas as cidades analisadas. O CDD médio nos anos de 2023 e 2024 variou entre 1128 e 2176. O maior valor anual de CDD, 2757, foi registrado em Governador Valadares no ano de 2023.

Os resultados obtidos através deste trabalho indicam que as mudanças climáticas têm reduzido as condições de conforto térmico nas

cidades analisadas. Sugere-se que os estudos sejam ampliados de forma a identificar se as condições de maior criticidade estão diluídas ao longo do ano ou se estão concentradas em um período específico. Além disso, estudos de alternativas de sistemas de climatização devem ser implementadas de forma a atenuar os efeitos das mudanças climáticas. Deve-se observar nesse sentido soluções que consigam garantir que a temperatura esteja dentro dos parâmetros de conforto estabelecidos sem resultar em redução da umidade relativa do ar. Essas análises são especialmente relevantes para as populações com menos recursos financeiros, pois podem orientar os investimentos, ao menos, para os espaços de uso coletivo.

Referências Bibliográficas

ABNT. Instalações de Ar Condicionado-Sistemas Centrais e Unitários parte 2 - Parâmetros de Conforto Térmico. Projeto das Instalações. NBR 16401-2, 2008.

ANDRADE, Cristina; MOURATO, Sandra; RAMOS, João. Heating and cooling degree-days climate change projections for Portugal. *Atmosphere*, v. 12, n. 6, p. 715, 2021.

ARUNDEL, Anthony V. et al. Indirect health effects of relative humidity in indoor environments. *Environmental health perspectives*, v. 65, p. 351-361, 1986.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. ASHRAE Handbook – Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2017.

BHATNAGAR, Mayank; MATHUR, Jyotirmay; GARG, Vishal. Determining base temperature for heating and cooling degree-days for India. *Journal of Building Engineering*, v. 18, p. 270-280, 2018.

CHANDRASHEKAR, Rakesh et al. Thermal comfort and heat flow characteristics of hybrid cooling systems for studio type classrooms: An experimental study. *Energy and Buildings*, v. 316, p. 114316, 2024.

CHLASTA-TWARDZIK, Edyta et al. The influence of work environment factors on the ocular surface in a one-year follow-up prospective clinical study. **Diagnostics**, v. 11, n. 3, p. 392, 2021.

COULIBALY, Ousmane et al. Thermal performances of a bioclimatic building in hot and dry tropical climate. **Journal of Renewable Energies**, v. 16, n. 3, p. 585–597-585–597, 2013.

DA COSTA TRASSANTE, Franciele et al. Analysis of thermal discomfort associated with synoptic conditions in the city of Pelotas, southernmost region of Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 3, p. 463-477, 2024.

DAVIS, Lucas W.; GERTLER, Paul J. Contribution of air conditioning adoption to future energy use under global warming. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 19, p. 5962-5967, 2015.

DEROUBAIX, Adrien et al. Large uncertainties in trends of energy demand for heating and cooling under climate change. **Nature communications**, v. 12, n. 1, p. 5197, 2021.

ENGEBRETSEN, K. A. et al. The effect of environmental humidity and temperature on skin barrier function and dermatitis. **Journal of the European Academy of Dermatology and Venereology**, v. 30, n. 2, p. 223-249, 2016.

GAMERO-SALINAS, Juan Carlos; MONGE-BARRIO, Aurora; SÁNCHEZ-OSTIZ, Ana. Overheating risk assessment of different dwellings during the hottest season of a warm tropical climate. **Building and Environment**, v. 171, p. 106664, 2020.

HAASE, M.; AMATO, A. An investigation of the potential for natural ventilation and building orientation to achieve thermal comfort in warm and humid climates. **Solar energy**, v. 83, n. 3, p. 389-399, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades e Estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 16 abril 2025.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Portal de dados meteorológicos*. Brasília: INMET, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 16 abril 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning*. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 1 maio 2025.

IŞIK, Erdem; İNALLI, Mustafa; CELİK, Erkan. ANN and ANFIS approaches to calculate the heating and cooling degree day values: The case of provinces in Turkey. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 44, p. 7581-7597, 2019.

KRESE, Gorazd; PREK, Matjaž; BUTALA, Vincenc. Analysis of building electric energy consumption data using an improved cooling degree day method. **Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering**, v. 58, n. 2, p. 107-114, 2012.

LIU, Chao et al. Influence of indoor air temperature and relative humidity on learning performance of undergraduates. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, p. 101458, 2021.

MA, Xidong et al. How does indoor physical environment differentially affect learning performance in various classroom types?. **Building and Environment**, v. 234, p. 110189, 2023.

MEHMOOD, Sajid et al. Integrating latent load into the cooling degree days concept for current and future weather projections. **Buildings**, v. 14, n. 1, p. 106, 2023.

MINAS GERAIS. Governo do Estado de Minas Gerais. Geografia de Minas Gerais. Disponível em: <https://www.mg.gov.br/pagina/geografia>. Acesso em: 16 abril 2025.

MOHAMMADPOURKARBASI, Haniyeh et al. Evaluation of thermal comfort in library buildings in the tropical climate of Kumasi, Ghana. **Energy and Buildings**, v. 268, p. 112210, 2022.

MOUSTRIS, K. P. et al. Energy consumption based on heating/cooling degree days within the urban environment of Athens, Greece. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 122, p. 517-529, 2015.

MUTSCHLER, Robin et al. Benchmarking cooling and heating energy demands considering climate change, population growth and cooling device uptake. **Applied Energy**, v. 288, p. 116636, 2021.

NEDEL, Anderson Spohr et al. Analysis of indoor human thermal comfort in Pelotas municipality, extreme southern Brazil. **International Journal of Biometeorology**, v. 65, n. 3, p. 419-428, 2021.

PAULINO, Tiago Freitas; DUARTE, Willian Moreira; OLIVEIRA, Everthon Souza. Energia Térmica Residencial: Alternativas para o aumento da eficiência energética e redução do impacto ambiental. **Pesquisas em Humanismo Solidário**, v. 3, p. 131-154, 2023.

TAKADA, Satoru. Influence of temperature and humidity of ambient air on sensation of dryness during respiration. **Journal of the Human-Environment System**, v. 23, n. 1, p. 31-43, 2020.

WATANABE, Hironori et al. Mechanism underlying the influence of humidity on thermal comfort and stress under mimicked working conditions. **Physiology & Behavior**, v. 285, p. 114653, 2024.

WOLKOFF, Peder. Indoor air humidity revisited: Impact on acute symptoms, work productivity, and risk of influenza and COVID-19 infection. **International journal of hygiene and environmental health**, v. 256, p. 114313, 2024.

ZHANG, Xiaojing et al. Association of indoor temperature and air quality in classrooms based on field and intervention measurements. **Building and Environment**, v. 229, p. 109925, 2023.