XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

# POTENCIAL BIOCLIMÁTICO EM CENÁRIOS DE AQUECIMENTO GLOBAL: ESTUDO DE CASO PARA CLIMA TROPICAL CONTINENTAL

**Emeli Lalesca Aparecida da Guarda (1); Luciane Cleonice Durante (2); Ivan Julio Apolonio Callejas (3); Karyna de Andrade Carvalho Rosseti (4); Flávia Maria de Moura Santos (5); Martin Ordenes Mizgier (6).**

(1) Mestre, Arquiteta e Urbanista, emeliguarda@gmail.com, Universidade Federal de Mato Grosso
(2) Doutora, Engenheira Civil, luciane.durante@hotmail.com, Universidade Federal de Mato Grosso
(3) Doutor, Engenheira Civil, ivancallejas1973@gmail.com, Universidade Federal de Mato Grosso
(4) Doutora, Arquiteta e Urbanista, karyna.rosseti@gmail.com, Universidade Federal de Mato Grosso
(5) Doutora, Arquiteta e Urbanista, flavia_mms@hotmail.com, Universidade Federal de Mato Grosso
(6) Doutor, Engenheiro Civil, martin.ordenes@ufsc.br, Universidade Federal de Santa Catarina
Universidade Federal de Mato Grosso, Av. Fernando Corrêa da Costa, 2367 - Boa Esperança, Cuiabá - MT, 78060-900, +55 (65) 3615-8599

## RESUMO

Pesquisas científicas evidenciam o aumento progressivo da temperatura média terrestre. Embora esse fato encontre opositores, se reconhece, para realização deste estudo, que as mudanças climáticas são um desafio-chave global para o século XXI para a comunidade científica internacional. Assim, este trabalho tem por objetivo investigar o potencial bioclimático da cidade de Cuiabá-MT, considerando o cenário de emissões A2 do Quarto Relatório do IPCC. Os procedimentos metodológicos consistem em elaboração dos arquivos climáticos futuros; caracterização climática do local de estudo e determinação do potencial bioclimático por meio das cartas psicrométricas dos cenários base (1961-1990) e futuros (2020, 2050 e 2080). Os resultados evidenciam que a temperatura média do ar irá aumentar em 21,5% e a umidade relativa média do ar diminuir em 22% no cenário de 2080, ambos em relação ao cenário base. As estratégias passivas mais suscetíveis aos efeitos do aquecimento global serão a ventilação e o condicionamento artificial. A estratégia de condicionamento artificial apresentou aumento expressivo do cenário base para o de 2080: de 9 para 54% das horas anuais e, com consequentemente redução da estratégia de ventilação, de 56% no cenário base, para 21% em 2080. Assim, destaca-se que a investigação do potencial bioclimático frente às projeções climáticas futuras torna-se um importante um instrumento visando tornar as edificações resilientes frente aos efeitos do aquecimento global.
Palavras-chave: mudanças climáticas, arquitetura bioclimática, resiliência das edificações.

## ABSTRACT

Scientific research shows a progressive increase in the Earth's temperature. Although this fact meets opponents, it is recognized, for this study, that climate change is a key global challenge for the 21st century. The objective of this work is to investigate the bioclimatic potential of the city of Cuiabá-MT, considering the emission scenario A2 of the Fourth Report of the IPCC. The methodological procedures consist of elaboration of the future climatic archives; climatic characterization of the study site and determination of the bioclimatic potential through the psychometric charts of a base scenario (1961-1990) and future (2020, 2050 and 2080) scenarios. The results showed that the temperature increased by 21.5% and the relative humidity decreased by 22% in the 2080 scenario, in relation to the base scenario. The passive strategies most susceptible to the effects of global warming were ventilation and artificial conditioning. The artificial conditioning strategy presented a significant increase of the baseline scenario to that of 2080: from 9 to 54% of annual hours and, consequently, a reduction of the ventilation strategy, from 56% in the baseline scenario to 21% in 2080 , Thus highlighting that the investigation of the bioclimatic potential of future climate projections becomes important as an instrument of building resilience to the effects of global warming.
Keywords: climate change, bioclimatic architecture, building resilience.

## 1. INTRODUÇÃO

Pesquisas científicas evidenciam aumento progressivo da temperatura terrestre. De acordo com Duursma (2002), entre o final do século XIX e início do século XX, as temperaturas apresentavam comportamento praticamente invariável. Entretanto, nos últimos 100 anos, verifica-se tendência de elevação, quantificada em +0,12°C em Quito, no Equador e +0,60°C em São Paulo, no Brasil. Marengo e Soares (2005) também verificaram elevação de +0,85°C a cada 100 anos, para a cidade de São Paulo. Casagrande e Alvarez (2013) afirmam que, a partir da década de 1920, há tendência crescente das temperaturas se elevarem, com registro de aumento de 0,8°C no ano de 2000, em relação às médias do período de 1961-1990. Desta forma, embora o fato encontre opositores, se reconhece, para fins de realização deste estudo, que as mudanças climáticas são um desafio-chave global para o século XXI.

Pesquisas sobre as mudanças climáticas, motivadas pelas ações antrópicas e baseadas nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), tem sido compilados pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), por meio de publicações de relatórios científicos, sobre os quais cientistas das mais variadas áreas fundamentam suas pesquisas sobre o comportamento dos ecossistemas terrestres. Essas publicações destacam que a maior parte dos eventos de aumento de temperatura observada nos últimos 50 anos foi provocada pelas ações antrópicas e alerta para o aumento médio das temperaturas globais de 1,1°C a 5,4°C, podendo atingir 6,4°C até o ano de 2100, se a população e a economia continuarem em acelerado crescimento, com consumo intenso de combustíveis fósseis (IPCC, 2007).

Este estudo se desenvolve a partir do cenário referência A2 do Quarto Relatório de Avaliação (AR4) do IPCC. O AR4 apresenta os Cenários de Emissões de Gases de Efeito Estufa (Special Reports Emissions Scenarios - SRES) e os seus efeitos no sistema climático para o período de 1961 a 2100. O AR4 relata que, dos últimos 12 anos (1995 – 2006), 11 estão entre os anos mais quentes já registrados (IPCC, 2007). Desta forma, para compreender os riscos e as vulnerabilidades, o IPCC elaborou seis cenários de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) de 2011 a 2100 (IPCC, 2007). Os modelos são divididos em quatro grandes famílias, conhecidos como cenários A1, A2, B1 e B2, onde ‘A’ e ‘B’ significam, respectivamente, baixo e alto comprometimento com o desenvolvimento sustentável, e ‘1’ e ‘2’, a integração (global) ou fragmentação regional (local). Para a região de estudo, considerou-se baixo comprometimento com o desenvolvimento sustentável e elevada fragmentação regional.

A mitigação dos efeitos das mudanças climáticas tem sido pauta de políticas públicas de muitos países e pesquisas para adaptações das edificações aos novos cenários climáticos vêm sendo desenvolvidas em diversas áreas da construção civil (FREITAS e AMBRIZZI, 2012; CASAGRANDE, 2013; ALVES, 2014, TATEOKA e DUARTE, 2017). Assim, alteradas as condições externas em virtude do aquecimento global das, o ambiente interno das edificações também fica sujeito a influência deste efeito, e o projeto bioclimático do edifício adquire, portanto, elevado potencial na mitigação das mudanças climáticas e na resiliência do ambiente construído.

O termo projeto bioclimático, abordado por Olgyay (1973), relaciona a aplicação da climatologia à arquitetura e, principalmente às condições de conforto térmico no interior das edificações. Serra (1989) define arquitetura bioclimática como a que otimiza as relações energéticas com o ambiente natural. Maciel, Ford e Lamberts (2007) o definem como, a interação do clima de um local com a envoltória das edificações, podendo ser utilizadas estratégias bioclimáticas de projeto para obtenção de conforto térmico em projetos.

Sob a ótica das relações que se estabelecem entre as condições externas e internas das edificações, surge o termo potencial bioclimático (PAJEK e KOSIR, 2017; MONTERDE et al., 2016; YILDIZ, 2015 et al.; RUBIO-BELLIDO, PULLIDO-ARCAS, CABEZA-LAINEZ, 2015), definido como a interação do edifício com o lugar em que se insere, bem como as formas de uso das estratégias para a adaptação da arquitetura ao clima, com maior visibilidade para as estratégias passivas que ativas. Considerando os impactos das mudanças climáticas nas estratégias de projeto, estuda-se o potencial bioclimático dos cenários climáticos futuros previstos pelo relatório do IPCC, com a finalidade de melhorar a compreensão e a tomada de decisões projetuais para o planejamento das edificações.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é investigar possíveis alterações no potencial bioclimático da cidade de Cuiabá-MT frente às mudanças climáticas, considerando o cenário de emissões A2 do Quarto Relatório (AR4) do IPCC.

## 3. MÉTODO

### 3.1. Elaboração dos Arquivos Climáticos Futuros

Toma-se como referência a metodologia "morphing" publicada por Belcher, Haker e Powell (2005) para a elaboração de arquivos climáticos futuros, indicada pelo IPCC e adotada em diversos estudos sobre o tema (SONG e YE, 2017; SABUNAS e KANAPICKAS, 2017; WANG, LIU e BROWN, 2017; INVIDIATA e GHISI, 2016; TRIANA, LAMBERTS e SASSI, 2016; CASAGRANDE e ALVAREZ, 2013).

Essa metodologia modifica um conjunto de variáveis climáticas históricas (1961-1990) de 8.760 horas anuais, sem a influência dos impactos da urbanização e incorpora os efeitos do aquecimento global nos arquivos climáticos, permitindo desta forma obter as projeções de dados climáticos para os futuros cenários. O processo é realizado em três etapas sequenciais: i) desvio no arquivo climático horário atual e adição da variação média mensal projetada, ii) extensão do atual arquivo climático horário por ordenamento da variação média mensal projetada e iii) combinação das etapas anteriores (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005).

O processo empregado por este método é complexo e no sentido de facilitar e consolidar as operações algorítmicas, o grupo de pesquisa "Sustainable Energy Research Group" (SERG), da Universidade de Southampton no Reino Unido desenvolveu junto com a Microsoft® a ferramenta "Climate Change World Weather Generator" (CCWorldWeatherGen), incorporada ao Software Excel e disponibilizada gratuitamente. A ferramenta consiste de uma planilha eletrônica que integra os arquivos de extensão EPW ao Modelo Climático Global (MCG) "Hadley Centre Coupled Model version 3" (HadCM3), que por sua vez, integra-se de um modelo acoplado oceano-atmosfera, com resolução de 417km x 278km na região do Equador e de 295km x 278km aos 45° de Latitude, compondo-se do cenário de emissões do cenário A2 do Quarto Relatório (AR4) do IPCC, para os time-slice 2020 (período de 2011-2040), 2050 (período de 2041-2070) e 2080 (período de 2071-2100).

### 3.2. O clima da Cidade de Cuiabá-MT

A cidade de Cuiabá localiza-se no Centro Sul do estado de Mato Grosso, região Centro Oeste brasileira, com área de 3.538,17 km², com população estimada de 590.118 habitantes (IBGE, 2010). Encontra-se localizada em uma província geomorfológica denominada Baixada Cuiabana, na Latitude 15°36'56"S e Longitude 56°06'01"W. Conforme Callejas (2012), o município situa-se em três importantes ecossistemas brasileiros, o Pantanal ao Sul, a floresta Amazônica ao Norte e o Cerrado em seu entorno. Mato Grosso tem cerca de 90% de seu território inserido no clima do tipo Aw (tropical com chuvas de verão) e cerca de 10%, no extremo norte, em clima do tipo Am (tropical com clima de monção com precipitação total anual média maior que 1500mm e precipitação do mês mais seco menor que 60mm) (PEEL et al., 2007) (Figura 1).

O clima Am apresenta estação seca de curta duração, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C. O clima Aw apresenta estação chuvosa no verão, entre os meses de novembro a abril, e estação seca no inverno, entre os meses de maio a outubro, com temperatura média do mês mais frio superior a 18°C (SOARES et al., 2015). De acordo com Duarte (2000), o clima de Mato Grosso se caracteriza como quente, apresentando temperaturas diárias altas com frequência, podendo ocorrer máximas superiores a 40°C nos meses de setembro e outubro. A autora destaca que nenhum mês apresenta temperatura média inferior a 20°C e as temperaturas médias anuais em geral, são elevadas.

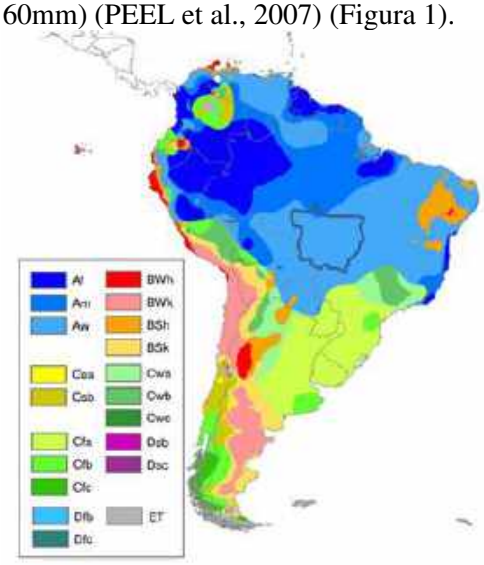



Figura 1 – Classificação Climática de Koppen (adaptada de Pell et al., 2007).

Durante (2012) relata que estudos que pretendam analisar o desempenho das edificações tendo o clima como condicionante, devem se apoiar em uma descrição detalhada do clima da região. Tratando-se do clima da cidade de Cuiabá, a autora elaborou estudo comparativo de temperaturas da cidade de Cuiabá, registradas

por Campelo Jr, Priante Filho e Caseiro (1992), Leão (2007), Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC), Rede de Meteorologia do Comando de Aeronáutica (REDMET), Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e EnergyPlus Weather Data (EPW) (Figura 2). Os dados do INMET de 1981-2010 foram aqui adicionados ao trabalho de Durante (2012).

Comparando-se os dados históricos de Campelo Jr, Priante Filho e Caseiro (1992) referentes ao período de 1970 a 1991 e INMET, no período de período 2000 a 2010, observa-se que a média anual da temperatura do ar apresentou aumento de 1,35°C no período de 19 anos. Esse fato corrobora com as projeções apresentadas pelo IPCC, cujo aumento da temperatura média global é 0,15°C a 0,30°C por década. Observa-se que o arquivo climático EPW elimina os valores extremos, constituindo-se de uma boa referência para estudos de avaliação de desempenho térmico, planejamento urbano, dentre outros.

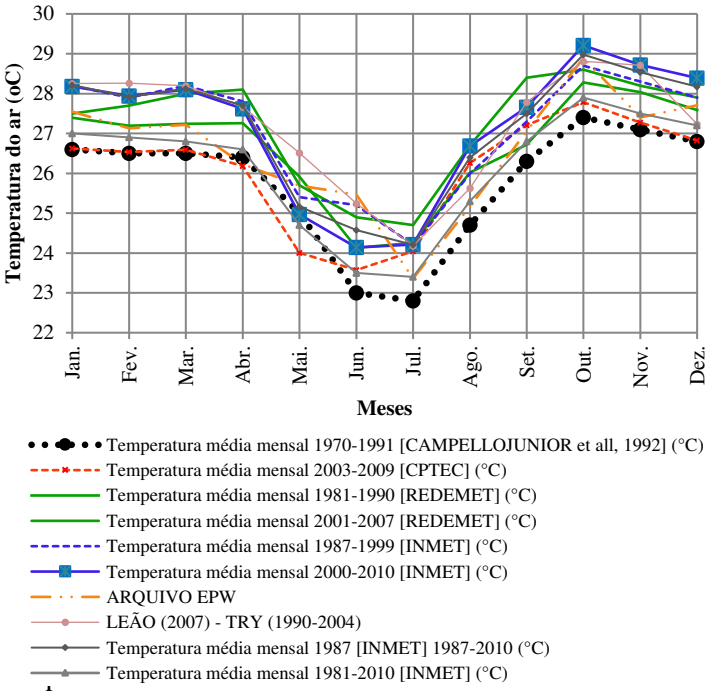



Figura 2 – Dados históricos do município de Cuiabá-MT (adaptado de Durante, 2012).

### 3.3. Elaboração do Potencial Bioclimático por meio das Cartas Bioclimáticas de Givoni (1992)

Considerando-se a estreita relação entre o uso de estratégias passivas de projeto e as condições de conforto térmico obtidas no interior das edificações que as adotam, buscou-se quantificar os impactos das alterações climáticas no potencial bioclimático por meio das cartas bioclimáticas de Givonni (1992), utilizando-se o software Analysis BIO (LABEEE, 2010). Este programa trabalha com 12 estratégias separadas por zonas: ventilação, ventilação/alta inércia, ventilação/alta inércia/resfriamento evaporativo, alta inércia térmica para resfriamento, alta inércia/resfriamento evaporativo, alta inércia térmica/aquecimento solar, conforto, aquecimento artificial, aquecimento solar passivo, condicionamento artificial, resfriamento evaporativo e umidificação. A plotagem dos dados na carta bioclimática ocorre por meio de arquivos climáticos (epw) publicados no Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) (DOE, 2016), que disponibiliza arquivos nesse formato para 20 cidades brasileiras. O arquivo necessita ser convertido para um arquivo de planilha eletrônica separado por vírgula, constituído de variáveis climatológicas especificas, em um arquivo com extensão .csv, ao partir do qual o mesmo se torna passível de ser lido pelo Analysis BIO.

De acordo com Carlo, Pereira e Lamberts (2005), o arquivo no formato .csv deve ter o cabeçalho padrão contendo as variáveis na seguinte ordem: Mês, Dia, Hora, TBS (°C), TBU (°C), Ponto de Orvalho (°C), Pressão Atmosférica (Pa), Umidade (Kg/Kg), Umidade Relativa (%), Entalpia (BTU/Lb), Velocidade do Vento (m/s), Cobertura Total de Nuvens (Decimais), Radiação Horizontal Extraterrestre (Wh/m²), Radiação Global Horizontal (Wh/m²), Radiação Direta (Wh/m²), Radiação Direta Normal (Wh/m²) e Radiação Difusa Horizontal (Wh/m²). O cabeçalho do arquivo .epw não é compatível com o do arquivo .csv, sendo necessário calcular as variáveis umidade relativa (em %) e entalpia (em BTU/Lb), conforme Guarda, Durante e Callejas (2018). Procedeu-se, da forma indicada, para os arquivos da cidade de Cuiabá de 1961 a 1990 (Cenário Base) e para os time-slices 2020 (período de 2011-2040), 2050 (período de 2041-2070) e 2080 (período de 2071-2100).

Cada arquivo foi inserido no software Analysis BIO para obtenção das cartas bioclimáticas, considerando o ano com 365 dias (01/01 a 31/12), ou seja, 8.760 horas. A partir desses arquivos, foi possível indicar, por meio de elementos gráficos, as variáveis climáticas que serão mais vulneráveis aos efeitos do aquecimento global em suas médias mensais, a saber: Temperatura de Bulbo Seco (TBS, em °C), Umidade Relativa do Ar (UR, em %) e a Radiação Global Horizontal (Wh/m²). Os resultados consistiram no cômputo das porcentagens de horas anuais requeridas pelas estratégias de maior ocorrência e nas horas anuais de

conforto e desconforto por calor e frio, resultando no potencial bioclimático para a cidade de Cuiabá-MT para os quatro cenários previstos neste estudo.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Arquivos Climáticos Futuros

A temperatura média anual no Cenário Base é de 26,73°C, sofrendo elevação para 28,24°C no time-slice 2020 (2011-2040), 29,90°C no time-slice 2050 (2041-2070) e 32,48°C no time-slice 2080 (2071-2100). Dessa forma, prevê-se um aumento de 21,50% até o cenário de 2080.

A umidade relativa do ar média anual no Cenário Base é de 69,08%, reduzindo-se para 64,75% em 2020, 60,41% em 2050 e 53,67% em 2080, sendo a redução deste último em relação ao primeiro, de 22%.

Já o impacto previsto na radiação solar, devido emissões de gases de efeito estufa foi de elevação de 3,66% na média anual da radiação até o final do século. A radiação solar média anual no Cenário Base é de 222,54 Wh/m², passando para 225,38 Wh/m² em 2020, 227,34 Wh/m² em 2050 e 230,69 Wh/m² em 2080.

O aumento na temperatura média do ar também foi observado por Triana; Lamberts e Sassi (2018), nas cidades de São Paulo e Salvador, para o cenário de 2050, utilizando metodologia semelhante a deste trabalho (método morphing, modelo climático HadCM3 e cenário de emissão A2 do IPCC). Os autores obtiveram aumento das temperaturas médias do ar em 3°C, para ambas as cidades, principalmente entre os meses de setembro e outubro. Essas condições também são encontradas no trabalho de Yildiz (2015), em três cidades da Turquia, que concluiu que a temperatura média anual e a radiação global horizontal média anual aumentarão 4°C e 7W/m², respectivamente, e a umidade relativa do ar média anual reduzirá 10%, no cenário de 2080, se comparado ao Cenário Base.

### 4.2. Potencial Bioclimático do Cenário Base (1961-1990) e dos Cenários Futuros (2020, 2050 e 2080

As estratégias que obtiveram maior número de horas anuais nos cenários foram massa térmica com aquecimento solar (MTAS), ventilação (V), condicionamento artificial (AC), massa térmica para resfriamento, resfriamento evaporativo e sombreamento, a seguir descritas em termos de evolução em relação aos cenários previstos neste estudo.

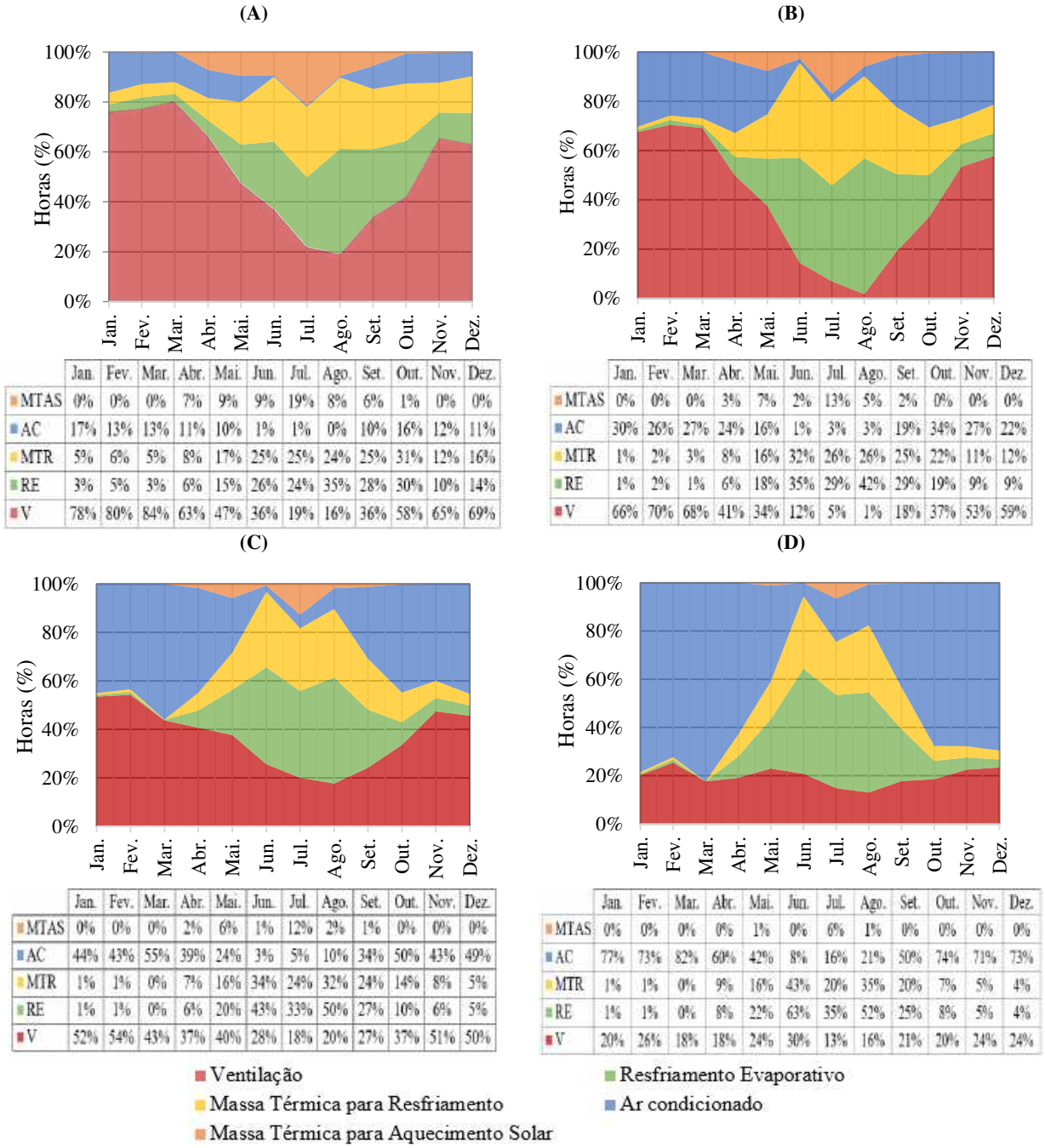
O sombreamento é requerido em 93, 95, 97 e 98% das horas anuais (média de todos os meses) nos Cenários Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente. No Cenário Base, 100% das horas de novembro a março, demais meses acima de 89% e julho 66% das horas. Em 2020, 100% das horas de outubro a março, demais meses acima de 91% e julho 74% das horas. Em 2050, 100% das horas de outubro a março, demais meses acima de 95% e julho 85% das horas. Em 2080, 100% das horas de outubro a março e em junho, demais meses acima de 99% e julho 87% das horas. O mês de julho se caracteriza por apresentar sempre as menores temperaturas e os menores valores de radiação horizontal global, em todos os cenários. A Figura 3 apresenta o panorama evolutivo das horas requeridas para essas estratégias.

A estratégia de ventilação é mais requerida nos meses de janeiro, fevereiro e março, em todos os cenários. Para esses meses, no Cenário Base (1961-1990), as porcentagens das horas anuais requeridas de ventilação são de 78,4%, 80,4% e 83,9%, respectivamente. No cenário 2020, são de 66%, 70% e 78%, respectivamente. Em 2050, são 52%, 54% e 43% e em 2080, de 20%, 26% e 18%, respectivamente. Observa-se tendência de diminuição nesses meses, ao longo de todos os cenários, em função do aumento da temperatura externa. Isso também ocorre no mês de agosto: no Cenário Base, 2020, 2050 e 2080 as horas requeridas de ventilação são de 16%, 1%, 20% e 16%, respectivamente. Verificou-se comportamento semelhante em abril (63, 41, 37 e 18%), outubro (58, 37, 37 e 20%), novembro (65, 53, 51 e 24%) e dezembro (69, 59, 50 e 24%).

No mês de junho, as horas requeridas são de 36, 12, 28 e 30%, nos Cenários Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Observa-se que em junho, a estratégia de ventilação diminui do Cenário Base para o cenário de 2020 e aumenta deste para os demais. Já no mês de julho, que é o mais frio do ano, o número de horas requeridas para a estratégia de ventilação diminui do Cenário Base para 2020, aumenta de 2020 para 2050 e diminui de 2050 para 2080. As horas requeridas são de 19, 5, 18 e 13%, nos Cenários Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Ocorre o mesmo no mês de setembro, o mais seco do ano, com tendência de queda ao longo dos cenários: 36, 18, 27 e 21% nos Cenários Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente.

As variações acima permitem distinguir comportamentos entre os meses chuvosos (outubro a abril – a necessidade de ventilação decresce ao longo dos cenários), meses secos (julho a setembro - a necessidade de ventilação decresce do Cenário Base para 2020, aumenta de 2020 para 2050 e diminui de 2050 para 2080)

e o mês de junho (a necessidade de ventilação decresce do Cenário Base para 2020 e aumenta deste para os demais).




| (A) | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MTAS | 0% | 0% | 0% | 7% | 9% | 9% | 19% | 8% | 6% | 1% | 0% | 0% |
| AC | 17% | 13% | 13% | 11% | 10% | 1% | 1% | 0% | 10% | 16% | 12% | 11% |
| MTR | 5% | 6% | 5% | 8% | 17% | 25% | 25% | 24% | 25% | 31% | 12% | 16% |
| RE | 3% | 5% | 3% | 6% | 15% | 26% | 24% | 35% | 28% | 30% | 10% | 14% |
| V | 78% | 80% | 84% | 63% | 47% | 36% | 19% | 16% | 36% | 58% | 65% | 69% |

| (B) | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MTAS | 0% | 0% | 0% | 3% | 7% | 2% | 13% | 5% | 2% | 0% | 0% | 0% |
| AC | 30% | 26% | 27% | 24% | 16% | 1% | 3% | 3% | 19% | 34% | 27% | 22% |
| MTR | 1% | 2% | 3% | 8% | 16% | 32% | 26% | 26% | 25% | 22% | 11% | 12% |
| RE | 1% | 2% | 1% | 6% | 18% | 35% | 29% | 42% | 29% | 19% | 9% | 9% |
| V | 66% | 70% | 68% | 41% | 34% | 12% | 5% | 1% | 18% | 37% | 53% | 59% |

| (C) | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MTAS | 0% | 0% | 0% | 2% | 6% | 1% | 12% | 2% | 1% | 0% | 0% | 0% |
| AC | 44% | 43% | 55% | 39% | 24% | 3% | 5% | 10% | 34% | 50% | 43% | 49% |
| MTR | 1% | 1% | 0% | 7% | 16% | 34% | 24% | 32% | 24% | 14% | 8% | 5% |
| RE | 1% | 1% | 0% | 6% | 20% | 43% | 33% | 50% | 27% | 10% | 6% | 5% |
| V | 52% | 54% | 43% | 37% | 40% | 28% | 18% | 20% | 27% | 37% | 51% | 50% |

| (D) | Jan. | Fev. | Mar. | Abr. | Mai. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Out. | Nov. | Dez. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| MTAS | 0% | 0% | 0% | 0% | 1% | 0% | 6% | 1% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| AC | 77% | 73% | 82% | 60% | 42% | 8% | 16% | 21% | 50% | 74% | 71% | 73% |
| MTR | 1% | 1% | 0% | 9% | 16% | 43% | 20% | 35% | 20% | 7% | 5% | 4% |
| RE | 1% | 1% | 0% | 8% | 22% | 63% | 35% | 52% | 25% | 8% | 5% | 4% |
| V | 20% | 26% | 18% | 18% | 24% | 30% | 13% | 16% | 21% | 20% | 24% | 24% |

Figura 3 – Panorama evolutivo das horas requeridas de estratégia de projeto: (A) Cenário Base; (B) Cenário 2020; (C) Cenário 2050 e (D) Cenário 2080 (Autores, 2019)

A estratégia de resfriamento evaporativo é mais significativa no Cenário Base, nos meses de junho (26%), julho (24%), agosto (35%), setembro (28%) e outubro (30%), sendo que nos demais meses, é requerida abaixo de 15% das horas. Esses valores variam para 35, 29, 42, 29 e 19% em 2020; 43, 33, 50, 27 e 10% em 2050 e 63, 35, 52, 25 e 8% em 2080. Já o mês de maio passa de 15% no Cenário Base para 18, 20 e 22% em 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Dezembro decresce de 14% para 9, 5, e 4%, assim como novembro (10, 9, 6 e 5%), no Cenário Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Janeiro, fevereiro e março decrescem ao longo dos cenários de aquecimento global, com porcentagens de horas requeridas sempre abaixo de 5%. Em abril, passa-se de 6% no Cenário Base para 6, 6 e 7%, em 2020, 2050 e 2080, respectivamente.

As variações acima permitem distinguir comportamentos distintos: de abril a outubro – a necessidade de resfriamento evaporativo cresce ao longo dos cenários, de novembro a março - a necessidade de

resfriamento evaporativo decresce ao longo dos cenários. A estratégia de massa térmica para resfriamento é mais requerida nos meses de junho, julho, agosto e setembro no Cenário Base (25, 25, 24 e 25%), 2020 (32, 26, 26 e 25%), 2050 (34, 24, 32 e 24%) e 2080 (43, 20, 35 e 20%), respectivamente. A tendência é crescente em todos os cenários nos meses de junho e agosto. Já em julho e setembro, a tendência é crescente do Cenário Base para 2020, decrescente deste para 2050 e crescente de 2050 para 2080. Janeiro, fevereiro e março apresentam tendência de decrescer ao longo dos cenários (5, 6 e 5%, no Cenário Base, 1, 2 e 3% em 2020, 1, 1 e 0, em 2050 e 1, 1, 0 em 2080, respectivamente), assim como outubro (31, 22, 14 e 7%), novembro (12, 11, 8 e 5%) e dezembro (16, 12, 5 e 4%). Os meses de maio e abril (transição para a estação seca) pouco variam nos cenários: 17, 16, 16 e 16% e 8, 8,7 e 9%, nos Cenários Base, 2020, 2050 e 2080, respectivamente. No Cenário Base, a estratégia de massa térmica para resfriamento é mais expressiva no mês de outubro e nos demais cenários, passa a ser no mês de junho.

No cenário de 2020 (2011-2041), a estratégia de condicionamento artificial apresentou aumento média anual de 102% em relação ao Cenário Base, passando para 2.978 horas (34%). Destaca-se que o aumento é maior nos meses de outubro e novembro, que apresentaram aumento da temperatura do ar média mensal de 6,0°C e redução da umidade relativa do ar média mensal de 6,0%, em ambos os meses. As horas requeridas da estratégia de resfriamento evaporativo aumentaram do Cenário Base para o cenário 2020, passando de 35% para 42% das horas. Em função do aumento da temperatura, o número de horas requeridas para a estratégia de massa térmica com aquecimento solar diminuiu: em julho do Cenário Base eram requeridas 19% das horas e no cenário 2020, 13% das horas.

O cenário 2050 apresentou aumento médio anual de 250% das horas requeridas de condicionamento artificial, se comparadas ao Cenário Base e de 73% se comparadas ao cenário 2020. Os meses de outubro, novembro e dezembro requeriam 16%, 12% e 11% das horas no Cenário Base, passando para 50%, 43% e 49% em 2050, resultando em aumento de 203%, 260% e 366%, respectivamente. Nesses meses, as temperaturas médias mensais são superiores a 30,0°C e as umidades médias mensais são inferiores a 68%, podendo justificar, desta forma, o aumento significativo das horas requeridas por essa estratégia.

A estratégia de condicionamento artificial apresentou aumento no cenário de 2080, sendo mais representativo nos meses de outubro, novembro e dezembro, que apresentavam no Cenário Base 16,4%, 11,9% e 11% das horas requeridas, passando para 73,7%, 71,4% e 72,5% das horas requeridas, respectivamente, no cenário de 2080. Essa variação pode ser justificada pelo aumento da temperatura da média anual de 26,73°C no Cenário Base para 32,48°C no cenário de 2080, ou seja +22,0%. As condições de temperatura e umidade são tais que exigem o uso do ar condicionando para proporcionar condições de conforto térmico. Lamberts, Dutra e Pereira (2014) destacam que, quando a Temperatura de Bulbo Seco (TBS) for maior que 44,0°C e a Temperatura de Bulbo Úmido (TBU) for superior a 24,0°C, recomenda-se a utilização de condicionamento artificial para manter as condições de conforto térmico nos interiores das edificações, corroborando com os resultados obtidos no cenário de 2080.

Os resultados apresentados corroboram com a pesquisa de Pajek e Kosir (2018) que verificaram aumento das horas requeridas da estratégia de sombreamento em +12,79% para a cidade de Murska Sobota, na Turquia, passando para 19,4% no cenário de 2020. Nas demais cidades estudadas pelos autores, o aumento foi gradual nos cenários, destacando que a necessidade do uso da estratégia de sombreamento não é mais limitada somente aos meses de verão, mas sim ao longo do ano. Também corroboram com Yildiz (2015), que ao investigar os efeitos das mudanças climáticas nas estratégias passivas de projeto e a influência nas condições de conforto térmico em três cidades da Turquia, verificaram que as estratégias de resfriamento evaporativo e ventilação natural aumentaram em média de 3,5% até o cenário de 2080 e que, apesar de serem fortes potenciais bioclimáticos para as edificações, é necessária a utilização de arrefecimento/resfriamento ativo para melhorar a sensação de conforto térmico no final do século XXI. Esses resultados corroboram com os apresentados neste trabalho, em que as horas requeridas da estratégia de sombreamento aumentam gradualmente nos cenários, sendo necessário em 2080, em praticamente durante todo ano.

Diante deste contexto, verifica-se baixo potencial bioclimático na cidade de Cuiabá nos cenários futuros de aquecimento global, o que compromete a adoção de estratégias passivas de projeto e, consequentemente, aumenta-se o uso de estratégias ativas, como o condicionamento artificial, para melhorar as condições de sensação térmica no interior das habitações. Assim, destaca-se que a investigação do potencial bioclimático, frente às projeções climáticas futuras, torna-se uma importante ferramenta, como um instrumento de resiliência das edificações frente aos efeitos do aquecimento global.

### 4.3. Horas de Conforto e Desconforto por Calor e Frio no Cenário Base (1961-1990) e nos Cenários Futuros de 2020, 2050 e 2080

No Cenário Base, as médias anuais das horas de desconforto por calor e frio são de 68,2% (5.974 horas) e 5,7%, respectivamente, aumentando para 80,8% (7.078 horas) e reduzindo para 0,7% (61 horas) no cenário de 2080, resultando em aumento de +18% e redução de -87% se comparadas ao Cenário Base.

O aumento das porcentagens anuais de horas de desconforto por calor foi progressivamente se elevando, sendo que nos cenários de 2020 e 2050, obtiveram-se os valores de 76,0% (6.654 horas) e 80,50% (7.051 horas), respectivamente. A redução das horas de desconforto por frio também foi progressivamente reduzindo, sendo de 3,22% (282 horas) e 2,23% (195 horas), nos cenários 2020 e 2050, respectivamente. As porcentagens anuais de horas de conforto foram de 23,7% (2.076 horas) no Cenário Base, reduzindo para 20,70% (1.813 horas) em 2020, para 16,70% (1,463 horas) para 2020 e para 12,50% (1.095 horas) em 2080 (Figura 4).

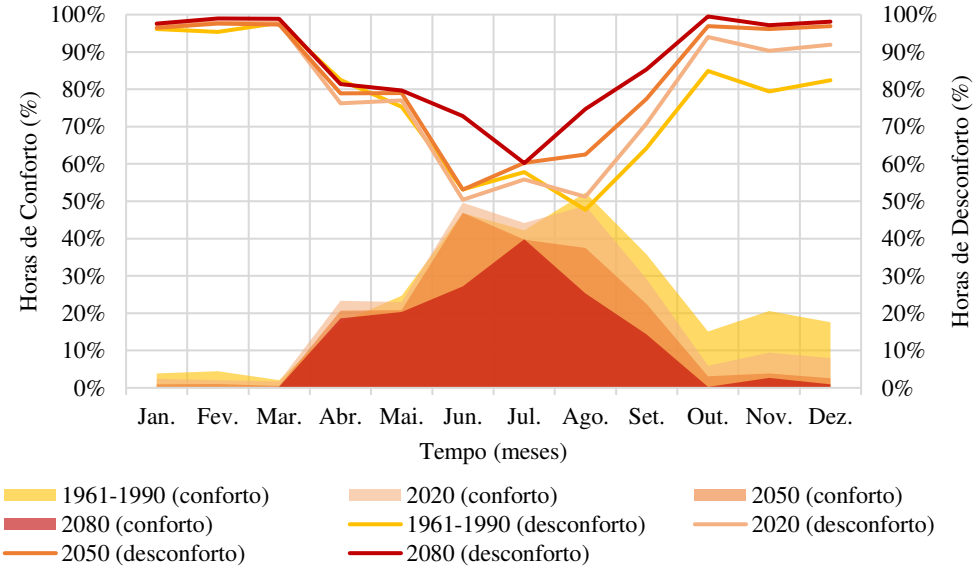



Figura 4 – Horas de conforto (gráfico de cor sólida) e desconforto por calor e frio (gráfico em linha) (Os Autores)

As horas de desconforto por calor e frio apresentaram nos meses de janeiro, fevereiro e março valores superiores a 95% das horas no cenário atual, passando para 97%, 98% e 99% nos cenários de 2020, 2050 e 2080, respectivamente. Esses valores podem ser justificados pelo aumento expressivo da temperatura do ar e pela redução da umidade relativa do ar, previstas para os cenários climáticos futuros, influenciando significativamente no aumento das horas de desconforto, principalmente por calor e, consequentemente, na redução das horas de desconforto por frio e das horas de conforto dos cenários.

Os meses de junho e agosto são caracterizados como meses de temperaturas mais amenas e apresentaram maiores horas de conforto no Cenário Base: 47% (4.117 horas) e 49% (4.292 horas), respectivamente nestes meses. Entretanto, com as novas condições climáticas futuras, as horas de conforto nesses meses reduziram para 27% (2.365 horas) e 25% (2.190 horas), respectivamente, no cenário de 2080.

Desta forma, verificou-se que o aumento da temperatura do ar e a redução da umidade relativa do ar influenciaram diretamente nas estratégias passivas de projeto, bem como nas horas de conforto e desconforto térmico por calor e frio, até o final do século XXI, demostrando que a utilização de condicionamento artificial para fins de resfriamento será necessária para obtenção de condições de conforto térmico no interior das edificações.

## 5. CONCLUSÕES

Os efeitos das mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global impõem alterações nas variáveis climatológicas, como o aumento da temperatura do ar e a redução da umidade relativa do ar.

Desta maneira, nas investigações do potencial bioclimático foi possível analisar as estratégias passivas de projeto e as porcentagens de conforto e desconforto por frio e calor para a cidade de Cuiabá-MT. As estratégias passivas que foram mais suscetíveis aos efeitos do aquecimento global foram a ventilação, o condicionamento artificial e o sombreamento. A estratégia de condicionamento artificial apresentou aumento expressivo do Cenário Base para o de 2080: de 9 para 54% das horas anuais. O aumento dessa estratégia

pode ser justificado pelas novas condições de temperatura e umidade que exigem o uso do condicionamento térmico artificial para proporcionar condições de conforto térmico no interior das edificações. Consequentemente, tem-se a redução da estratégia de ventilação de 56% das horas anuais no Cenário Base para 21%, em 2080.

Nas cartas bioclimáticas, a porcentagem anual de horas de desconforto por calor sofreu aumento e a de desconforto por frio redução até o cenário de 2080. Nesse cenário, tem-se condições de conforto em apenas 1.095 horas do ano (12,50%).

Conclui-se que, as altas temperaturas da cidade nos dias atuais, já caracterizam um baixo potencial bioclimático do local de estudo. Incorporando os efeitos do aquecimento global, as condições atuais ficam ainda mais comprometidas, exigindo, cada vez mais, a aplicação de estratégias ativas de projeto e, consequentemente, aumentando a demanda energética. Aponta-se, então, para a necessidade de direcionamento dos esforços para desenvolvimento de estudos de estratégias bioclimáticas inovadoras, tais como resfriamento evaporativo indireto, ventilação seletiva, resfriamento radiativo noturno, tubos enterrados, dentre outras, que representam um desafio para os projetos arquitetônicos das próximas décadas na mitigação dos efeitos do fenômeno de aquecimento global nas condições ambientais internas das edificações.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS


ALVES, C. A. Resiliência das Edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo – Estudo de caso: Desempenho térmico de edifícios residenciais para idosos. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014

BELCHER, S. E; HACKER, J. N; POWELL, D. S. Constructing design weather data for future climates. Building Services Engineering Research and Technology, v. 26, p. 49-61. 2005.

CALLEJAS, I. J. A. Avaliação temporal do balanço de energia em ambientes urbanos na cidade de Cuiabá-MT. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2012.

CAMPELO JÚNIOR, J. H; PRIANTE FILHO, N; CASEIRO, F. T. Caracterização macroclimática de Cuiabá. In: Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio Ambiente, 1991, Londrina, PR, Brasil. Anais....Londrina, 1991.

CARLO, J; PEREIRA, F; LAMBERTS, R. Iluminação Natural para Redução do Consumo de Energia de Edificações de Escritório aplicando Propostas de Eficiência Energética para o Código de Obras do Recife. In: Conferência Latino Americana de construção sustentável, encontro nacional de tecnologia no ambiente construído. Londrina. Anais... Porto Alegre 2006.

CASAGRANDE, B. ALVAREZ, C. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.13, n.4, p. 173-187, 2013.

CASAGRANDE, B. G. Cenários climáticos futuros: Diagnóstico prospectivo do desempenho termoenergético de edifícios comerciais no Brasil para o século XXI. Dissertação, f.136 (Mestrado), Universidade Federal do Espirito Santo, 2013.

DEPARMENT OF ENERGY (DOE). EnergyPlus. Energyplus.net, 2016. Disponível em: https://energyplus.net. Acesso em: 16 de maio de 2018.

DUARTE, D. H. S. Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos na região de clima tropical continental. Tese, f.296 (Doutorado), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2000.

DURANTE, L. C. Sombreamento arbóreo e desempenho termoenergético de edificações. Cuiabá. Tese (Doutorado) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá, 2012.

DUURSMA, E. River flow and temperature profile trends: consequences for water resources. N. V Company. Amsterdam, 2002.

FREITAS, E. D; AMBRIZZI, T. Impacto da Rio-92 na Produção Científica da USP Considerando o Tópico Mudanças Climáticas. Estudos Avançados, v. 26, p. 341-349, 2012.

GIVONI, B. Comfort climate analysis and buildings design guidelines. Energy and Buildings, v.18, n.1, p-11-23, 1992.

GUARDA, E. L. A; DURANTE, L. C; CALLEJAS, I. J. A; JORGE, S. H. M; BRANDÃO, R. P. Estratégias construtivas para adequação da envoltória de uma Habitação de Interesse Social às Zonas Bioclimáticas Mato-Grossenses. Revista Engineering and Science (E&S), v. 7, n.1, p.45-57. Cuiabá, 2018.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo 2010. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 04 maio 2018

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2007.

INVIDIATA, A; GHISI, E. Impact of climate change on heating and cooling energy demand in houses in Brazil. Energy and Building 130, p. 20-32, 2016

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES (LABEEE). Programa Computacional Analysis Bio, Versão: 2.1.5. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

LEÃO, E. B. Carta Bioclimática de Cuiabá. Dissertação (Mestrado), Departamento de Física, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal de Mato Grosso. Cuiabá- MT, 2007.

MACIEL, A. A; FORD, B; LAMBERTS, R. Main Influences on the design philosophy and knowledge basis to bioclimatic integration into architecture design – The example of best practices. Building and Environmental, v. 42, p. 3762-3773. 2007.

MARENGO, J. A; SOARES, W. R. Impacto das mudanças climáticas no Brasil e possíveis cenários climáticos: síntese do terceiro relatório do IPCC de 2001. CPTECINPE, p. 29, 2005

MONTERDE, M. A; LOZANO, G. V; GUILLAMÓN, G, I. Sustainable building strategies on regional scale: proposal for the Valencian region in Spain. Indoor and Built Environment, v. 25, p. 1054-1064. 2016.

OLGYAY, V. Design with climate. Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism. p. 309-310, New Jersey, 1973.

PAJEK, L; KOSIR, M. Can building energy performance be predicted by a bioclimatic potential analysis? Case study of the Alpine-Adriatic region. Energy and Buildings, v. 139, p. 160-173. 2017.
PEEL, M. C; FINLAYSON, B. L; MCMAHON T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union, v. 11, p.1633-1644, 2007.
RUBIO-BELLIDO, C; PULIDO-ARCAS, J. A; CABEZA-LAINEZ, J. M. Adaptation strategies and resilience to climate change of historic dwellings. Sustainability, v. 7, p. 3695-3713. 2015.
SABUNAS A, KANAPICKAS A. Estimation of climate change impact on energy consumption in a residential building in Kaunas, Lithuania, using HEED Software. Energy Procedia, vol. 128, p. 92–9, 2017
SERRA, R. Clima, Lugar y Arquitetura. Manual de Diseno Bioclimático. Centro de Investigaciones Energéticas (CIEMAT). Madrid, 1989.
SOARES, R. V; BATISTA, A. C; TETTO, A. F. Meteorologia e climatologia florestal. Curitiba, 2015.
SONG, X; YE C. Climate Change Adaptation Pathways for Residential Buildings in Southern China. Energy Procedia, v. 105, p. 3062–7, 2017.
TATEOKA, S. S; DUARTE, D. H. Adaptação às mudanças climáticas: desafios para requalificação de edifícios existentes em São Paulo. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiental Construído. Balneário Camboriú, 2017.
TRIANA, M. A; LAMBERTS, R. SASSI, P. Desempenho de Habitações de interesse social frente às mudanças climáticas. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. Anais…. Porto Alegre, 2016.
WANG, Y; LIN, H; WANG, W; LIU, Y; WENNERSTEN, R; SUN, Q. Impacts of climate change on the cooling loads of residential buildings differences between occupants with different age. Energy Procedia, v. 142, p. 2677-2682. 2017.
YILDIZ, B; EART, S; ALPKAN, L; YILDIZ, H; SEZEN, B. Drives of innovate constructive deviance: A moderated mediation analysis. Procedia – Social and Behavioral Sciences, v. 195, p. 1407-1416. 2015.

## AGRADECIMENTOS

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) pela concessão de bolsa. À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT). Ao Laboratório de Tecnologia e Conforto Ambiental (LATECA), ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental (PPGEEA).