



XVII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIII ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
SÃO PAULO - SP

EFICÁCIA DA FERRAMENTA DE PROGRESSÃO DE ARQUIVOS CLIMÁTICOS CCWORLDWEATHERGEN: ANÁLISE PARA SÃO PAULO-SP

**Gustavo Henrique Nunes (1); Rafaela Benan Zara (2);
João Gabriel Ribeiro (3); Thalita Gorban Ferreira Giglio (4)**

(1,2) Mestres em Engenharia Civil, Doutorandos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil,
gustavo.henrique.nunes@uel.br, rafaela.benan.zara@uel.br

(4) Doutora em Engenharia Civil, Professora do Departamento de Construção Civil, thalita@uel.br
Universidade Estadual de Londrina, Centro de Tecnologia e Urbanismo, Departamento de Construção Civil,
Rod. Celso G. Cid, PR-445 Km 380, Londrina-PR, CEP 86051-970, Cx. Postal 6001, Tel: (43) 3371-4649

(3) Doutor em Estatística e Experimentação Agrônômica, Professor da Faculdade de Ciências Exatas e
Tecnológicas, joao.gabriel.ribeiro@unemat.br
Universidade do Estado de Mato Grosso, Faculdade de Ciências Exatas e Tecnológicas, Av. dos Ingás, 3001,
Jardim Imperial, Sinop-MT, CEP 78555-000, Tel: (66) 3511-2100

RESUMO

O objetivo deste artigo é analisar a eficácia da ferramenta CCWorldWeatherGen, considerando as mudanças climáticas na cidade de São Paulo. Para tanto, as variáveis temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa do ar, velocidade do vento, e radiação solar global do arquivo climático de referência (TRY), de 1954, e do arquivo climático gerado pelo CCWorldWeatherGen para 2020 (representa 2011 a 2040), foram comparadas com observações da Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, obtidas entre 2011 e 2019. A precisão das variáveis dos arquivos climáticos foi avaliada por meio do Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE) dos dados. Os resultados do MAPE anual indicaram que os erros da progressão do arquivo meteorológico para temperatura de bulbo seco do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, e radiação solar horizontal global são 13,45%, 14,47%, 209,46%, e 27,94%, respectivamente; notando-se alguns erros menores do que os obtidos para o arquivo TRY. Conclui-se que a ferramenta CCWorldWeatherGen é adequada, especialmente por sua praticidade, para gerar futuros arquivos climáticos com informações completas, mas seu uso demanda cautela porque as progressões dependem da consistência dos dados do arquivo climático utilizado como base.

Palavras-chave: Análise de dados meteorológicos, Aquecimento global, Mudanças climáticas, Projeto de edificações resilientes, Simulação de edificações.

ABSTRACT

This paper aims to analyse the effectiveness of the CCWorldWeatherGen tool, in view of climate change in São Paulo city, Brazil. For this purpose, the variables air temperature (dry-bulb), air relative humidity, global horizontal solar radiation, and wind speed of the Test Reference Year (TRY) weather file, from 1954, and the weather file generated by CCWorldWeatherGen for 2020 (represents 2011 to 2040), were compared with observations from the Meteorological Station of the Institute of Astronomy, Geophysics and Atmospheric Sciences of the University of São Paulo, obtained between 2011 and 2019. The accuracy of the variables of the weather files was evaluated through the mean absolute percentage error (MAPE). The annual MAPE results indicated that the errors of the weather file progression for air dry-bulb temperature, air relative humidity, wind speed, and global horizontal solar radiation are 13.45%, 14.47%, 209.46%, and 27.94%, respectively; some errors lower than those obtained for the TRY file. It was concluded that the CCWorldWeatherGen tool is suitable, especially for its practicality, for generating complete future weather files, but its use requires caution because the progressions depend on the consistency of the weather file used as a basis.

Keywords: Building simulation, Climate change, Global warming, Meteorological data analysis, Resilient building design.

1. INTRODUÇÃO

Os efeitos das mudanças climáticas têm sido considerados como os principais desafios a serem enfrentados pela sociedade no século XXI, com consequências diretamente relacionadas ao meio ambiente, à saúde humana e à economia (FARAH et al., 2019; IPCC, 2023). O desempenho das edificações se mostra cada vez mais importante, sendo fundamental o planejamento de construções sustentáveis e resilientes ao clima, considerando simulações de desempenho que levem em conta cenários futuros. Dessa forma, é possível assegurar o conforto térmico dos usuários e reduzir o consumo de energia e as emissões de poluentes, tornando as edificações um elemento importante no combate às mudanças climáticas (FARAH et al., 2019; DE WILDE; COLEY, 2012).

Guan (2009) afirma que existem alguns métodos para se obter dados climáticos futuros para avaliação de desempenho de edificações. De acordo com Farah et al. (2019) e Guan (2009), a abordagem do método de compensação imposta – denominada *morphing*, conforme Belcher, Hacker e Powell (2005) – é a mais prática e capaz de produzir resultados confiáveis. Nesse sentido, destaca-se a ferramenta Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen), que utiliza *morphing* (BELCHER; HACKER; POWELL, 2005) para adaptar arquivos EnergyPlus Weather (EPW), possibilitando progressões climáticas completas. Outros programas para obtenção de arquivos climáticos futuros são o Meteororm e o Weather Shift, por exemplo (TROUP; FANNON, 2016; YASSAGHI; MOSTAFAVI; HOQUE, 2019); no entanto, são menos aplicados na bibliografia, devido a fatores como limitações relacionadas à localidade dos dados, à necessidade de uma licença privada, ou por terem sido desenvolvidos mais recentemente.

O CCWorldWeatherGen é bem aceito na comunidade científica, sendo aplicado em estudos com simulações que consideram condições climáticas futuras em todo o mundo (DE WILDE; COLEY, 2012; TRIANA; LAMBERTS; SASSI, 2018; WANG; LIU; BROWN, 2017). A ferramenta, que é gratuita e funciona como uma extensão para o Microsoft Excel, foi projetada de modo a permitir a geração de arquivos climáticos futuros para três períodos representativos: 2020 (representa o período de 2011 a 2040), 2050 (representa o período de 2041 a 2070) e 2080 (representa o período de 2071 a 2100) (JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2012). A técnica foi comprovada por Jentsch et al. (2013) como uma forma prática para avaliar as mudanças climáticas no ambiente construído.

No entanto, é importante considerar que obter uma representação adequada dos padrões de longo prazo das mudanças climáticas tem se mostrado um desafio (MACHADO, 2019), devido à difícil previsibilidade climática (TORRES, 2014; SANTOS et al., 2015). Investigações de validação de ferramentas como o CCWorldWeatherGen são importantes para se entender a confiabilidade das projeções de clima e, conseqüentemente, avaliar melhor o desempenho térmico e energético das edificações no futuro. A consolidação do entendimento dos erros associados ao CCWorldWeatherGen também é importante para melhorar a precisão das projeções e permitir que os projetistas e pesquisadores avaliem os riscos e oportunidades associados às mudanças climáticas de forma mais eficiente.

Este artigo aborda uma parte da pesquisa de Nunes (2021), apresentando uma análise de eficácia e precisão do CCWorldWeatherGen, para quatro variáveis climáticas de importante influência nas simulações termoenergéticas de edificações: temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa do ar, velocidade do vento, e radiação solar global – convém considerar que as duas primeiras variáveis citadas são as mais significativas para as mudanças climáticas (ALVES, 2014). Tendo em vista a relevância do problema global no âmbito do desempenho de edificações, o artigo contribui com uma verificação da eficácia e aplicabilidade do CCWorldWeatherGen, levando em conta as progressões para a cidade de São Paulo, no período representativo 2020 (2011–2040), que corresponde à época atual, em uma comparação com observações meteorológicas obtidas de 2011 a 2019, na estação do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, da Universidade de São Paulo.

2. OBJETIVO

Analisar a eficácia da ferramenta Climate Change World Weather File Generator (CCWorldWeatherGen) para obtenção de arquivos climáticos futuros, considerando observações meteorológicas em São Paulo.

3. MÉTODO

Para atender ao objetivo, dados climáticos da cidade de São Paulo, referentes ao período representativo 2020 (2011–2040), gerados por meio da ferramenta CCWorldWeatherGen, foram comparados com dados observados, de 2011 a 2019, na Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG-USP, 2020).

A descrição do método da pesquisa está dividida em duas etapas principais: na primeira etapa, apresentam-se os procedimentos para a obtenção dos dados climáticos analisados – arquivo climático gerado

pelo CCWorldWeatherGen e observações em estação meteorológica; e, na segunda etapa, apresentam-se os procedimentos de cálculo da precisão (erro) dos dados climáticos estudados.

3.1. Dados climáticos

Os dados climáticos considerados para a análise de eficácia e precisão da ferramenta CCWorldWeatherGen compreendem as seguintes variáveis: temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa do ar, radiação solar global e velocidade do vento. As informações para estas variáveis foram: as extraídas do arquivo climático de São Paulo, gerado por meio de progressão para 2020 (representa 2011 a 2040), de acordo com o cenário A2 do IPCC; e as observadas na capital paulista, entre 01 de janeiro de 2011 e 31 de dezembro de 2019, pela EM-IAG-USP.

O arquivo climático com a progressão para o período 2020 foi gerado com base nos dados do arquivo Test Reference Year (TRY) de São Paulo, correspondente ao ano de 1954. Esse arquivo climático, muito utilizado em simulações computacionais, foi desenvolvido por Goulart, Lamberts e Firmino (1998) e revisado por Carlo e Lamberts (2005), e é disponibilizado pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, no sítio do EnergyPlus (DOE, 2020). É importante destacar que, apesar de o ano de referência do arquivo de São Paulo estar fora da faixa recomendada (1961 a 1990), a data dos dados é relativamente próxima e, mais importante, não é posterior ao intervalo especificado, o que poderia superestimar as progressões significativamente, de acordo com os desenvolvedores do CCWorldWeatherGen (JENTSCH; BAHAJ; JAMES, 2012; JENTSCH et al., 2013).

A seguir, especificam-se a metodologia que o CCWorldWeatherGen utiliza para a progressão de informações meteorológicas e o procedimento seguido no estudo para a validação de arquivos climáticos futuros obtidos por meio da ferramenta.

3.1.1 Ferramenta CCWorldWeatherGen

Os dados climáticos futuros foram obtidos considerando o método *morphing*, desenvolvido por Belcher, Hacker e Powell (2005) e aplicado por Jentsch, Bahaj e James (2012) na ferramenta CCWorldWeatherGen. Seu uso é justificado pois, entre as técnicas observadas na bibliografia, a aplicação de *morphing* com auxílio do CCWorldWeatherGen se apresenta como o método mais viável e vantajoso, no sentido de se obter, com um *software* livre, informações mais completas, consolidadas e cientificamente aceitas, embora não considere o último relatório (AR6) de avaliação do IPCC. Por meio dos seus algoritmos, obtém-se progressões em todas as variáveis do arquivo climático base, ao contrário de outras técnicas. Adicionalmente, a ferramenta dispõe de rotinas de equações desenvolvidas por meio de fontes especializadas em cada variável.

Na aplicação do método *morphing*, que possui a vantagem de respeitar a previsão original de anos típicos (ano médio ao longo de 30 anos de dados), definem-se os seguintes algoritmos no programa, a partir de três operações genéricas (um deslocamento; um alongamento linear – fator de escala; e um deslocamento e alongamento combinados), conforme explicado em Belcher, Hacker e Powell (2005) e Casagrande e Alvarez (2013):

i) um deslocamento é aplicado na variável climática de referência, por meio da Equação 1;

$$x = x_0 + \Delta x_m \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática de referência;

Δx_m é a anomalia mensal absoluta, conforme o modelo de projeção.

ii) um alongamento é aplicado na variável climática de referência, por meio de um escalonamento com a variação média mensal projetada, conforme a Equação 2;

$$x = x_0 \alpha_m \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática de referência;

α_m é a mudança fracionária do valor mensal médio, conforme o modelo de projeção.

iii) uma combinação de deslocamento e alongamento é aplicada na variável climática de referência, por meio da Equação 3. Assim, a variável de referência é deslocada pela anomalia média mensal projetada, e estendida pela variação mensal da variável observada.

$$x = x_0 + \Delta x_m + \alpha_m [x_0 - (x_0)_m] \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

x é a variável climática futura;

x_0 é a variável climática de referência;

Δx_m é a anomalia mensal absoluta, conforme o modelo de projeção;

α_m é a mudança fracionária do valor mensal médio, conforme o modelo de projeção;

$(x_0)_m$ é a média mensal relativa à variável x_0 .

Esse é o algoritmo base do método *morphing*, que é aplicado no CCWorldWeatherGen. A partir do exposto, a ferramenta faz os cálculos para as variáveis dos arquivos climáticos, tais como temperatura de bulbo seco, umidade relativa do ar, radiação solar, temperatura do solo, e demais variáveis. Entre outras informações, é interessante relatar que a progressão da temperatura do solo do arquivo climático, que possui grande influência na simulação das trocas de calor do ambiente com o piso, é feita por meio do método de Kusuda e Achenbach (1965). Mais detalhes das rotinas de cálculo, bem como equações e definições de progressão, são apresentados no manual de referência técnica do programa (JENTSCH, 2012).

3.1.2 Estação Meteorológica do IAG-USP

Os dados climáticos registrados em São Paulo foram obtidos por meio de solicitação à Estação Meteorológica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (EM-IAG-USP, 2020), que realiza um importante trabalho de observação climática e disponibiliza várias informações a partir de formulário eletrônico.

Na Figura 1, apresenta-se a situação da EM-IAG-USP, dentro da metrópole, enquanto na Figura 2, apresenta-se uma visualização ampliada do cercado da estação propriamente dita.

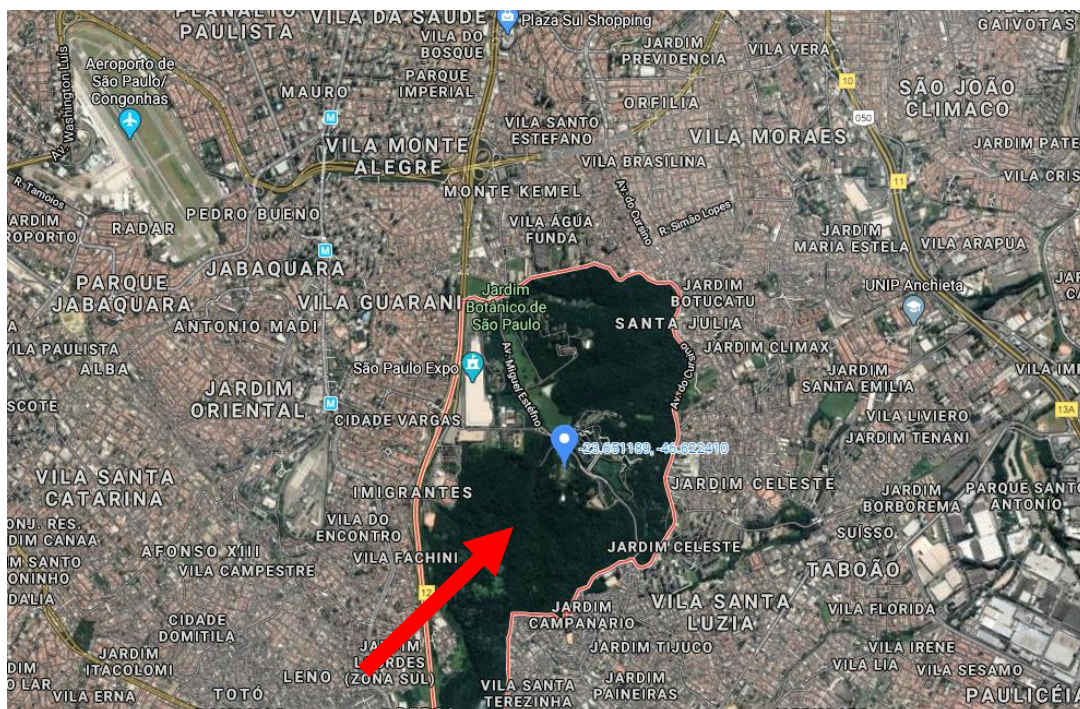


Figura 1 – Situação da Estação Meteorológica do IAG-USP, na cidade de São Paulo

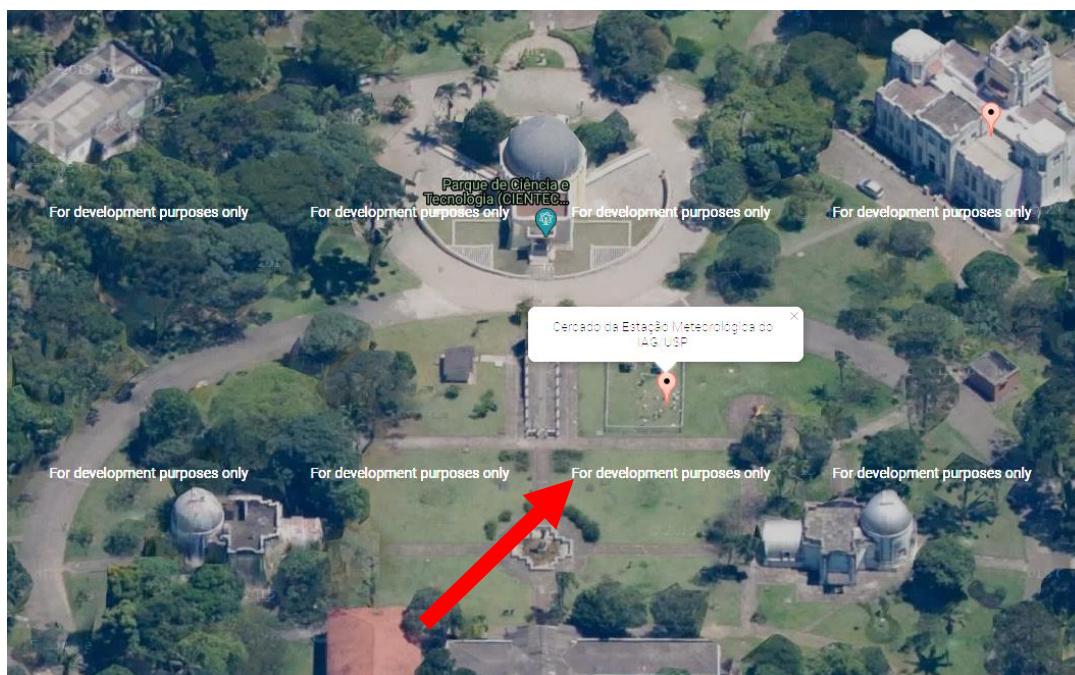


Figura 2 – Cercado da Estação Meteorológica do IAG-USP

A EM-IAG-USP, registrada junto à Organização Meteorológica Mundial (WMO) sob o número 83004, está localizada na latitude $23^{\circ}39' S$ e longitude $6^{\circ}37' W$, com altitude 799,20 m, em uma área do Parque de Ciência e Tecnologia (CIENTEC) da Universidade de São Paulo. Dessa maneira, uma vez que a estação se encontra em uma área verde, destaca-se que o efeito da urbanização da cidade é relativamente reduzido (mascarado) na referida localidade. Visto que as cidades atuam como amplificadores dos efeitos das mudanças climáticas, supõe-se que em áreas urbanas (onde, geralmente, a vegetação é reduzida) o aquecimento seja mais intensificado, como explica Alves (2014).

Conforme relatório técnico da EM-IAG-USP (2010), os procedimentos e instrumentos utilizados seguem as recomendações das publicações da WMO. Adicionalmente, no documento descreve-se que, além das observações realizadas pelos observadores meteorológicos, são utilizados instrumentos mecânicos automáticos (anemógrafo, barógrafo, termógrafo, higrógrafo, pluviógrafo e actinógrafo) que registram informações durante as 24 horas do dia; sendo que estas informações são reduzidas dos diagramas, pelos observadores, no dia seguinte das observações (EM-IAG-USP, 2010).

Quanto à obtenção de dados de temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa do ar, velocidade do vento, e radiação solar global, convém relatar algumas informações sobre o monitoramento na estação, conforme relatório técnico descritivo de instrumentos e procedimentos (EM-IAG-USP, 2010):

- as observações horárias da temperatura do ar (bulbo seco) são realizadas a partir da leitura dos capilares de mercúrio que constituem o bulbo seco de um psicrômetro de aspiração tipo Assmann com motor elétrico R. Fuess (entre 07h e 24h), e de estimativas de valores horários, com termógrafo de anel bimetálico com rotação diária R. Fuess, modelo 79, no. F-2243 (entre 01h e 06h, período no qual não são efetuadas leituras diretas);
- a umidade relativa do ar é calculada a cada hora, a partir da leitura da temperatura do ar e do bulbo úmido obtida com o psicrômetro já descrito, e da pressão atmosférica observada em barômetro de mercúrio de cuba fixa tipo Kew R. Fuess no. 1010 (entre 07h e 24h), e de estimativas de valores horários com higrógrafo dotado de harpa de fios de cabelo com rotação diária R. Fuess (entre 01h e 06h, período no qual não são efetuadas leituras diretas);
- para os registros de velocidade do vento, o anemógrafo usado consiste no modelo Universal 82a com rotação diária R. Fuess (faz-se a observação da velocidade instantânea e a velocidade média em cada intervalo de hora é deduzida a partir do registro da linha associada ao deslocamento de uma parcela de ar que passa pelo cata-vento);
- a obtenção de valores de radiação solar global média diária envolve a integração, ao longo do período diurno, de valores instantâneos de irradiância solar global obtida a partir dos registros de um actinógrafo bimetálico de Robitzch com rotação diária 58d, instalado no alto da torre da estação. Os registros são analisados a partir da área obtida entre o nascer e o pôr do Sol, e a área é obtida mediante planimetria mecânica, efetuada diversas vezes e por técnicos diferentes. Em análises posteriores, procura-se conferir as medições em comparação àquelas que seriam efetuadas por um instrumento sensível a uma região

mais larga do espectro solar (com maior precisão), mais explicitamente por um piranômetro dotado de cúpulas Schott WG295, e do quociente entre a radiação solar global diária observada à proximidade do solo e aquela que seria observada se o instrumento estivesse instalado acima da atmosfera terrestre.

A respeito da radiação solar global, cabe mencionar que, como a EM-IAG-USP disponibiliza os dados diários, em MJ/m²/dia, os valores precisaram ser convertidos para W/m² a fim de se comparar com a radiação solar extraída do arquivo climático, dada em W/m². Para tanto, sabendo-se que 1 W equivale a 1 J/s, ou seja, 0,0864 MJ/dia, tem-se que a transformação de MJ/m²/dia para W/m² foi feita dividindo-se o valor disponibilizado pelo fator de conversão 0,0864. Analogamente, a EM-IAG-USP disponibiliza dados de velocidade do vento em km/h, que, para serem convertidos para m/s – unidade dos arquivos climáticos –, foram divididos pelo fator de conversão 3,6.

Mais detalhes sobre o registro de dados são disponibilizados no sítio da EM-IAG-USP, em boletins e relatórios técnicos.

3.2. Análise da precisão dos arquivos climáticos

A precisão dos dados dos arquivos climáticos, em relação aos medidos, foi analisada por meio do cálculo do Erro Absoluto Médio Percentual (MAPE), que é uma medida estatística que expressa precisão como uma porcentagem do erro das previsões (CHOU; BUI, 2014; LEUNG et al., 2012). Valores de MAPE menores indicam um parâmetro melhor, ou seja, indicam erros menores; para exemplificar, se o MAPE calculado é 10, em média, a previsão está incorreta em 10%.

Foram calculados os indicadores MAPE para as informações de temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, obtidas para todas as 8.760 horas do ano, e de radiação solar global, obtidas para cada um dos 365 dias do ano (visto que a estação meteorológica fornece a radiação solar global diária). Para os cálculos dos indicadores de precisão, utilizou-se a Equação 4, mostrada a seguir.

$$\text{MAPE} = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \frac{|r_i - p_i|}{r_i} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

Em que:

- n é o número total de observações;
- i é cada uma das observações;
- r é o valor real medido de cada observação;
- p é o valor previsto de cada observação.

4. RESULTADOS

Neste capítulo apresentam-se os resultados e análises da eficácia da ferramenta CCWorldWeatherGen.

Nas Figuras 3 a 6 ilustram-se os dados de temperatura do ar (bulbo seco), umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global de São Paulo, em médias mensais, médias diárias, médias horárias, e médias mensais horárias para o ano todo. As diferentes linhas plotadas nos gráficos retratam os dados obtidos pelo arquivo TRY (1954), pelas progressões do CCWorldWeatherGen para o período 2020 (representa os anos de 2011 a 2040), e pelas observações da estação meteorológica do IAG-USP durante os anos de 2011 a 2019 (IAG-USP, 2020).

4.1. Temperatura de bulbo seco

Na Figura 3 apresentam-se os valores de temperatura do ar (bulbo seco) de São Paulo.

Observando-se as informações sobre a temperatura do ar, fica evidente, além do aumento da temperatura nos últimos anos, a elevação progressiva da temperatura no cenário futuro. Em relação aos dados do arquivo TRY de São Paulo, o aumento da temperatura média anual do ar é estimado em 0,91 °C no período 2020. Ademais, estima-se que a temperatura mínima passará de 16,05 °C para 17,03 °C até 2040, enquanto a máxima passará de 22,47 °C para 23,27 °C. Analisando-se a temperatura média de 2011 a 2019, observa-se que a progressão para o alongamento 2020, período atual, já apresenta notável fidelidade com os dados observados na EM-IAG-USP. A menor diferença média mensal (-0,04 °C) entre 2020 e as observações, foi em março, enquanto a maior diferença (+1,73 °C) foi em dezembro. Percebe-se que, em meses mais quentes, as temperaturas obtidas por meio da progressão e as observações se aproximam mais, sendo que em abril, outubro, novembro e dezembro, as temperaturas observadas na estação são superiores às do arquivo climático 2020; por outro lado, nos meses mais frios, as temperaturas medidas são inferiores às do arquivo climático 2020.

Nota-se, também, por meio das médias diárias e horárias, uma oscilação maior nas temperaturas dos arquivos climáticos, face às temperaturas da EM-IAG-USP. A estação meteorológica fica em uma área arborizada, o que pode justificar a maior constância nas temperaturas medidas.

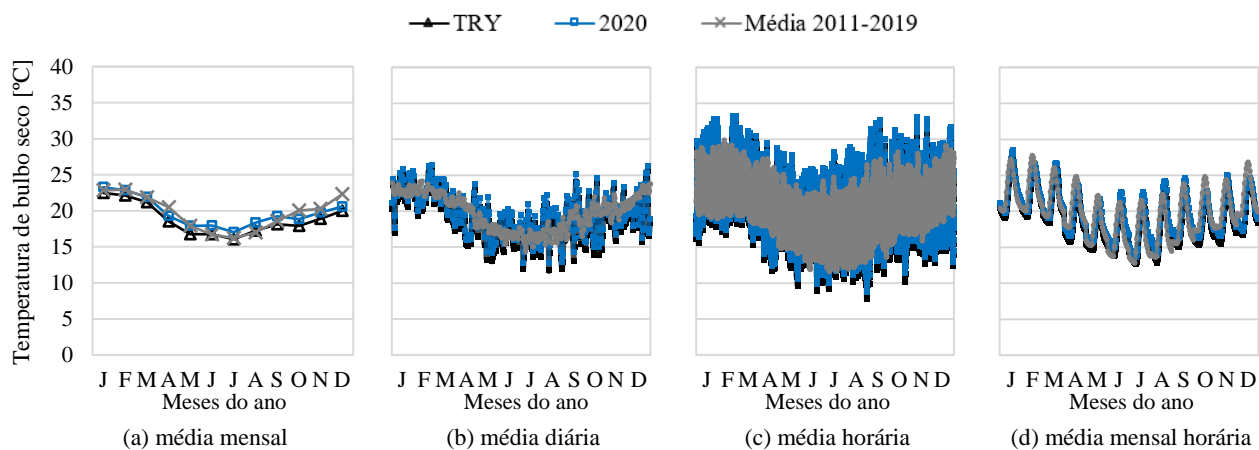


Figura 3 – Temperatura do ar (bulbo seco) de São Paulo

No geral, em comparação com os dados observados na estação, os gráficos indicam que a temperatura do ar obtida na progressão é mais representativa do que os dados do arquivo climático TRY. Essa análise é corroborada pelos números do MAPE calculado, que, considerando todas as horas do ano, é 13,78% para o arquivo climático TRY, e 13,45% para o arquivo climático 2020. Além do mais, analisando individualmente as horas dos meses que possuem temperaturas mais altas e mais baixas, respectivamente, em fevereiro, o MAPE é 9,20% para os dados TRY e 8,60% para os dados 2020, e em julho, o MAPE é 15,52% para os dados TRY e 16,48% para os dados 2020.

4.2. Umidade relativa do ar

Na Figura 4 apresentam-se os valores de umidade relativa do ar de São Paulo.

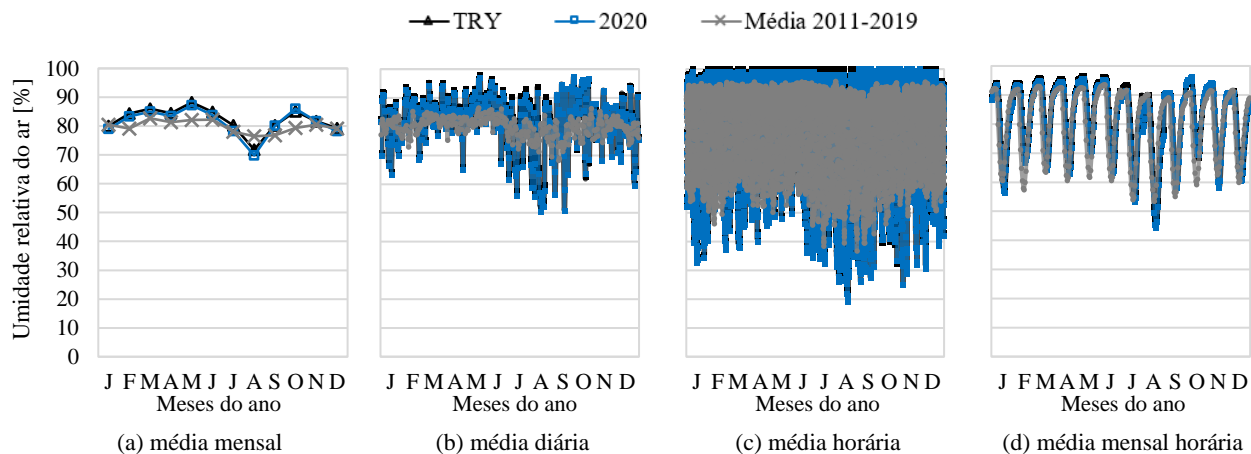


Figura 4 – Umidade relativa do ar de São Paulo

Nota-se uma redução da umidade relativa do ar no arquivo climático para o período 2020. Segundo as progressões, até 2040, a umidade máxima será de 87,22%, em maio, e a mínima será 69,82%, no mês de agosto. Assim, estima-se que a média anual passará de 82,17% (TRY) para 81,33% (2020) até 2040. Destaca-se, porém, que os dados observados (2011-2019) apresentam média anual de 79,84% e, em vários meses do ano, já estão bem abaixo da previsão para o período 2020.

Em referência aos dados observados na EM-IAG-USP, o MAPE calculado para a umidade relativa do ar dos arquivos climáticos, considerando todas as horas do ano, é 14,73% para o arquivo TRY, e 14,47% para o arquivo representativo do período 2020. Em fevereiro, o MAPE é 13,60% para os dados TRY e 13,01% para os dados 2020; e, em julho, o MAPE é 17,36% para os dados TRY, e 16,61% para os dados 2020.

4.3. Velocidade do vento

Na Figura 5 apresentam-se os valores de velocidade do vento de São Paulo.

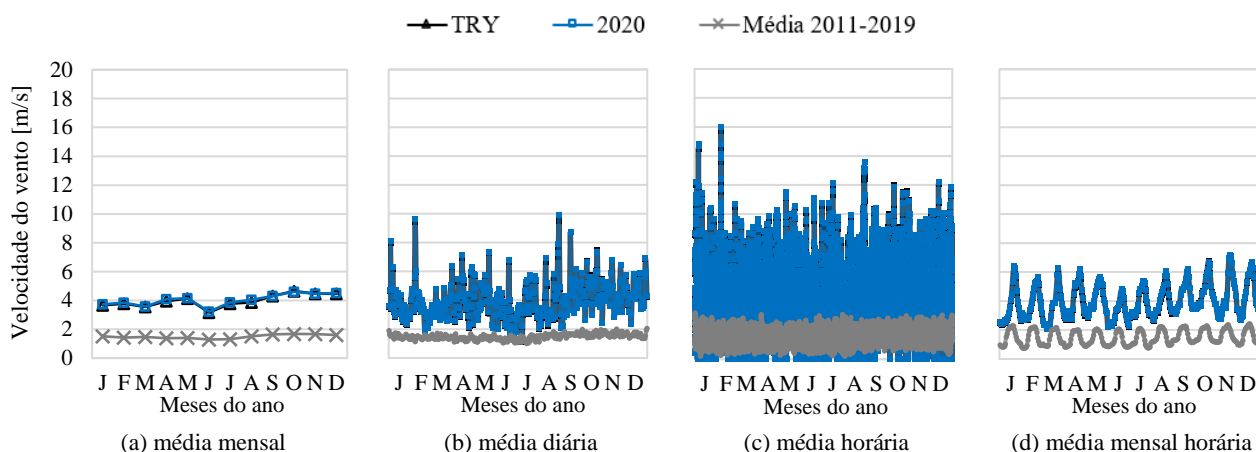


Figura 5 – Velocidade do vento de São Paulo

De modo geral, pelos gráficos da Figura 5, não existem diferenças notáveis entre as velocidades do vento do arquivo TRY e do arquivo com a progressão para 2020. As médias anuais de velocidade do vento dos arquivos climáticos são de 3,98 m/s (TRY) e 4,03 m/s (2020). Nesse sentido, segundo as progressões, a velocidade do vento média mensal máxima passará de 4,65 m/s (outubro, TRY) para 4,60 m/s (outubro, 2020) até 2040, enquanto a mínima passará de 3,16 m/s (junho, TRY) para 3,22 m/s (junho, 2020).

A velocidade do vento foi a variável climática que apresentou maior discrepância entre os valores observados na EM-IAG-USP e os valores dos arquivos climáticos. Os dados horários dos arquivos climáticos indicam velocidade do vento atingindo até cerca de 16 m/s, enquanto os valores medidos na estação não passam de 4 m/s. O MAPE anual da velocidade do vento dos arquivos climáticos, considerando os dados horários, é 205,35% para o arquivo TRY, e 209,46% para o arquivo 2020. Uma provável justificativa para as discrepâncias elevadas pode ser as características locais da origem dos dados. Os parâmetros TRY eram coletados em regiões demasiadamente abertas (aeroporto), enquanto a estação IAG-USP está localizada em uma área vegetada, em meio à metrópole. Pelas similaridades dos dados entre os arquivos climáticos e diferenças em relação aos dados reais observados, nota-se que o elevado MAPE do arquivo 2020 provém do próprio arquivo climático de referência (TRY), ressaltando a dificuldade de predição das mudanças climáticas e de validação da ferramenta.

4.4. Radiação solar global

Na Figura 6 apresentam-se os valores de radiação solar global de São Paulo. Uma vez que a estação do IAG-USP só fornece a radiação solar global em médias diárias, não foi possível elaborar os gráficos com valores em média horária e média mensal horária.

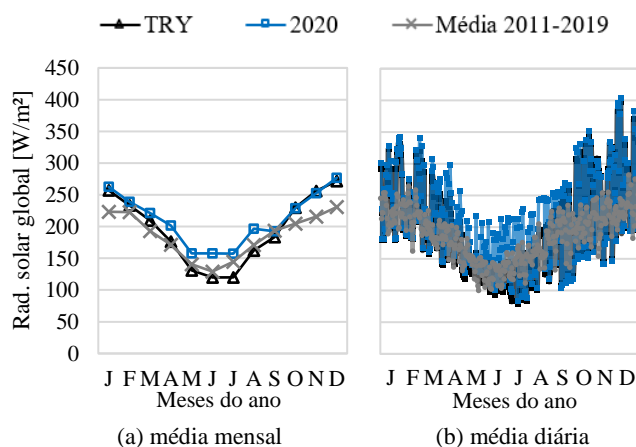


Figura 6 – Radiação solar global de São Paulo

As médias anuais de radiação solar global dos arquivos climáticos são de 195,94 W/m² (TRY) e 212,04 W/m² (2020), enquanto o valor medido na estação IAG-USP, de 2011 a 2019, é de 186,69 W/m². Segundo a

estimativa das progressões, a radiação média mensal máxima passará de 271,93, W/m² (dezembro, TRY) para 276,98 W/m² (dezembro, 2020) até 2040, enquanto a mínima passará de 119,85, W/m² (junho, TRY) para 157,34 W/m² (julho, 2020). Comparando-se os dados medidos de 2011 a 2019 com os dados dos arquivos climáticos, notam-se diferenças com o período 2020 (atual) e com o arquivo TRY de 1954. Percebe-se que, em alguns meses, a radiação solar medida na estação está abaixo dos valores indicados nos arquivos climáticos, o que pode ser justificado pela variação do clima e localização da estação e pelo equipamento – actinógrafo – utilizado para medição no IAG-USP. Enquanto alguns piranômetros se enquadram como instrumentos de primeira (2% de incerteza) ou segunda (5% de incerteza) classe, os actinógrafos são tidos como instrumentos de terceira classe (15 a 20% de incerteza) com baixa precisão, de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia (CRESESB, 2014; WMO, 2018). Brock e Nicolaidis (1984), Dallacort et al. (2004), Malm e Walther (1980) alegam que a precisão do actinógrafo pode gerar desvios de até 19% nas informações medidas. Isto posto, embora o Boletim de 2008 (IAG-USP, 2008) descreva que os dados medidos pelo actinógrafo da estação passam por um tratamento para se obter uma ‘estimativa’ do valor medido por um piranômetro, imprecisões nas medições horária podem ocorrer e causar inconsistências. Outra possibilidade plausível para as diferenças relativas nesse parâmetro, é o fato de os dados horários de radiação solar do arquivo TRY possuírem limitações, por terem sido estimados a partir da nebulosidade horária, afetando a exatidão das informações (CARLO; LAMBERTS, 2005; GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998).

Em referência aos dados medidos na estação IAG-USP, o MAPE da radiação solar global dos arquivos climáticos, considerando a média diária anual, é 21,95% para o arquivo TRY, e 27,94% para o arquivo 2020. Analisando a média diária em fevereiro, o MAPE é 17,89% para os dados TRY e 19,21% para os dados 2020, e analisando a média diária em julho, o MAPE é 20,21% para os dados TRY e 31,15% para os dados 2020.

4.5. Síntese do ‘erro’ dos arquivos climáticos

No Quadro 1 apresenta-se uma síntese dos indicadores MAPE calculados para cada mês e para o ano todo. Destaca-se que as variáveis temperatura e umidade do ar indicaram erros menores (tonalidade esverdeada), enquanto a radiação solar e a velocidade do vento indicaram erros maiores (tonalidade avermelhada).

Quadro 1 – MAPE mensal e anual (valores em porcentagem) das variáveis analisadas, em relação às observações da EM-IAG-USP

Variável	EPW	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Anual
Temp. do ar	TRY	10,07	9,20	8,82	15,53	13,05	12,96	15,52	18,63	16,34	17,77	11,68	15,40	13,78
	2020	9,83	8,60	8,53	14,05	12,35	15,08	16,48	20,41	16,26	15,33	9,75	14,25	13,45
Umidade do ar	TRY	12,86	13,60	10,73	11,90	11,78	12,76	17,36	20,81	20,30	18,68	11,02	14,70	14,73
	2020	12,69	13,01	10,21	11,43	10,99	12,40	16,61	20,97	20,30	19,19	11,03	14,60	14,47
Rad. solar global	TRY	26,97	17,89	18,67	15,50	12,84	14,35	20,21	19,46	26,11	33,22	31,00	27,03	21,95
	2020	28,72	19,21	23,02	23,53	19,27	30,92	31,15	34,04	30,70	35,43	30,23	28,59	27,94
Veloc. do vento	TRY	180,46	231,42	180,16	220,87	233,03	195,65	236,10	200,48	186,07	202,76	194,08	204,79	205,35
	2020	185,25	237,23	180,53	231,13	236,11	201,01	245,42	212,32	186,04	199,60	194,08	206,59	209,46

5. CONCLUSÕES

Tendo em vista a demanda por estudos sobre as técnicas de análise termoenergética de habitações no contexto das mudanças climáticas, este trabalho contribuiu com uma verificação da eficácia da ferramenta de progressão de arquivos climáticos CCWorldWeatherGen, a partir de observações meteorológicas em São Paulo.

A aplicação da ferramenta é interessante, no sentido de se desenvolver progressões de arquivos climáticos para análises de desempenho de edificações frente às mudanças climáticas, porém muito limitada à consistência dos dados do arquivo climático utilizado como base. O clima é um evento de difícil previsibilidade e, nesse sentido, dentro das limitações do arquivo climático TRY de São Paulo e das observações da EM-IAG-USP, seja por causa da localização da estação ou precisão de equipamentos, observaram-se erros maiores na progressão da radiação solar global e velocidade do vento gerada pelo CCWorldWeatherGen. Por sua vez, na comparação entre as variáveis temperatura e umidade relativa do ar das observações na estação meteorológica entre 2011 e 2019, e do arquivo climático com a progressão para o período 2020, percebeu-se maior fidelidade entre os dados, face à comparação das observações e do arquivo climático TRY.

A praticidade do CCWorldWeatherGen para gerar arquivos climáticos futuros completos, de forma livre, se destaca. Mas o fato de a aplicabilidade da ferramenta estar condicionada a um arquivo climático de um local específico, e baseado em dados meteorológicos de 1961 a 1990, pode ser um limitante, como observado nas elevadas discrepâncias entre as variáveis de velocidade do vento e radiação solar global.

Dessa forma, convém frisar que a validação de técnicas de progressões climáticas é complexa e muito relativa, dependendo de limitações e inconsistências nos dados registrados no passado e atualmente, sendo que o próprio método de análise de acurácia adotado pode influenciar nos resultados obtidos. Assim, este trabalho

contribuiu, modestamente, e dentro das possibilidades encontradas, com uma verificação que comprovou que as progressões do CCWorldWeatherGen se mostram adequadas para simulações de edificações, visto que não se observaram inconsistências ou dados demasiadamente imponderados no arquivo climático gerado, em relação ao arquivo climático base utilizado. Todavia, é importante considerar, além da origem dos dados do arquivo climático utilizado como base, os efeitos do microclima e as demais particularidades correlatas ao local específico (entorno) da edificação simulada em condições futuras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, C. A. **Resiliência das edificações às mudanças climáticas na região metropolitana de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em 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.
- CARLO, J. C.; LAMBERTS, R. **Processamento de Arquivos Climáticos para Simulação do Desempenho Energético de Edificações**. Eletrobrás/PROCEL, AET N 02/04, Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.
- CASAGRANDE, B. G.; ALVAREZ, C. E. Preparação de arquivos climáticos futuros para avaliação dos impactos das mudanças climáticas no desempenho termoenergético de edificações. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 4, p. 173–187, 2013.
- CHOU, J. S.; BUI, D. K. Modeling heating and cooling loads by artificial intelligence for energy-efficient building design. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 437–446, 2014.
- DE WILDE, P.; COLEY, D. The implications of a changing climate for buildings. **Building and Environment**, v. 55, p. 1–7, 2012.
- DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Weather data**. Disponível em: <<https://energyplus.net/weather>>. Acesso em: 29 fevereiro 2020.
- EM-IAG-USP – ESTAÇÃO METEOROLÓGICA DO INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. **Dados meteorológicos medidos de 01/01/2011 a 31/12/2019: temperatura de bulbo seco; umidade relativa do ar; radiação solar global; velocidade do vento**. São Paulo, 2020. Disponível em: <http://www.estacao.iag.usp.br/sol_dados.php>. Acesso em 31 abril 2020.
- _____. **Relatório técnico da estação meteorológica do IAG/USP**. Nº1: Instrumentos e Procedimentos. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.estacao.iag.usp.br/boletim.php>>. Acesso em 22 fevereiro 2023.
- FARAH, S.; WHALEY, D.; SAMAN, W.; BOLAND, J. Integrating climate change into meteorological weather data for building energy simulation. **Energy and Buildings**, v. 183, p. 749–760, 2019.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998.
- GUAN, L. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. **Building and Environment**, v. 44, n. 4, p. 793–800, 2009.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. Genebra, 2023.
- JENTSCH, M. F. **Manual de referência técnica do CCWorldWeatherGen**. Tradução adaptada por Gustavo Henrique Nunes e Thalita Gorban Ferreira Giglio. Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2021. Título original: Climate Change Weather File Generators: Technical reference manual for the CCWeatherGen and CCWorldWeatherGentools - Version 1.2. 2012.
- JENTSCH, M. F.; BAHAJ, A. S.; JAMES, P. A. B. **Manual CCWorldWeatherGen**. Climate change world weather file generator. Version 1.7. Southampton: University of Southampton, 2012.
- JENTSCH, M. F.; JAMES, P. A. B.; BOURIKAS, L.; BAHAJ, A. S. Transforming existing weather data for worldwide locations to enable energy and building performance simulation under future climates. **Renewable Energy**, v. 55, p. 514–524, 2013.
- KUSUDA, T.; ACHENBACH, P. R. Earth Temperatures and Thermal Diffusivity at Selected Stations in the United States. **ASHRAE Transactions**, v. 71, n. 1, p. 61–75, 1965.
- LEUNG, M. C.; TSE, N. C. F.; LAI, L. L.; CHOW, T. T. The use of occupancy space electrical power demand in building cooling load prediction. **Energy and Buildings**, v. 55, p. 151–163, 2012.
- MACHADO, J. M. **Avaliação de desempenho térmico em edificações multifamiliares considerando as mudanças climáticas futuras**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2019.
- NUNES, G. H. **Influência das mudanças climáticas na sensibilidade global de parâmetros termofísicos de habitações brasileiras**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2021.
- SANTOS, T. S.; MENDES, D.; CASTRO, A. A.; SILVA, A. R. Incertezas das projeções de mudanças climáticas: Análise preliminar. **Ciência e Natura**, v.37, n.1, p. 63-68, 2015.
- TORRES, R. R. **Análise de incertezas em projeções de mudanças climáticas na América do Sul**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2014.
- TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Should we consider climate change for Brazilian social housing? Assessment of energy efficiency adaptation measures. **Energy and Buildings**, v. 158, p. 1379–1392, 2018.
- TROUP, L.; FANNON, D. Morphing climate data to simulate building energy consumption. **Proceedings...** Building Performance Modeling Conference: Salt Lake City, 2016.
- WANG, L.; LIU, X.; BROWN, H. Prediction of the impacts of climate change on energy consumption for a medium-size office building with two climate models. **Energy and Buildings**, v. 157, p. 218–226, 2017.
- YASSAGHI, H.; MOSTAFAVI, N.; HOQUE, S. Evaluation of current and future hourly weather data intended for building designs: A Philadelphia case study. **Energy and Buildings**, v. 199, p. 491–511, 2019.

AGRADECIMENTOS

À CAPES e à UEL, pelo apoio financeiro concedido, e à Estação Meteorológica do IAG-USP, pela disponibilização das observações meteorológicas.