



Desenvolvimento e validação de abrigos termo-higrométricos

Lucio Gonçalves Barbosa OLIVEIRA¹, Rafael da Silva PALÁCIOS^{1*}, Lucas Douglas ROTHMUND¹,
Leone Francisco Amorim CURADO¹, Tonny Jader de MORAES¹, João Basso MARQUES¹,
José de Souza NOGUEIRA¹

¹Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, MT, Brasil.

*E-mail: rafael.pgfa@gmail.com

Recebido em fevereiro/2018; Aceito em novembro/2018.

RESUMO: Medidas de temperatura e umidade relativa do ar são fundamentais para o entendimento das dinâmicas tanto do microclima como do clima de forma geral. Estudos recentes de microclima urbano avaliam sistemas alternativos para utilização como abrigos termo-higrométricos, buscando uma padronização das medidas assim como um possível material capaz de reproduzir medidas precisas e validas para temperatura e umidade relativa do ar. Nesse sentido, este trabalho propõe o desenvolvimento e validação de dois modelos de abrigos termo-higrométricos. Os dois modelos projetados (sextavado e quadrado) foram produzidos em impressora 3D (impressão de fio quente) com o material PLA (poliácido láctico). As medidas de temperatura e umidade relativa do ar obtidas com os modelos projetados foram avaliadas por modelos de regressões lineares. Os resultados estatísticos constataram por meio do índice de Willmott uma ótima concordância entre as medidas dos abrigos projetados e o abrigo de referência. Através do coeficiente de determinação foi verificado que todas as medidas realizadas pelos abrigos projetados explicam 99,9% das medidas de referência.

Palavras-chave: material PLA, impressora 3D, índice de Willmott.

Development and validation of thermo-hygrometric shelters

ABSTRACT: Measurements of temperature and relative humidity are fundamental for understanding the dynamics of both, microclimate and climate in a general way. Recent studies of urban microclimate evaluate alternative systems for use as thermo-hygrometer shelters, seeking a normalization of the measurements as well as a possible material capable of reproducing precise and valid measurements for temperature and relative humidity. In this sense, this work proposes the development and validation of two models of thermo-hygrometric shelters. The two designed models (hexagon and square), were produced on a 3D printer (hot wire printing) with PLA (Polylactic Acid) material. Linear regression models were used to evaluate the measurements of temperature and relative humidity of the air obtained with the projected models. Statistical results revealed a good concordance between the measurements of the projected shelters and the reference shelter using the Willmott index. The coefficient of determination corroborated that all measures carried out by the projected shelters explain 99.9% of the reference measurements.

Keywords: material PLA, 3D printer, Willmott index.

1. INTRODUÇÃO

O entendimento das mudanças meteorológicas e climáticas sempre foi objeto de interesse geral, principalmente por implicações práticas no planejamento agrícola, ambiental e urbano (MARQUES, 2016).

Nos estudos climatológicos é imprescindível a realização de medidas em campo. Estas medidas são obtidas através da utilização de equipamentos e sensores específicos. Muitos destes sensores necessitam de proteção na forma de abrigos meteorológicos, que garantem a qualidade dos dados e também sua padronização (VALIN JR et al., 2016a).

No contexto do entendimento do sistema solo-planta-atmosfera, vários estudos têm abordado a necessidade de medidas de qualidade para a análise dos fluxos de energia e massa sobre a superfície. Medidas de variáveis como o dióxido de carbono, por exemplo, necessitam de uma série de correções, pois a maioria dos sensores são baseados em medidas de absorção da radiação infravermelha, que pode ser sobreposta pela absorção da água (YOU-WEN et al., 2012).

Medidas de variáveis micrometeorológicas, tais como a temperatura e a umidade relativa do ar, podem auxiliar na compreensão da dinâmica dos fluxos de massa e energia sobre a superfície (NEVES et al., 2015).

As análises de microclima urbano também se utilizam de medidas de temperatura e umidade relativa do ar. Basicamente, estes dados são utilizados como indicativos para caracterizar a região em estudo (SERAFINI JÚNIOR et al., 2014).

Alguns grupos de pesquisa de sistemas urbanos, especialmente universidades e centros de ensino, vem atualmente desenvolvendo sistemas alternativos tanto para sensores quanto para sistemas de aquisição e armazenamento de dados (NEVES, 2013; MARQUES, 2016). Além do desenvolvimento de sensores, muitos trabalhos têm avaliado a aplicação de materiais alternativos na confecção de abrigos meteorológicos (VALIN JR et al., 2016b).

O trabalho de Valin Jr et al. (2016a) avaliou diferentes tipos de abrigos alternativos para medidas termo-

higrométricas. Entre os materiais alternativos avaliados, tais como tubos de PVC, madeira, pratos comerciais e até mesmo potes de sorvetes, observou-se diferentes desempenhos, com pouca eficiência para alguns tipos de materiais.

Já o trabalho de Neves et al. (2015) que utilizou pratos comerciais na confecção dos abrigos, obteve alta eficiência para medidas de temperatura e umidade relativa do ar, que quando comparadas as medidas de referência (medidas da Campbell) obteve valores de R^2 de 0.99. Entretanto, ao tentar replicar o sistema desenvolvido por Neves et al. (2015), é possível que o mesmo material já não esteja disponível no mercado (fato ocorrido no desenvolvimento deste trabalho).

Nesse sentido este trabalho propõe um sistema de abrigos termo-higrométricos, desenvolvidos, avaliados e validados. O projeto de desenvolvimento e validação deste material descrito neste trabalho, torna possível a reprodução do sistema de forma que as medidas sejam asseguradas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. A confecção dos abrigos termo-higrométricos

Foram projetados dois modelos arquitetônicos de abrigos termo-higrométricos, um sextavado e o outro quadrado. Os dois modelos projetados foram validados com medidas de referência, obtidas com um abrigo da Campbell (Figura 1). Os abrigos projetados foram salvos com extensão STL e impressos em uma impressora 3D. A impressão utilizou o material biodegradável PLA (poliácido láctico) (MARQUES, 2016).

O desenvolvimento dos abrigos foi realizado com base nas normas da Organização Meteorológica Mundial, WMO (*World Meteorological Organization*), (http://www.wmo.int/pages/index_en.html). O projeto utilizou um software CAD para projetos mecânicos em 3D.

O equipamento utilizado para a impressão dos dois modelos de abrigos foi a impressora modelo Sethi 3D BB que possui área de impressão de 400 x 400 x 400 mm (Figura 2).

Após a produção dos abrigos, estes foram utilizados para medidas em ambiente externo, juntamente com o termo-higrômetro da Campbell. Estas medidas foram realizadas na parte externa de um prédio localizado na região urbana do município de Cuiabá, no Estado de Mato Grosso. Todas as medidas foram realizadas com resolução temporal de 1 (um) minuto do dia 05/08/2016 as 15 horas e 30 minutos ao dia 15/09/2016 as 15 horas e 22 minutos.

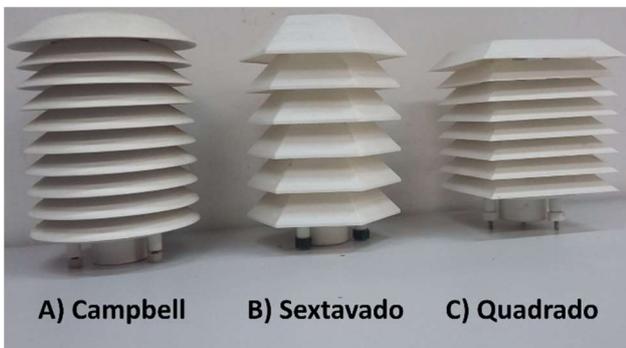


Figura 1. Apresentação dos abrigos termo-higrométricos, em A) está o abrigo de referência da Campbell, em B) o abrigo com o modelo sextavado e em C) o abrigo com modelo quadrado.

Figure 1. Presentation of the thermo-hygrometric shelters, in A) we have the reference shelter of Campbell, in B) the shelter with the hexagonal model and C) is the shelter with square model.



Figura 2. Representação da impressora modelo Sethi 3D BB, utilizada para impressão dos dois modelos de abrigos, sextavado e quadrado.

Figure 2. Representation of the Sethi 3D BB printer, used to design the two models of shelters, hexagonal and square.

2.2. Análise estatística dos dados

As relações entre as medidas de temperatura e umidade relativa do ar dos abrigos projetados foram relacionadas com as medidas Campbell por meio de gráficos de linhas para as séries temporais e regressões lineares. A validação das medidas dos modelos projetados foi realizada por meio da análise do índice de Willmott, raiz do erro quadrado médio e erro médio absoluto.

A eficiência das medidas dos termo-higrômetros projetados está relacionada ao afastamento dos valores obtidos pelos termo-higrômetros projetado e o de referência. Matematicamente essa aproximação é dada por um índice designado de concordância que pode ser aplicado à comparação entre modelos (Willmott et al., 1985). Seus valores variam de 0 (zero), com nenhuma concordância, a 1 (um), com concordância perfeita.

O cálculo do índice de Willmott (representado por “ d ”) é apresentado na Equação 1, onde P_i é o valor obtido pelo termo-higrômetro projetado, O_i o valor obtido pelo termo-higrômetro de referência (Campbell) e O a média dos valores obtidos pelo termo-higrômetro de referência.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (\text{Equação 1})$$

A raiz do erro médio quadrado ($REQM$) foi calculada conforme a Equação 2, onde n é o número total de medidas.

$$REQM = \sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}} \quad (\text{Equação 2})$$

O valor de $REQM$ indica a adesão entre medidas com dos termo-higrômetros projetados e o de referência. Quanto mais próximo de 0 (zero) maior é a adesão entre as medidas. Através do $REQM$ obtém-se o indicativo do quanto as medidas do termo-higrômetro projetado apresentam erros ao estimar a variabilidade das medidas em torno da média. Esse índice mede a variação dos valores obtidos pelo termo-higrômetro construído ao redor dos valores obtidos pelo termo-higrômetro de referência (Willmott; Matsuura, 2005).

Já o erro médio absoluto (*EMA*), calculado através da Equação 3, que indica o afastamento (desvio) médio absoluto dos valores obtidos pelo termo-higrômetro projetado em relação aos valores obtidos pelo termo-higrômetro de referência. No cálculo onde n é o número total de medidas.

$$EMA = \sum \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (\text{Equação 3})$$

3. RESULTADOS

A série temporal com as medidas de temperatura é apresentada na Figura 3 e as respectivas regressões entre os valores medidos de temperatura para os abrigos termo-higrômetros projetados e o de referência na Figura 4.

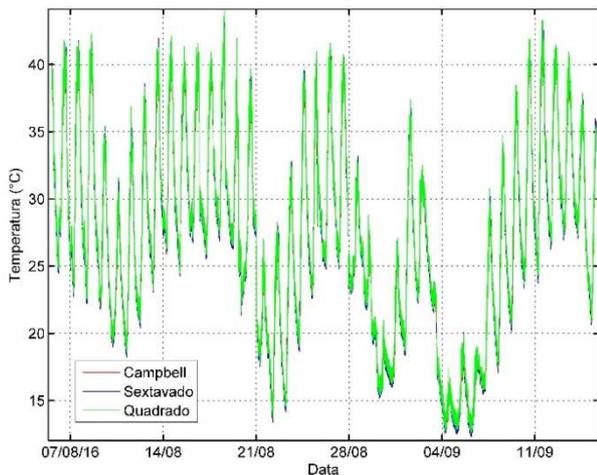


Figura 3. Série temporal das medidas de temperatura, obtidas com o abrigo de referência da Campbell "linha vermelha", abrigo projetado de modelo sextavado "linha azul" e o abrigo de modelo quadrado "linha verde".

Figure 3. Time series of measured temperature, obtained with the Campbell reference shelter "red line", the hexagonal designed shelter model "blue line" and the square designed shelter model "green line".

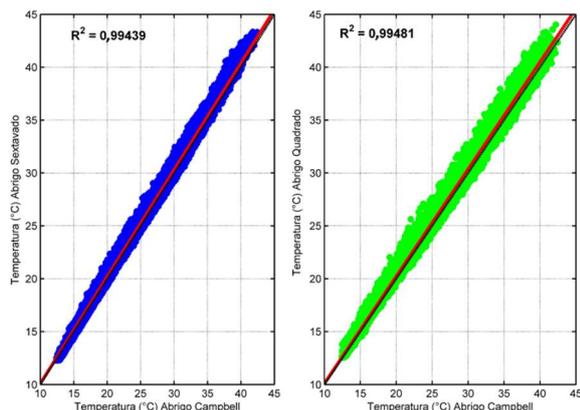


Figura 4. Regressão linear realizada entre as medidas de temperatura com os modelos projetados sextavado e quadrado e as medidas de referência do abrigo da Campbell. Os pontos azuis representam a relação entre o modelo sextavado com o de referência, e os pontos verdes do modelo quadrado com o de referência.

Figure 4. Linear regression performed between the temperature measurements of the designed hexagonal and square models and the reference measurements of the Campbell shelter. The blue dots represent the relationship between the hexagonal model and the reference model, and the green dots of the square model with the reference model.

O gráfico de linha apresentado para a série temporal das medidas de temperatura (Figura 3) evidencia a concordância entre as medidas tanto do modelo de abrigo sextavado como o quadrado com as medidas de referência da Campbell. Através da análise destas séries temporais é possível observar que a linha "verde" com as medidas do abrigo quadrado praticamente se sobrepõem sobre as medidas do modelo sextavado e as do modelo da Campbell, mostrando que mesmo os valores máximos e mínimos possuem uma relação.

Os valores de R^2 encontrados para as regressões lineares realizadas entre as medidas de temperatura dos modelos de abrigo sextavado e quadrado (Figura 4), foram praticamente idênticos, com variações a partir da terceira casa decimal.

As medidas de umidade relativa, séries temporais e regressões lineares são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. Para o caso da umidade relativa observa-se que para os valores máximos medidos por volta do dia 04/09 (Figura 5) as medidas realizadas pelos abrigos de modelos sextavado e quadrado subestimaram as medidas do abrigo de referência da Campbell. Entretanto a regressão linear entre estas medidas (Figura 6) deixa claro a concordância entre as mesmas.

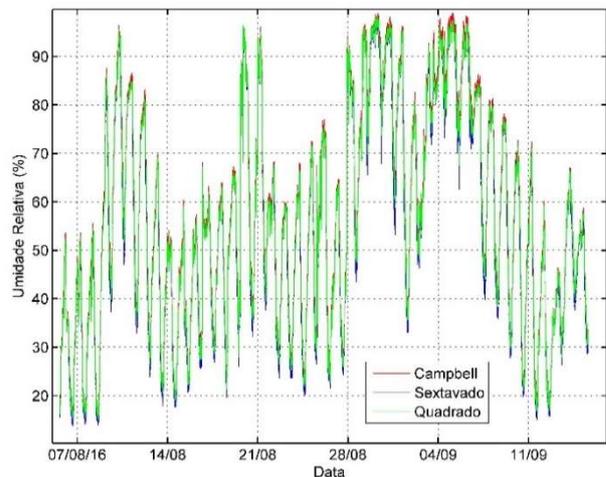


Figura 5. Série temporal das medidas de umidade relativa, medidas com o abrigo de referência da Campbell "linha vermelha", com abrigo projetado de modelo sextavado "linha azul" e com o abrigo de modelo quadrado "linha verde".

Figure 5. Temporal series of relative humidity measurements, obtained with Campbell's reference "red line" shelter, with designed hexagonal shelter "blue line" and with the square model shelter "green line".

Os parâmetros das regressões apresentadas nas Figuras 4 e 6, são apresentadas na Tabela 1. Os coeficientes angulares e lineares, a e b , respectivamente, podem ser utilizados como parâmetros de ajuste para uma futura calibração dos modelos de abrigos termo-higrométricos semelhantes aos desenvolvidos deste trabalho. Os parâmetros da regressão indicam uma boa aderência entre os dados dos modelos de abrigos projetados e o de referência. Com valores de coeficiente angular próximos de 1 (um) e valores de coeficiente linear próximos de 0 (zero), as medidas dos modelos projetados explicam 99,9 % (R^2 de 0,99) das medidas do abrigo de referência da Campbell.

Os valores encontrados de erro médio absoluto (*EMA*), raiz do erro quadrado médio (*REQM*) e índices de Willmott (d) são apresentados na Tabela 2.

Os baixos valores de *EMA* e *REQM* indicam a baixa variabilidade das medidas, principalmente de temperatura, obtidas pelos abrigos projetados em relação as medidas de referência do abrigo da Campbell. Os valores encontrados para os índices de Willmott, próximos a 1 (um), ou seja, a concordância das medidas dos abrigos projetados é praticamente perfeita quando relacionadas as medidas do abrigo de referência.

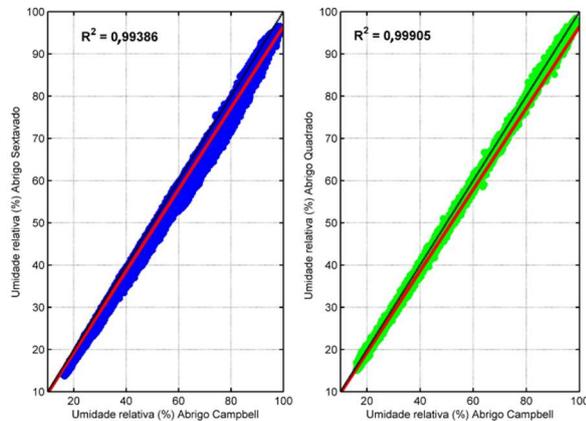


Figura 6. Regressão linear realizada entre as medidas de umidade relativa com os modelos projetados sextavado e quadrado e as medidas de referência do abrigo da Campbell. Os pontos azuis representam a relação entre o modelo sextavado com o de referência, e os pontos verdes do modelo quadrado com o de referência.

Figure 6. Linear regression between the relative humidity measurements with the hexagon and square projected models and the Campbell reference measurements. The blue dots represent the relationship between the hexagonal model and the reference model, and the green dots of the square model with the reference model.

Tabela 1. Parâmetros das regressões lineares entre as medidas de temperatura e umidade relativa dos modelos projetados e o de referência. Coeficiente angular (a), linear (b) e o coeficiente de determinação (R^2).

Table 1. Parameters of the linear regressions between the measures of temperature and relative humidity of the projected models and the reference. Angular coefficient (a), linear (b) and coefficient of determination (R^2).

| Variável | | a | b | R^2 |
|------------------|-----------|--------|---------|--------|
| Temperatura | Sextavado | 1.0400 | -0,8572 | 0,9943 |
| | Quadrado | 0,9989 | 0,3845 | 0,9948 |
| Umidade relativa | Sextavado | 1.020 | -2,4540 | 0,9938 |
| | Quadrado | 0,9923 | -0,7275 | 0,9990 |

Tabela 2. Resultados estatísticos do desempenho dos abrigos termo-higrométricos projetados. Erro médio absoluto (EMA), raiz do erro quadrado médio (REQM) e índice de Willmott.

Table 2. Statistical performance results of the projected thermal-hygrometric shelters. Mean absolute error (EMA), root mean square error (REQM) and Willmott index.

| Variável | | EMA | REQM | d |
|------------------|-----------|--------|--------|--------|
| Temperatura | Sextavado | 0,4267 | 0,4805 | 0,9982 |
| | Quadrado | 0,4483 | 0,4985 | 0,9981 |
| Umidade relativa | Sextavado | 1,2091 | 1,4250 | 0,9962 |
| | Quadrado | 2,3416 | 0,6135 | 0,9991 |

4. DISCUSSÃO

As series temporais, Figuras 3 e 5, respectivamente, mostram a variação característica da temperatura e umidade relativa na região de Cuiabá para o período de análise. Nos meses de agosto e setembro esta região se encontra em um

período de seca com altos valores de temperatura do ar e quedas expressivas nos valores de umidade relativa. No período analisado, a temperatura média foi de 30°C. Entretanto observa-se que em vários dias de análise a temperatura superou os 40°C, como na semana do dia 14/08 ao dia 20/08.

Graficamente não há diferença entre os valores medidos de temperatura pelos modelos de abrigos projetados (sextavado e quadrado) e o de referência (Campbell). O resultado encontrado neste trabalho para os valores de temperatura se assemelha ao encontrado por Neves et al. (2015). Entretanto, com uma amostragem significativamente maior de medidas. As amplitudes encontradas para os valores de temperatura do ar ainda se assemelham com as medidas de referência encontradas nos trabalhos de Valin Jr et al. (2016a) e Valin Jr et al. (2016b), entretanto as medidas dos abrigos projetados neste trabalho se evidenciam estatisticamente validas para uma possível replicação da metodologia proposta.

A variação horária da temperatura do ar obtida com os abrigos projetados e o agrido de referência é apresentada na Figura 7. É possível verificar que a amplitude máxima da temperatura do ar ocorre por volta das 14 horas, no horário local. Observa-se também que todas as medidas, modelos projetados e medida de referência, apresentam a mesma variação horária para a distribuição de temperatura.

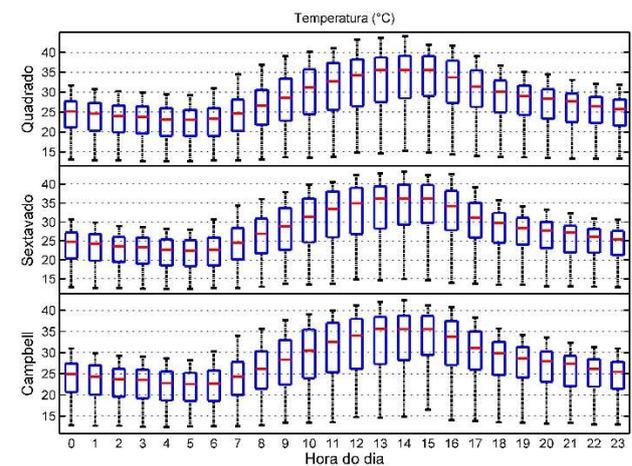


Figura 7. Distribuição horária da temperatura do ar obtidas pelos abrigos projetados, sextavado e quadrado, e pelo abrigo de referência da Campbell.

Figure 7. Hourly distribution of air temperature obtained by the hexagon and square designed shelters, and Campbell reference shelter.

Os resultados estatísticos (parâmetros de regressão, *EMA* e *REQM* e índice de Willmott) apresentaram-se de forma satisfatória, validando as medidas realizadas por ambos modelos projetados, tanto para temperatura quanto para umidade relativa do ar.

Diferente dos trabalhos propostos por de Valin Jr et al. (2016a), Valin Jr et al. (2016b), Valin Jr et al. (2016c) Neves et al. (2015) este estudo propõe a utilização de abrigos termo-higrométricos projetados com diferentes arquiteturas, que possam ser replicados calibrados e certificados pelo presente trabalho. A metodologia proposta nesse trabalho garante a eficácia das medidas realizadas por abrigos que sigam o desenvolvimento deste instrumento seguindo o processo de construção do abrigo termo-higrométrico.

Inúmeras são as aplicações, para os modelos projetados por esse trabalho, uma vez que as medidas de temperatura do ar e

umidade relativa são essenciais para o avanço no entendimento da dinâmica do clima, tanto na análise de variações urbanas (urbanização e conforto térmico) como no próprio entendimento da dinâmica de ecossistemas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram desenvolvido abrigos termo-higrométricos, impressos em uma impressora 3D (impressora de fio quente) com material biodegradável PLA. Os resultados apresentados mostraram-se eficazes. As medidas de temperatura e umidade relativa do ar obtidas com os abrigos projetados (modelos sextavado e quadrado) foram avaliadas e validadas com as medidas obtidas em um abrigo de referência da Campbell.

Os resultados estatísticos constataram através do índice de Willmott uma ótima concordância entre as medidas dos abrigos projetados e o abrigo de referência. Através do coeficiente de determinação foi constatado que praticamente todas as medidas realizadas pelos abrigos projetados explicam 99,9% das medidas de referência. A amplitude das medidas de temperatura e umidade relativa do ar obtidas pelos modelos projetados responderam de forma satisfatória quando comparada as obtidas com o abrigo de referência da Campbell.

A metodologia proposta para o desenvolvimento dos abrigos, assim como os parâmetros das regressões apresentadas, torna este trabalho reaplicável para o desenvolvimento em novas pesquisas. A amplitude das medidas de temperatura e umidade relativa do ar obtidas pelos modelos projetados responderam de forma satisfatória quando comparada as obtidas com o abrigo de referência da Campbell.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seus agradecimentos ao (PGFA) Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da UFMT, à FAPEMAT (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso), ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento para a realização deste estudo.

7. REFERÊNCIAS

- MARQUES, J. B. Desenvolvimento de sistema para monitoramento e aquisição de dados microclimáticos utilizando o programa Epics. 2016. 69f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2016.
- NEVES, G. R. A. Desenvolvimento de um sistema automatizado com sensores alternativos para coleta e armazenamento de dados micrometeorológicos. 2013. 67f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) - Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2013.
- NEVES, G. R. A.; MARQUES, J. B.; NOGUEIRA, J. S.; BIUDES, M. S.; ARRUDA, P. H. Z.; CURADO, L. F. A.; PALÁCIOS, R. S. Desenvolvimento e Calibração de um Termohigrômetro para uso em Pesquisas de Micrometeorologia, Agrometeorologia e Climatológica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, Recife, v. 8, n. 1, p. 136-143, 2015.
- SERAFINI JÚNIOR, S.; ALVES, R. R. Miniabrigos meteorológicos: comparação e análise estatística para avaliação de eficiência. *GEOUSP - Espaço e Tempo (online)*, São Paulo, v. 18, n. 1, p. 198-210, 2014. DOI:

<https://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2014.81099>

- VALIN JR, M. O.; RIBEIRO, K. F. A.; SANTOS, V. A. B. R.; NEVES, G. A. R.; SANTOS, F. M. M.; NOQUEIRA, M. C. J. A. Avaliação de abrigos alternativos para termo-higrometros em função do custo, manuseio e análise estatística do desempenho. *Ciência e Natura*, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 1086-1101, mai./ago. 2016b.
- VALIN JR, M. O.; SANTOS, F. M. M.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; DE MUSIS, C. R.; NOGUEIRA, J. S. Utilização de abrigos termo-higrométricos alternativos. *Caminhos da Geografia (UFU. Online)*, Uberlândia, v. 17, n. 57, p. 74-91, mar. 2016c. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG175705>
- VALIN JR, M. O.; SANTOS, F. M. M.; RIBEIRO, K. F. A.; NOGUEIRA, M. C. J. A.; NOGUEIRA, J. S. Análise da relação entre abrigos meteorológicos alternativos para pontos fixos e o comportamento de variáveis termo-higrométricas. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, v. 18, p. 157-179, jan./jun. 2016a. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v18i0.45146>
- WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, Washington, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. DOI: <https://dx.doi.org/10.1029/JC090iC05p08995>
- WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, Oldendorf, v. 30, n. 1, p. 79-82, dez. 2005. DOI: <https://dx.doi.org/10.3354/cr030079>
- YOU-WEN, S.; YI, Z.; WEN-QING, L.; PIN-HUA, X.; KALOK; C.; XIAN-XIN, L.; SHU-HUA, H. Cross-interference correction and simultaneous multi-gas analysis based on infrared absorption. *Chinese Physics B*, New York, v. 21, n.9, p.090701, 2012. DOI: <https://dx.doi.org/10.1088/1674-1056/21/9/090701>