APLICAÇÃO DO MÉTODO PROBIT PARA A CALIBRAÇÃO DE ÍNDICES TÉRMICOS PARA ESPAÇOS ABERTOS[1]

KRÜGER, E., Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), e-mail: ekruger@utfpr.edu.br; CRISTELI, P. S., Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), e-mail: paycristeli@hotmail.com; SOUZA, H., UFOP, e-mail: henorster@gmail.com; ROSSI, F. A., Universidade Federal do Paraná (UFPR), e-mail: rossi@ufpr.br; COSTA, T., UTFPR, e-mail: atamiriscosta@gmail.com

ABSTRACT

In climate-responsive urban planning, it is necessary to adapt existing thermal index to specific local conditions, a process commonly called calibration. In this article, two distinct indices are calibrated for Curitiba, PR, based on empirical data: the Universal Thermal Climate Index (UTCI) and the Physiological Equivalent Temperature (PET) index. The objective was to present the calibration of both indices for Curitiba, PR, a high-altitude location with temperate climate (Cfb). Climatic and subjective data were obtained in outdoor thermal campaigns with concurrent questionnaire surveys between 2009 and 2010, covering summer, autumn and winter. For the calibration, the Probit method was employed. Results showed larger discrepancies for the lower limit of the comfort range in both indices, which may reflect the longer exposure to cold situations in Curitiba, not just outdoors but also indoors, when compared to the European life style where both indices originate.

***Keywords**: Index calibration. Urban climate., Outdoor thermal comfort.*

1 INTRODUÇÃO

No planejamento climaticamente orientado de espaços livres urbanos, é necessária a compreensão das relações entre níveis de conforto/desconforto térmico da população local e as condições climáticas, às quais estará exposta. Uma das formas de avaliação consiste da utilização de índices de conforto térmico, desde que devidamente adaptados à realidade social, econômica e cultural dos locais onde serão futuramente adotados e levando-se em conta as preferências térmicas da população local. O processo de adaptar determinado índice existente às condições específicas locais é comumente denominado calibração.

Neste artigo, dois índices distintos são calibrados para Curitiba, PR, a partir de dados empíricos: o Universal Thermal Climate Index (UTCI) e o índice denominado Physiological Equivalent Temperature (PET). Ambos os índices utilizam dados apoiados em variáveis meteorológicas, como a temperatura do ar (Ta), umidade relativa (UR), velocidade do ar (Va) e radiação solar (RS), partir da qual calcula-se a temperatura radiante média (Trm). Os valores dos dois índices representam temperaturas equivalentes, associadas a classes de conforto e estresse térmico.

1 KRÜGER, E. *et al*. Aplicação do Método PROBIT para a Calibração de Índices Térmicos para Espaços Abertos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. **Anais**... Porto Alegre: ANTAC, 2018.

O UTCI foi elaborado com base no modelo termorregulatório multinodal desenvolvido por Fiala, Lomas e Stohrer (1999, 2001, 2003, 2007) e Fiala et al. (2011) e segue o conceito da temperatura equivalente para um ambiente de referência, sendo expresso em graus Celsius.

O índice PET baseia-se no balanço térmico do corpo segundo o modelo MEMI (Munich Energy-balance Model for Individuals). Os valores estimados são expressos em graus Celsius e são definidos como a temperatura fisiológica equivalente, em um determinado ambiente (interno ou externo), à temperatura do ar de um ambiente interno de referência, no qual o balanço térmico humano é mantido com temperatura da pele e do centro do corpo iguais àquelas das condições em avaliação (HÖPPE, 1999).

Ambos os índices vêm sendo utilizados tanto para a avaliação de microclima urbano como no processo de planejamento urbano climaticamente orientado, sendo também empregados para estudos de projeção de impactos das mudanças climáticas na grande área de Biometeorologia Humana.

O presente estudo teve como objetivo apresentar uma calibração de ambos os índices para Curitiba, PR, cidade de clima temperado de altitude (Cfb). Os dados climáticos e subjetivos foram obtidos em campanhas de monitoramento térmico entre 2009 e 2010, abrangendo verão, meia-estação e inverno. Para a calibração, foi utilizado o método das curvas Probit.

2 MÉTODO

A calibração foi realizada a partir de dados obtidos em estudo de campo, o qual envolveu intensivas campanhas de monitoramento térmico urbano ao longo do período entre janeiro de 2009 e agosto de 2010, abrangendo assim dados de verão, meia-estação e inverno.

2.1 Levantamento de campo das variáveis climáticas

Os levantamentos de campo ocorreram entre 10h e 15h, em ruas de pedestre na região central da cidade (Figura 1). Foram realizados 15 levantamentos de campo, com dois pontos monitorados por campanha compondo 18 pontos levantados. A comparação simultânea entre pontos distintos foi parte de um estudo paralelo (MINELLA, 2009). Os pontos foram escolhidos em função de características morfológicas, apresentando diversidade quanto a aspectos contextuais. Foram monitorados dados climáticos por meio de estações meteorológicas HOBO (Onset Computer), equipadas com anemômetro giratório, piranômetro, sensores de temperatura do ar e de umidade relativa. Acoplou-se ao conjunto um par de termômetros de globo a duas alturas. Além das variáveis de conforto, tais como Ta, UR, Va e RS, foi obtida posteriormente a temperatura radiante média, Trm, a qual se calculou a partir da equação para convecção forçada constante da ISO 7726 (1998).

Figura 1 – Pontos monitorados em Curitiba



Fonte: Rossi et al., 2012

2.2 Aplicação de questionários

Paralelamente ao monitoramento das variáveis climáticas, foram aplicados questionários de conforto, conforme a ISO 10551 (1995), envolvendo questões relativas à sensação térmica dos transeuntes. Foram levantados dados biométricos e de percepção, avaliação e preferências térmicas, aceitação pessoal e tolerância. Para a sensação térmica, variável analisada neste artigo, avaliam-se as respostas à questão "Neste exato momento, você está sentindo...?" As possibilidades de resposta seguem uma escala de sete pontos, de -3 (muito frio) a +3 (muito calor), passando por um ponto central (neutralidade, nem frio, nem calor).

2.3 Cálculo dos índices térmicos PET e UTCI

Os valores de PET foram obtidos pelo software RayMan (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER 2010) a partir das variáveis climáticas medidas com taxa metabólica fixada em 165 W/m², dados biométricos referentes a uma pessoa padrão, conforme estabelecido pela ISO 8996 (2004) e dados de vestimenta, conforme levantados em campo.

Para o cálculo do UTCI, utilizou-se o modelo UTCI-Fiala (FIALA et al., 2011), a partir de dados climáticos monitorados, sendo que os valores de velocidade do vento foram convertidos para a altura requerida para o cálculo de 10m segundo expressão logarítmica (BRÖDE et al., 2011). O grau de isolamento térmico da vestimenta é estimado a partir da temperatura do ar segundo modelo de vestimenta embutido no modelo UTCI-Fiala.

2.4 Avaliação pelo método Probit

A calibração foi realizada pelo método Probit (MCFADDEN, 1973 apud GUJARATI, 1988). O método Probit apresenta um modelo estatístico de dados ligados ao estímulo biológico (FISHER; YATES, 1971), utilizado em estudos de

conforto térmico para determinar a sensação térmica dos indivíduos em um determinado nível de estímulo por meio de uma distribuição probabilística.

Determinam-se as probabilidades de duas situações de variáveis binárias, do tipo sim ou não, em relação a outras variáveis envolvidas. Para tanto, é necessário caracterizar a medição de cada variável climática e seus respectivos votos de sensação térmica, de modo a se definir os limites de conforto térmico. Segundo Xavier (1999), a presença de desconforto por calor em dada medição é constatada quando o percentual do somatório das pessoas que votaram, segundo a escala psicofísica de sete pontos, +3 ou "muito calor", +2 ou "calor" e 50% dos que votaram +1 "um pouco de calor" é superior a 30% do total dos votos coletados na medição. Quando essa condição é verificada, diz-se que a variável dicotômica (em que só há duas respostas possíveis, no caso 0/1, correspondendo a confortável/desconfortável) assume valor igual a 1, e a probabilidade de que 30% ou mais da população se encontre desconfortável por calor é medida pela área abaixo da curva de distribuição normal. Analogamente, é constatada a presença de desconforto por frio.

No caso do presente estudo, adotaram-se três diferentes percentuais de insatisfeitos para a situação limite da faixa de conforto, quais sejam, 10%, 20% e 30%, cujos resultados são posteriormente comparados. Tais percentuais iniciam proximamente à porcentagem de insatisfeitos mínima obtida para a mesma amostra por Rossi et al. (2012) e por Krüger et al. (2018) para o UTCI e para o índice PET, respectivamente.

3 RESULTADOS

A amostra final é composta de 1685 pessoas, sendo diversificada quanto a faixas etárias, características antropométricas e condições de isolamento térmico da vestimenta. Os levantamentos abrangeram uma grande variedade de condições climáticas, para todas as variáveis (Tabela 1).

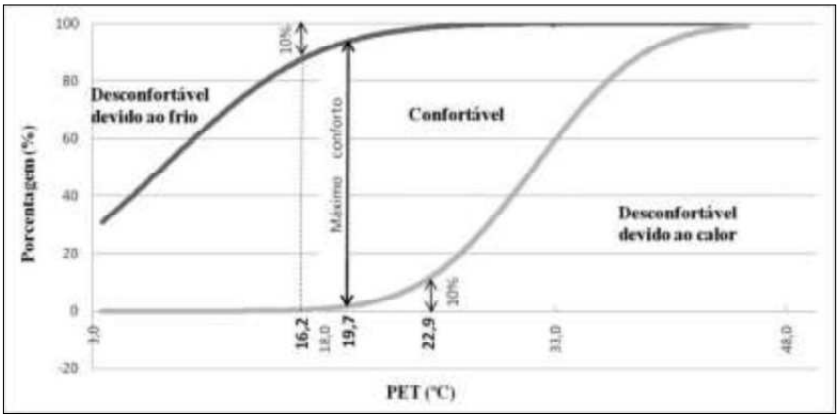
Tabela 1 – Faixas monitoradas das variáveis climáticas

	Va (m/s)	RS (W/m²)	Ta (°C)	UR (%)	Trm (°C)
Média	1,0	280	19,9	56	31,3
Desvio Padrão	0,5	302	5,5	13	13,9
Mínimo	0,0	1	6,4	23	9,8
Máximo	2,7	1199	30,7	93	72,3

Fonte: os autores

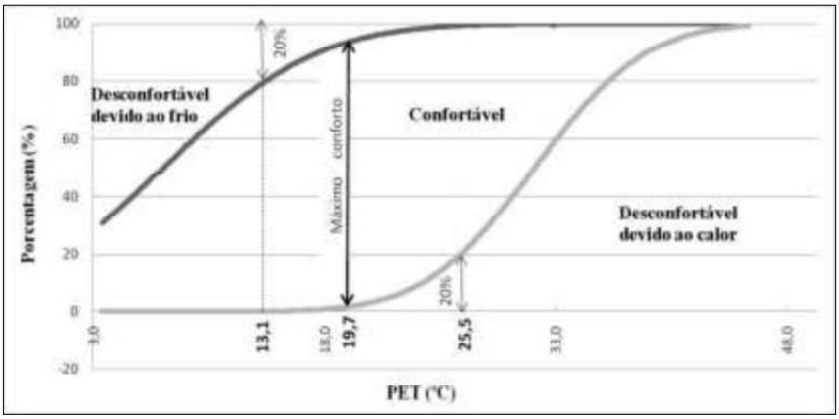
A aplicação do método Probit para o índice PET, assumindo três diferentes percentuais de pessoas insatisfeitas para a situação limite da faixa de conforto é apresentada nas Figuras 2 a 4, respectivamente.

Figura 2 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 10% de insatisfeitos – índice PET



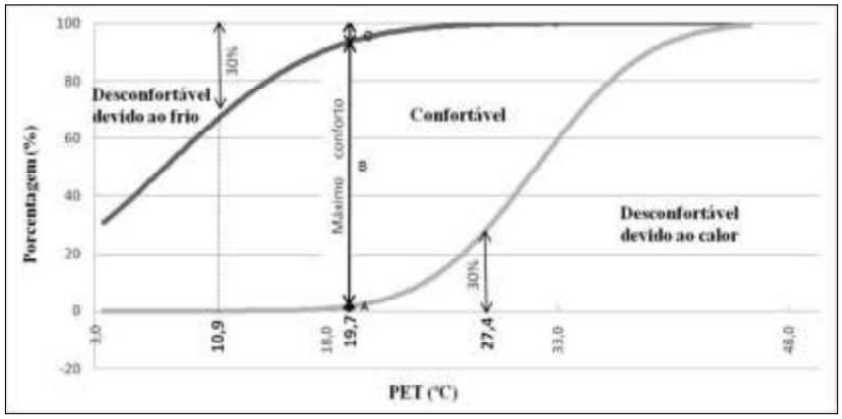
Fonte: os autores

Figura 3 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 20% de insatisfeitos – índice PET



Fonte: os autores

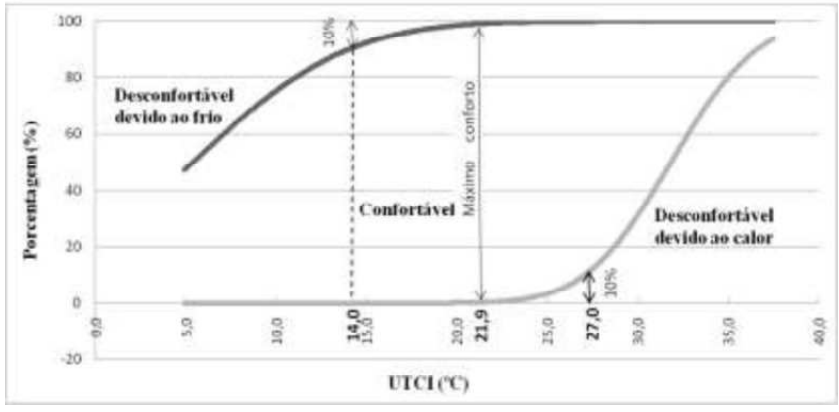
Figura 4 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 30% de insatisfeitos – índice PET



Fonte: os autores

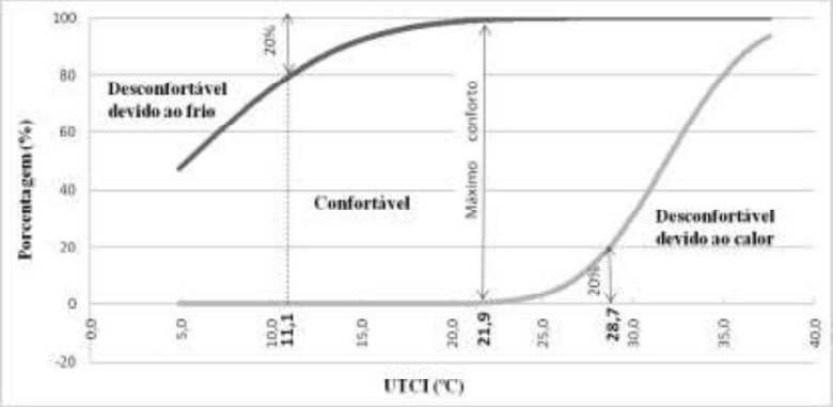
Nas Figuras 5-7 mostra-se o comportamento da curva de porcentagem de pessoas satisfeitas versus o índice UTCI para 10%, 20% e 30% de pessoas insatisfeitas. A interpretação dos resultados das curvas Probit geradas é dada por Fontanella (2009). Uma linha traçada em algum valor do eixo das ordenadas (temperatura em PET), como no ponto de máximo conforto, de 19,7°C, por exemplo, intercepta estas curvas formando três segmentos de reta, conforme representados didaticamente na Figura 4. O comprimento total da linha representa 100% dos votos do grau de satisfação, mas cada segmento tem um significado diferente: o segmento inferior "A" representa a porcentagem de escolha relativa ao desconforto devido ao calor, o segmento central, "B", representa a porcentagem confortável e o segmento superior "C" representa a porcentagem relativa ao desconforto devido ao frio.

Figura 5 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 10% de insatisfeitos – UTCI



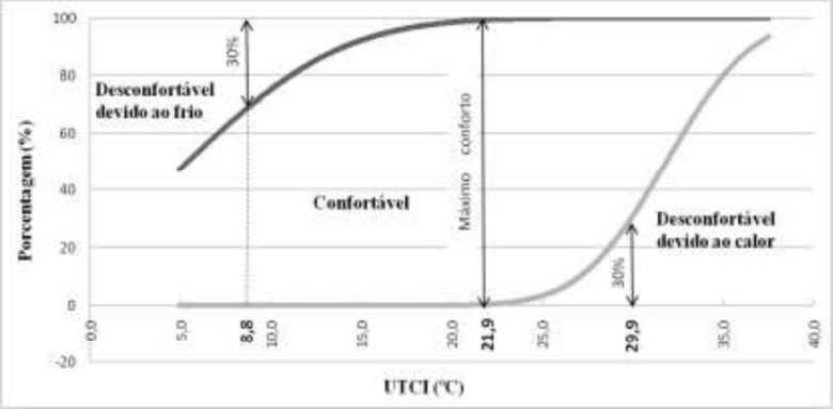
Fonte: os autores

Figura 6 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 20% de insatisfeitos – UTCI



Fonte: os autores

Figura 7 – Curvas Probit para frio (votos -3, -2 e 50% dos votos -1) e calor (votos +3, +2 e 50% dos votos +1) com indicação da faixa de 30% de insatisfeitos – UTCI



Fonte: os autores

Nas Figuras 2-7, podem-se notar faixas variáveis de conforto para ambos os índices, dadas segundo a situação limite considerada (10%, 20% e 30% de insatisfeitos), permanecendo invariável o valor do índice PET e do UTCI com a maior percentagem de pessoas em situação de conforto, de 19,7°C e 21,9°C, respectivamente. Na Tabela 2, resumem-se os valores encontrados, sendo as faixas cada vez mais restritivas em função dos percentuais adotados de pessoas insatisfeitas. Na mesma Tabela, são apresentadas as faixas originais das zonas de conforto originais (sem estresse térmico), para ambos os índices.

Tabela 2 – Faixas de conforto para o UTCI e para o índice PET, para Curitiba

Percentual de insatisfeitos	Valores em PET	Faixa de conforto para o PET (Matzarakis e Mayer, 1996)	Valores em UTCI	Faixa de conforto para o UTCI (Bröde et al., 2011)
10%	16,2°C a 22,9°C		14,0°C a 27,0°C	
20%	13,1°C a 25,5°C	18,0°C a 23,0°C	11,1°C a 28,7°C	18,0°C a 26,0°C
30%	10,9°C a 27,4°C		8,8°C a 29,9°C	

Fonte: os autores

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apontaram haver diferenças entre as faixas de conforto obtidas pelo método Probit e os valores originais propostos pelos desenvolvedores dos índices analisados. Adotando-se um percentual de insatisfeitos admissível de 20% para transeuntes em espaços abertos (em pesquisa anterior, chegou-se analiticamente a um mínimo de 15% de insatisfeitos para uma faixa de sensação térmica entre -0,5 a +0,5), ambos os índices apresentam uma discrepância maior para o limite inferior do que para o limite superior da faixa de conforto original. Tais discrepâncias estão relacionadas à tolerância térmica da população, mais frequentemente exposta a condições frias do que de calor. A divergência do limite inferior ao proposto pelos desenvolvedores de ambos os índices deve-se possivelmente a uma maior parcela de tempo que a população curitibana está sujeita a situações de frio, no inverno, tanto no espaço externo como internamente, nas edificações, em geral, não devidamente aquecidas.

REFERÊNCIAS

BRÖDE, P.; FIALA, D.; BLAZEJCZYK, K.; HOLMÉR, I.; JENDRITZKY, G.; KAMPMANN, B.; TINZ, B.; HAVENITH, G. Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI. **International Journal of Biometeorology**, special issue UTCI, 2011.

FIALA, D. et al. UTCI-Fiala Multi-Node Model of Human Heat Transfer and Temperature Regulation. **International Journal of Biometeorology**, special issue UTCI, 2011.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. A Computer Model of Human Thermoregulation for a Wide Range of Environmental Conditions: the passive system. **Journal of Applied Physiology**, v. 87, p. 1957-1972, 1999.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. Computer Prediction of Human Thermoregulatory and Temperature Responses to a Wide Range of Environmental Conditions. **International Journal of Biometeorology**, v. 45, n. 3, p. 143-159, 2001.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort. In: MEKJAVIC, I. B.; KOUNALAKIS, S. N.; TAYLOR, N. A. S. (Eds.). In: **International Conference on Environmental Ergonomics**, 12., Portoroz, Slovenia, 2007. Proceedings… Portoroz, Slovenia, 2007. p. 513-515.

FIALA, D.; LOMAS, K. J.; STOHRER, M. First Principles Modeling of Thermal Sensation Responses in Steady-State and Transient Conditions. **ASHRAE Transactions**, v. 109, p. 179-186, 2003.

FISHER, R. A; YATES, F. **Tabelas estatísticas: para pesquisa em biologia, medicina e agricultura**. Tradução de Salvador Licco Haim. São Paulo: Ed. Da Universidade de São Paulo e Ed. Polígono, 1971.

FONTANELLA, M. S. **Percepção do Ambiente Térmico: preferências subjetivas e conforto térmico.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas) - Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG, 2009.

GUJARATI, D. N. **Basic Econometrics**. Cap. 15: Regression on Dummy Dependent Variable: The LPM, LOGIT and PROBIT Models. New York, McGraw-Hill Book Company, 1988.

HÖPPE, P. The Physiological Equivalent Temperature: an index for the biometeorological assessment of the thermal environment. **International Journal of Biometeorology**, v.43. p.71-75, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10551. **Ergonomics of the thermal environments – Assessment of the influence of the thermal environment using subjective judgment scales.** Genebra: ISO, 1995.

_____. ISO 7726. **Ergonomics of the thermal environments – Instruments for measuring physical quantities.** Genebra: ISO, 1998.

_____. ISO 8896. **Ergonomics of the thermal environments – Determination of thermal metabolic rate.** Genebra: ISO, 2004.

KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A.; CRISTELI, P. S.; SOUZA, H. A. Calibração do índice de conforto para espaços externos Physiological Equivalent Temperature (PET) para Curitiba. **Ambiente Construído**. Edição especial ENCAC 2017, 3ª edição de 2018 (em editoração).

MATZARAKIS, A.; MAYER, H. Another kind of environmental stress: thermal stress. **WHO newsletter**, v.18, p.7–10, 1996.

MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the RayMan model. **International Journal of Biometeorology**, v.54, p.131–139, 2010.

MCFADDEN, D. **Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior.** Frontiers in Econometrics, Academic Press, New York, 1973.

MINELLA, F. **Avaliação da influência de aspectos da geometria urbana sobre os níveis de conforto térmico em ruas de pedestres de Curitiba.** 2009. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós Graduação em Tecnologia/ Universidade Tecnológica Federal do Paraná).

ROSSI, F.A.; KRÜGER, E.L.; BRÖDE, P. Definição de faixas de conforto e desconforto térmico para espaços abertos em Curitiba, PR, com o índice UTCI. **Ambiente Construído**, v.12, p.41-59, 2012.

XAVIER, A. A. P. **Condições de Conforto Térmico para Estudantes de 2° Grau na Região de Florianópolis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 1999.