



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VII ELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

CONFORTO TÉRMICO URBANO: TEMPERATURA EQUIVALENTE DE GLOBO

Leonardo Marques Monteiro (1); Marcia Peinado Alucci (2)

(1) Pós-Doutorando do Departamento de Tecnologia, leo4mm@gmail.com

(2) Profa. Dra. do Departamento de Tecnologia, marcialu@usp.br

Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia
Rua do Lago, 876 – Cidade Universitária – São Paulo-SP – Tel. 11 3091-4538 r.215

RESUMO

Os estudos brasileiros na área de pesquisa de conforto térmico em espaços urbanos abertos, que focam especificamente as relações entre variáveis microclimáticas e as de sensação térmica, foram ampliados significativamente nos últimos anos. Desde o trabalho inicial de Costa (2003), podem ser citados dos últimos cinco anos: Borges e Labaki (2006), Monteiro e Alucci (2007, 2009), Moreno *et al.* (2007, 2008), Pezzuto e Labaki (2007), Monteiro (2008), Prata-Shimomura *et al.* (2009), Brusanti e Fontes (2009), Shimakawa e Bueno-Bartholomei (2009), Dacanal *et al.* (2009), Barbosa *et al.* (2010), Hirashima (2010), Kruger e Rossi (2011). Nesse panorama, este trabalho contribui ao fornecer um modelo específico. Se os trabalhos anteriores focavam nas diversas variáveis ambientais (ou naquelas que efetivamente se tem algum controle em espaços abertos), este trabalho foca na variável temperatura de globo. O objetivo é propor um modelo preditivo de sensação térmica que possa ser utilizado em situações em que sejam necessários ou desejados levantamentos *in loco*, buscando para tanto a simplificação de procedimentos de modo a facilitar a execução dos levantamentos. Para tanto, os métodos empregados são levantamentos de campo em espaços urbanos abertos, com quantificação de variáveis ambientais e aplicação de questionários. Os dados são tratados estatisticamente, considerando-se regressões lineares simples, múltiplas e regressões não lineares. É proposta a temperatura equivalente de globo, que permite a predição de sensação térmica por meio de levantamentos *in loco* utilizando apenas um instrumento. Os resultados do modelo apresentaram alta correlação ($r=0,93$) e significância ($p<0,001$) considerando sua base empírica, e também alta correlação ($r=0,90$) e significância ($p<0,001$) considerando uma segunda base empírica, utilizada para verificação.

Palavras-chave: conforto térmico, espaços abertos, modelos preditivos, temperatura equivalente.

ABSTRACT

The Brazilian studies on outdoor thermal comfort, focusing specifically the relations between microclimatic variables and those of thermal sensation, were significantly enlarged in the last years. From the initial work of Costa (2003), one may quote from the last five years: Borges and Labaki (2006), Monteiro and Alucci (2007, 2009), Moreno *et al.* (2007, 2008), Pezzuto and Labaki (2007), Monteiro (2008), Prata-Shimomura *et al.* (2009), Brusanti and Fountains (2009), Shimakawa and Bueno-Bartholomei (2009), Dacanal *et al.* (2009), Barbosa *et al.* (2010), Hirashima (2010), Kruger and Rossi (2011). This work contributes with a specific model. Whilst previous works focused in several environmental variables (or in those which one may have some control in open spaces), this work focuses in the variable globe temperature. The objective is to propose a thermal sensation model to be used in situations in which would be necessary measurements *in loco*, looking for a simplification of tasks. The methods are field researches considering measurements of physical quantities and application of questionnaires. The data are treated statistically, considering multiple and simple linear and not linear regressions. Equivalent globe temperature is proposed, which allows the prediction of thermal sensation using only one measurement instrument. The results of the model presented high correlation ($r=0,93$) and significance ($p < 0,001$) considering its empirical base, and also high correlation ($r=0,90$) and significance ($p < 0,001$) considering a second empirical base used for verification proposal.

Keywords: thermal comfort, outdoors, predictive models, equivalent temperature.

1. INTRODUÇÃO

Considerando os estudos de conforto térmico em espaços urbanos abertos, que focam especificamente as relações entre variáveis microclimáticas e as de sensação térmica, Monteiro e Alucci (2005) colocam que o único estudo de abrangência localizado no país até então era o de Costa (2003), realizado no Bairro de Petrópolis, em Natal, considerando as variáveis temperatura, umidade e velocidade do ar e realizando 171 entrevistas válidas em três períodos do ano de 2002. Desde então, o panorama brasileiro dos estudos de conforto térmico em espaços urbanos abertos foi significativamente ampliado.

Monteiro e Alucci (2005) apresentam procedimento para quantificação de variáveis ambientais e subjetivas em espaços abertos. Borges e Labaki (2006) comparam o voto médio estimado e as sensações e preferências dos usuários em Campinas-SP. Monteiro e Alucci (2007) apresentam resultados de estudo comparativo de diferentes modelos. Moreno *et al.* (2007) consideram temperatura de bulbo seco, umidade relativa e velocidade do ar, aplicando 108 questionários em Campinas. Pezzuto e Labaki (2007) avaliam o conforto térmico em áreas abertas de fluxos de pedestres em Campinas. Monteiro (2008) propõe modelo baseado em temperatura equivalente para predição da sensação térmica baseando-se na aplicação de 2258 questionários. Moreno *et al.* (2008) discutem zona de conforto baseada em diagrama tridimensional. Prata-Shimomura *et al.* (2009) consideram situações microclimáticas urbanas reais, comparando-as com situações simuladas em túnel de vento. Monteiro e Alucci (2009) apresentam proposição e verificação de modelo preditivo de sensação térmica. Brusanti e Fontes (2009) exploraram a questão do conforto térmico em espaços públicos de permanência na cidade de Bauru-SP, destacando-se aqui as diferenças que foram encontradas pelas autoras entre a sensação e a satisfação térmica. Shimakawa e Bueno-Bartholomei (2009) aplicam modelos preditivos (PET e PMV) para estudo de caso em Presidente Prudente-SP. Dacanal *et al.* (2009) discutem estudo de caso de conforto térmico em espaços livres públicos em Campinas. Barbosa *et al.* (2010) avaliam o nível do conforto dos usuários em seis pontos distintos de praça em Campinas. Hirashima (2010) propõe calibração do índice PET para Belo Horizonte. Monteiro e Alucci (2010) verificam comparativamente os resultados de bases empíricas laboratoriais e de campo, estabelecidas na cidade de São Paulo. Kruger e Rossi (2011) apresentam resultados de sensação térmica em Curitiba, por meio de regressão linear.

Dentro de todo esse panorama, este trabalho vem contribuir ao fornecer um modelo específico. Se os trabalhos anteriores focavam nas diversas variáveis ambientais (ou naquelas que efetivamente se tem algum controle em espaços abertos, como em Kruger e Rossi, 2011), este trabalho foca na variável temperatura de globo, que considera as trocas radiantes e convectivas, possibilitando a predição da sensação térmica por meio de levantamentos *in loco* de forma simplificada.

2. OBJETIVO

O objetivo é propor um modelo preditivo de sensação térmica dos usuários de espaços externos utilizando apenas a temperatura de globo.

3. MÉTODOS

3.1. Levantamentos de campo

Nesta pesquisa, realizaram-se levantamentos de campo em situações urbanas, aplicando-se questionários a usuários dos espaços em questão. A base empírica estabelecida abrange conjunto de dados de levantamentos realizados em dias de verão e de inverno no Bairro da Luz, em São Paulo, SP. Estes levantamentos são considerados em detalhes por Monteiro e Alucci (2010) e aqui apresentados sucintamente para compreensão dos desenvolvimentos realizados.

Considerando o bairro em questão, e devido à quantidade de equipamentos disponíveis, foram estabelecidas três bases para levantamentos simultâneos, sendo ao todo abarcados cinco locais distintos, selecionados com base na diversidade de configurações tipológicas e que se configurassem como de passagem e/ou de permanência. Dessa forma, os levantamentos de verão foram realizados em uma rua (Rua dos Andradas), em uma praça (Praça Sala São Paulo) e em um parque (Parque da Luz). Ressalta-se que o primeiro local é predominantemente de passagem, o terceiro é predominantemente de permanência, e o segundo apresenta as duas situações. Nos levantamentos de inverno, devido à menor quantidade de pessoas disponíveis para sua realização, somada às dificuldades encontradas para o gerenciamento simultâneo dos levantamentos nos diferentes locais, optou-se pela seleção de locais mais próximos entre si, mas que mantivessem as características inicialmente estabelecidas. Dessa forma, buscaram-se a diversidade tipológica e a heterogeneidade de usos. Ao mesmo tempo, optou-se por manter um mesmo ponto levantado no período de verão, para que comparações diretas pudessem ser realizadas. Assim, manteve-se o ponto do parque

(Parque da Luz), com uso predominante de permanência. Os demais pontos para realização dos levantamentos foram estabelecidos considerando-se uma rua e uma praça, apresentando assim características tipológicas e de uso distintas, sendo um local de passagem e de permanência (Praça da Luz, na entrada do Parque da Luz) e um local de passagem (na entrada da Estação da Luz).

As Figuras 1 a 4, originalmente em Monteiro e Alucci (2010), indicam os ambientes físicos e as condições de exposição ao céu de cada uma das bases levantadas no verão e no inverno.



Figura 1: Vista das bases levantadas empiricamente no verão.

Figura 2: Vista das bases levantadas empiricamente no inverno.



Figura 3: Condições de exposição ao céu das bases no verão.

Figura 4: Condições de exposição ao céu das bases no inverno.

3.2. Quantificação de variáveis

3.2.1. Variáveis ambientais

As variáveis ambientais microclimáticas consideradas nesta pesquisa foram temperatura, umidade e velocidade do ar, e temperatura radiante média. Para a quantificação física das variáveis ambientais, utilizou-se a norma ISO 7726 (1998), seguindo Monteiro e Alucci (2005).

A realização da quantificação de variáveis deve levar em consideração sua homogeneidade e heterogeneidade, assim como o caráter estacionário e variacional do tempo das grandezas medidas. Consideraram-se ainda as posições utilizadas na medição das quantidades físicas e os coeficientes de ponderação usados no cálculo do valor médio dessas quantidades. Com base em resultados de Monteiro (2008), realizando pré-testes de medições nas três alturas recomendadas, ao longo de dias de verão e de inverno, verificou-se para diferentes tipologias distintas de espaços abertos que os ambientes ali configurados eram homogêneos. Ressalta-se que foram verificados alguns desvios apenas ligeiramente maiores do que o especificado pela norma para as variáveis temperatura radiante média e velocidade do ar nas medições realizadas a 0,1 m. Dessa forma, nos levantamentos realizados, devido aos resultados prévios, realizaram-se medições apenas a 1,1 m de altura, uma vez que as atividades verificadas, com as pessoas sentadas ou em pé, implicavam medições apenas a 1,1 m e a 0,6 m. Como se considerou que os ambientes são suficientemente homogêneos, não se fez distinção em relação à altura, tendo sido eleita a de 1,1 m, pois a grande maioria dos usuários dos espaços exercia atividades em pé.

Com relação aos sensores para quantificação física, para determinação da temperatura do ar foram utilizados sensores do tipo semiconductor. A faixa de leitura é de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, com resolução de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, e tempo de resposta de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Para a obtenção da umidade relativa, foram empregados sensores de capacitância. A faixa de leitura é de 10% a 95%, com resolução de 0,1%, precisão de $\pm 3\%$ (a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, entre 30% e 95%) e $\pm 5\%$ (a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, entre 10% e 30%), e tempo de resposta de 3 min para mudança de 45% a 95%, e de 5 min para o inverso. Quanto à velocidade do vento, utilizaram-se sensores de velocidade do ar compostos de copo (magnitude) e pá (direção/sentido), apresentando faixa de leitura de 0,3 m/s a 30,0 m/s, resolução de 0,1 m/s e precisão de $\pm 2\%+d$.

Por fim, com relação à temperatura radiante média, essa foi estimada a partir de medições de temperatura de globo, tendo sido utilizados globos de 10 cm de diâmetro, preto fosco e cinza médio fosco, com emissividade de aproximadamente 0,95. Para determinação da temperatura do ar no centro do globo, foram utilizados sensores do tipo semiconductor, com faixa de leitura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$, resolução de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, precisão de $\pm 0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$, e tempo de resposta de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C/s}$. Com relação ao desempenho do sistema, segundo a ISO 7726 (1998), o tempo de resposta de um termômetro de globo é de aproximadamente 20 min a 30 min, dependendo das características do globo e do ambiente em avaliação. Considerando-se as quantificações físicas das variáveis anteriormente elencadas, para o cálculo da temperatura radiante média, realiza-se o balanço das trocas térmicas entre o globo e o ambiente em questão, considerando-se a temperatura do ar no

centro do globo, a temperatura e a velocidade do ar no ambiente. Como resultado, têm-se as formulações para convecção natural e convecção forçada (ISO, 1998).

3.2.1. Variáveis individuais

As variáveis individuais levantadas na pesquisa empírica foram taxa metabólica e resistência térmica da roupa. Além da estimativa desses valores, consideraram-se o trabalho mecânico e a resistência evaporativa da roupa, associados respectivamente à taxa metabólica e à resistência térmica da roupa. Na sequência, apresentam-se os critérios utilizados, seguidos dos métodos e procedimentos empregados.

Considerando-se os valores de taxa metabólica apresentados por ISO 8996 (1990), e ainda observando as atividades realizadas pelas pessoas ao longo dos pré-testes realizados nos locais dos levantamentos empíricos, determinaram-se valores para as taxas metabólicas em função das atividades observadas. Quando da aplicação do questionário de avaliação subjetiva das condições térmicas ambientais, o entrevistador tomava nota da atividade que a pessoa estava exercendo. Devido a observações feitas nos pré-testes, simplificou-se a anotação da atividade, utilizando-se apenas quatro valores referenciais. Dessa forma, os levantamentos consideram grupos de dados referentes a atividades metabólicas médias de 1,0, 1,3, 2,0 e 5,8 Met. Com relação à eficiência mecânica, devido às atividades verificadas, ela é desprezível.

Com relação aos valores de isolamento térmico, da resistência evaporativa e do fator de roupa, utilizou-se a escala da Figura 5, para que se tomasse nota das vestimentas que o entrevistado estava usando. As imagens da figura foram adaptadas da ISO 9920 (1995), em que cada peça de roupa está associada a um fator de roupa. Consideraram-se os valores tabelados de resistência térmica da roupa, adaptados da ISO 9920 (1995), e as relações entre estes e a resistência evaporativa das roupas e os fatores de roupa. Assim, os valores apresentados na figura já fazem referência ao isolamento térmico estimado em clo, tendo sido a resistência evaporativa da roupa e o fator de roupa calculados conforme as formulações normativas.

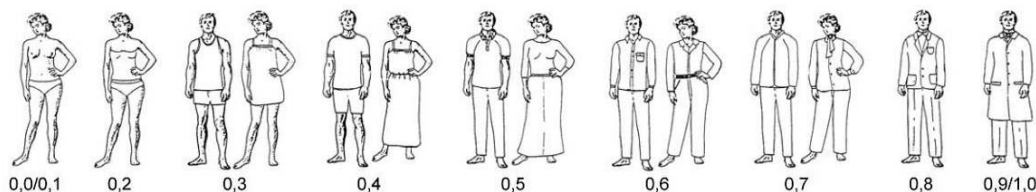


Figura 5: Isolamento térmico estimado em clo.

3.2.3. Variáveis subjetivas

As variáveis subjetivas quantificadas nesta pesquisa dizem respeito à percepção de sensação térmica e conforto térmico. O levantamento se baseou nos princípios estabelecidos pela norma ISO 10551 (1995).

Após a realização de pré-testes com diversos modelos de questionários, utilizando-se diferentes abordagens para a realização das perguntas, optou-se pelo modelo da Figura 6. Para a quantificação das variáveis subjetivas de percepção foram estabelecidas duas questões, uma para verificação de sensação térmica e outra para a de conforto térmico. Dependendo das respostas, havia uma segunda questão subsequente a cada uma delas. Para verificar a sensação térmica, a primeira questão realizada pelo entrevistador era por meio da pergunta “Neste momento, aqui, você está com frio, calor ou nenhum dos dois?”. Se o entrevistado respondesse “frio” ou “calor”, havia então a segunda questão: “Você está com pouco calor (frio), mais ou menos, ou muito calor (frio)?”. Para verificar o conforto térmico, o entrevistador repetia a resposta da pessoa da(s) questão(ões) anterior(es), perguntando: “Com relação a esse pouco calor (muito frio, neutralidade, etc.), você está confortável ou desconfortável?”. Se o entrevistado respondesse “desconfortável”, havia então uma segunda pergunta: “Você está pouco, mais ou menos ou muito desconfortável?”.

Para a anotação das respostas, foram utilizados os critérios de ponto central e escalas de intensidades positivas e/ou negativas, quando aplicáveis. As questões de percepção de sensação térmica e de conforto térmico foram, cada uma delas, desmembradas em duas questões subsequentes e dependentes, pois dessa forma se facilitava a aplicação do questionário. Assim, a primeira pergunta possibilita uma resposta com valor positivo, negativo ou igual a zero. A segunda pergunta possibilita, caso a primeira pergunta apresente valor positivo ou negativo, a quantificação desse valor, “1”, “2” ou “3”, respectivamente representando “pouco”, “mais ou menos” e “muito”.

3.2.3. Outras variáveis

Devido às características específicas já elencadas dos levantamentos de campo, realizaram-se simplificações acerca da verificação da aclimação, perguntando apenas a cidade/estado em que nasceu e há

quanto tempo está na região metropolitana de São Paulo. Com relação às informações pessoais, essas foram estimadas pelos entrevistadores, conforme a Figura 6.

Ressalta-se que o número de perguntas é pequeno, sendo restrito de quatro a seis dependendo das respostas das pessoas e que as perguntas são extremamente objetivas, sendo as respostas ou repetições de parte das perguntas ou informações muito fáceis de serem fornecidas. Assim, a realização inicial de uma explicação ou solicitação de autorização mostrou-se, nos pré-testes, inibidora ou demandante de tempo consideravelmente longo, tendo sido, por isso, descartada nos levantamentos efetivos.

	Sens -3 ~ 3	Conf 0 ~ 3	Nascimento Cidade/Estado	Tempo vivendo na Grande SP	Iclo 0,3~0,9 *	Cor CME	Idade Aprox	Sexo M/F	Ativ 0~3	Sol? S/N	Horário hh:mm
01											
02											

Figura 6: Cabeçalho para preenchimento das respostas às questões e das variáveis observadas.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

São apresentados aqui os resultados obtidos por correlação de variáveis para a predição de sensação térmica. Serão consideradas inicialmente regressões múltiplas lineares, com base nas mesmas variáveis propostas por Monteiro e Alucci (2009). Discute-se a aplicabilidade dos resultados com base nos resultados estatísticos observados.

4.1. Regressão para as situações ambientais e valores médios

A seguir é apresentada a regressão linear múltipla para os valores médios das situações ambientais levantadas no Bairro da Luz. O estabelecimento da equação, obtida por regressão linear múltipla, foi realizado observando-se os quarenta e quatro conjuntos de dados, considerando-se os valores médios obtidos para as situações consideradas. A equação seguinte foi obtida em função das quatro variáveis ambientais.

$$\text{Sens} = -8,346 + 0,465 \cdot t_a + 0,142 \cdot t_{rm} + 0,0261 \cdot ur - 0,338 \cdot v_a \quad \text{Equação 1}$$

com: $r = 0,946$; $r^2 = 0,894$; $r^2_{aj} = 0,883$; $ep = 0,321$; $p < 0,001$; onde: r = coeficiente de correlação; r^2 = coeficiente de determinação; r^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; ep = erro padrão; p = nível de significância, todos adimensionais.

A correlação entre os resultados da equação e os dados observados (0,946) é alta, sendo superior à correlação de todos os modelos estudados, segundo Monteiro e Alucci (2010). O erro padrão (0,321) é relativamente baixo, dados os valores que a sensação térmica assume. Considerando-se o valor que se assume tradicionalmente para p ($p < 0,05$), o valor encontrado ($p < 0,001$) indica que aparentemente todas as variáveis contribuem efetivamente para a predição da variável dependente. Ressalta-se que a regressão realizada passou nos testes de normalidade ($P=0,603$) e de variância constante ($P=0,755$). A Tabela 1 apresenta os resultados para a constante da equação e cada variável considerada.

O valor estatístico t testa a hipótese nula de que o coeficiente da variável independente seja igual a zero, ou seja, que ela não contribui para a predição da variável dependente. O valor de t é a razão entre o coeficiente de regressão e o seu erro padrão. Os valores de p apresentados referem-se à predição da variável dependente por combinação linear das variáveis independentes. Considerando-se, assim, o valor já citado que se assume tradicionalmente para p ($p < 0,05$), pode-se afirmar que a variável dependente pode ser predita por combinação linear das variáveis independentes ($p < 0,001$ a $p = 0,012$). Contudo, pode-se observar que há multicolinearidade entre as variáveis independentes, por meio dos elevados valores de VIF encontrados para temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa. Tradicionalmente se adota $VIF < 4$, sendo que quando VIF é igual à unidade, não há redundância nas outras variáveis independentes. No caso específico, para eliminar a colinearidade, há duas possibilidades: obter mais dados ou eliminar uma ou mais variáveis da equação, dentre as que apresentaram elevados valores de VIF. Como o valor de p das variáveis temperatura radiante média e umidade relativa do ar são consideravelmente mais altos do que o da temperatura do ar, essas variáveis deveriam ser retiradas da análise.

Os resultados estatísticos da equação encontrada podem ser explicados por uma questão conceitual e por um fenômeno físico. Em primeiro lugar, a colinearidade entre a temperatura do ar e umidade relativa deve-se ao fato de a umidade relativa variar em função da temperatura do ar, por definição. Esta colinearidade já foi encontrada também por Monteiro (2008). Em segundo lugar, a colinearidade entre a temperatura do ar e a radiante média pode ser possivelmente explicada pelo fato de os levantamentos se darem em situações urbanas reais, sem controle específico das variáveis. Assim, dado a característica dos espaços urbanos levantados, temperaturas radiantes mais altas acabam por gerar temperaturas do ar também

mais altas. Essa questão não foi verificada nos levantamentos na Cidade Universitária, uma vez que, devido ao seu caráter laboratorial, estabeleceram-se situações com maior grau de controle, em que se tinha a mesma temperatura do ar, mas com temperaturas radiantes médias distintas. A título de comparação, a Tabela 2 mostra os resultados de análise de variância encontrados para o Bairro da Luz (44 situações ambientais) e para a Cidade Universitária (72 situações ambientais) com quatro e três variáveis dependentes.

Tabela 1: Resumo estatístico da constante e var. independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-8,346	1,479	-5,644	<0,001	
t _{ar}	0,465	0,0779	5,967	<0,001	56,230
t _{rm}	0,142	0,0537	2,641	0,012	35,235
ur	0,0261	0,00994	2,620	0,012	9,581
v _{ar}	-0,338	0,103	-3,277	0,002	2,568

onde: c = coeficiente; ep = erro padrão; t = valor estatístico t; p = nível de significância; VIF = fator de inflação da variância; DF = grau de liberdade; SS = soma dos quadrados; MS = razão entre SS e DF; F = teste estatístico F; p = nível de significância; todos adimensionais.

Tabela 2: Análise de variância para as regressões realizadas

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	4	33,866	8,467	82,261	<0,001
Resíduo	39	4,014	0,103		
Total	43	37,880	0,881		
Regressão	4	46,667	11,667	117,44	<0,001
Resíduo	67	6,656	0,0993		
Total	71	53,323	0,751		
Regressão	3	46,505	15,502	154,61	<0,001
Resíduo	68	6,818	0,1		
Total	71	53,323	0,751		

Por meio do teste estatístico F, que considera a razão entre os quadrados médios MS_{reg} e MS_{res} (sendo que MS é a razão entre a soma dos quadrados SS e o grau de liberdade DF), observa-se um maior valor para a regressão realizada com os dados da Cidade Universitária, em relação aos dados do Bairro da Luz, uma vez que essa amostra é menor. Observa-se ainda, que o resultado da Cidade Universitária, com três variáveis (sem a umidade relativa), indica que as variáveis independentes consideradas contribuem mais significativamente para a predição da variável dependente do que quando consideradas com a variável umidade relativa. Ressalta-se que a umidade relativa foi naquele momento considerada por meio analítico, utilizando-se os dados de umidade absoluta, conforme pode ser verificado em Monteiro (2008). Contudo, a consideração da umidade absoluta não aumentou o nível de significância das predições realizadas. Se por um lado, a questão da umidade relativa já havia sido elucidada, verifica-se agora especificamente a questão da temperatura radiante média. Essa questão ressalta, pois, a importância de se escolher situações ambientais em que, na medida do possível, apenas uma variável se altere, possibilitando assim a verificação comparativa das situações. Ainda que nesta pesquisa tenham sido escolhidas situações urbanas com tipologias bem distintas, não se conseguiu obter as variações necessárias. Por outro lado, essa característica leva à consideração possível das diversas variáveis de forma integrada, sem considerar a umidade do ar, mas sim as trocas sensíveis por meio da temperatura de globo, conforme já indicado anteriormente. Os resultados serão apresentados na sequência. Antes, porém, serão considerados a regressão dos dados individuais.

4.2. Regressão dos dados considerados individualmente

É considerada aqui a regressão dos 859 dados observados individualmente, visando confirmar os resultados encontrados para os valores médios. Assim, apresenta-se a regressão linear múltipla com quatro variáveis independentes para a totalidade de 859 casos observados.

$$\text{Sens} = -8,321 + 0,435 \cdot t_a + 0,116 \cdot t_{rm} + 0,0270 \cdot ur - 0,327 \cdot v_a \quad \text{Equação 2}$$

com: $r = 0,667$; $r^2 = 0,445$; $r^2_{aj} = 0,442$; $ep = 1,040$; $p < 0,001$.

Observa-se que, considerando os valores assumidos pela variável percepção de sensação térmica (Sens), o erro padrão é bastante significativo, pois indica uma variação de toda uma faixa interpretativa, já que a mudança de interpretação na sensação térmica se dá por meio da unidade. A Tabela 3 apresenta um resumo dos resultados estatísticos para a constante da equação e cada variável considerada. Apesar da consideração realizada com base no erro padrão, que indica a dispersão das respostas subjetivas, algumas colocações podem ser feitas. Conforme já se verificou para o estudo realizado para os resultados médios das quarenta e quatro situações microclimáticas, o valor estatístico t indica que os coeficientes da constante e das variáveis independentes contribuem para a predição da variável dependente. Com relação aos valores de p, eles são ainda mais significativos (todos <0,001), indicando a predição da variável dependente por combinação linear das variáveis independentes. Contudo, assim como já verificado, pode-se observar que há multicolinearidade entre as variáveis independentes, por meio dos elevados valores de VIF encontrados para temperatura do ar, temperatura radiante média e umidade relativa. O valor tradicional de $VIF < 4$, assim como $VIF = 1$ indicando ausência de redundância, já foram apresentados, assim como os meios para eliminar a colinearidade. A Tabela 4 apresenta análise de variância, para a regressão recém realizada (859 dados) e para as regressões realizadas para a base empírica da Cidade Universitária, com o conjunto mais restrito de situações (876 dados) e conjunto mais abrangente de situações (1750 dados), segundo Monteiro (2008).

Tabela 3: Resumo estatístico da constante e var. independentes

	c	ep	t	p	VIF
Constante	-8,321	0,912	-9,129	<0,001	
t_{ar}	0,435	0,0497	8,749	<0,001	50,212
t_{rm}	0,116	0,0338	3,442	<0,001	31,799
ur	0,0270	0,00600	4,494	<0,001	7,945
v_{ar}	-0,327	0,0666	-4,907	<0,001	2,435

Tabela 4: Análise de variância para as regressões realizadas

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	4	741,191	185,298	171,248	<0,001
Resíduo	854	924,068	1,082		
Total	858	1665,259	1,941		
Regressão	4	501,163	125,291	263,699	<0,001
Resíduo	871	413,836	0,475		
Total	875	914,999	1,046		
Regressão	4	1113,8	278,45	655,57	<0,001
Resíduo	1745	740,76	0,425		
Total	1749	1854,6	1,061		

Observa-se na referida tabela que, por meio do teste estatístico F, tem-se um valor mais elevado para a regressão realizada com os dados da Cidade Universitária, mesmo considerando o conjunto mais restrito de situações, com apenas 876 dados, amostra similar a utilizada na regressão dos dados do Bairro da Luz, com 859 dados. A ampliação da base de dados da Cidade Universitária para 1750 dados proporciona, conforme esperado, a um valor ainda mais elevado. Conforme apontado no item anterior, e confirmado aqui, a não consideração da umidade do ar, e grande contribuição da temperatura do ar e temperatura radiante média para predição da sensação térmica, mas com colinearidade entre elas, indica a possibilidade de utilização da temperatura de globo, cujos resultados são apresentados na seqüência.

4.3. Regressão linear e regressões não lineares

Observando os resultados encontrados até aqui, verificam-se as temperaturas do ar (t_a), radiante média (t_{rm}) e de globo (t_g). As Figuras 7 e 8 apresentam os resultados das regressões linear simples e logarítmica. As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os resultados de regressões polinomiais de segunda, terceira e quarta ordem. A tabela 5 apresenta um resumo dos resultados das regressões realizadas. Observa-se que da polinomial de terceira ordem para a de quarta ordem não há ganhos correlativos na terceira casa decimal e, por isso, optou-se por não verificar ordens maiores.

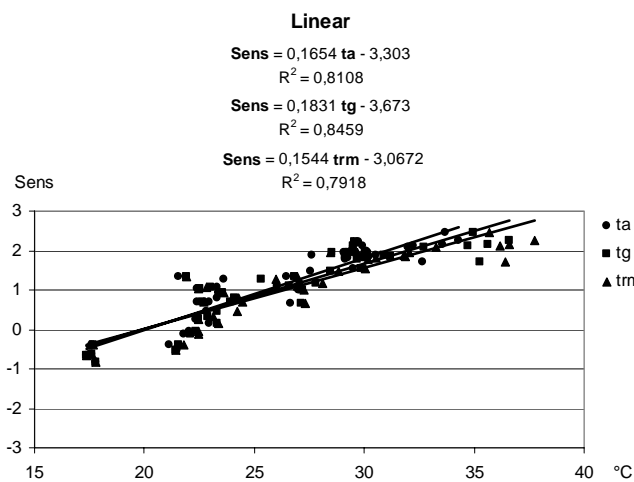


Figura 7: Resultados para regressões lineares simples.

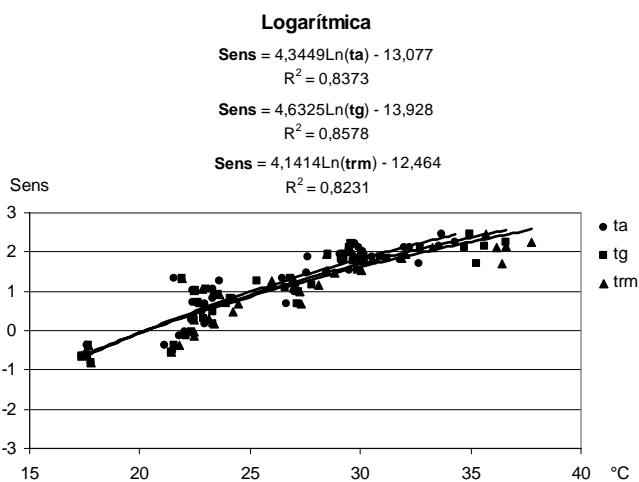


Figura 8: Resultados para regressões logarítmicas.

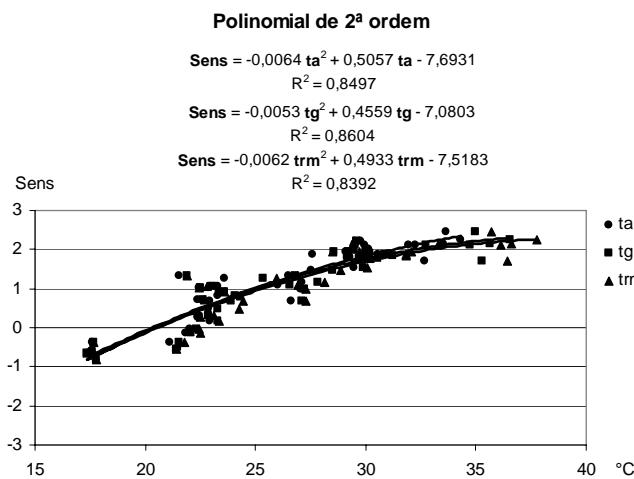


Figura 9: Resultados para polinomiais de segunda ordem.

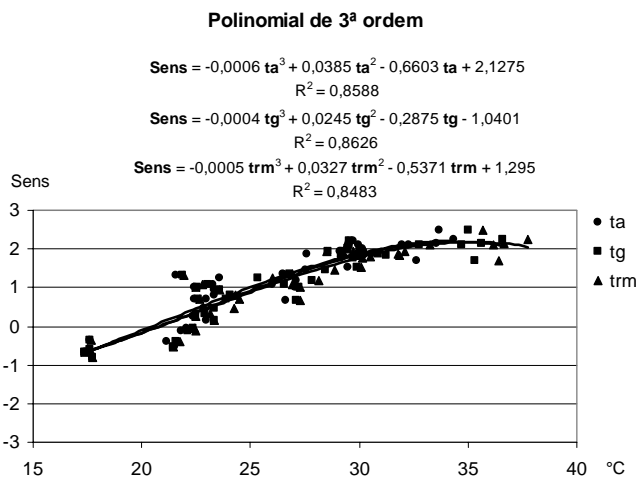


Figura 10: Resultados para polinomiais de terceira ordem.

Polinomial de 4ª ordem

$$\text{Sens} = 0,00002 \text{ ta}^4 - 0,0022 \text{ ta}^3 + 0,1033 \text{ ta}^2 - 1,7592 \text{ ta} + 8,952$$

$$R^2 = 0,8589$$

$$\text{Sens} = 0,00004 \text{ tg}^4 - 0,0043 \text{ tg}^3 + 0,1723 \text{ tg}^2 - 2,7344 \text{ tg} + 13,84$$

$$R^2 = 0,8628$$

$$\text{Sens} = 0,00001 \text{ trm}^4 - 0,002 \text{ trm}^3 + 0,0941 \text{ trm}^2 - 1,5958 \text{ trm} + 7,9665$$

$$R^2 = 0,8484$$

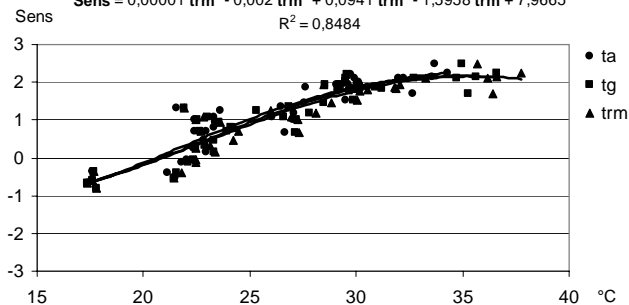


Figura 11: Resultados para polinômios de quarta ordem.

Tabela 5: Resultados das regressões (r^2)

Regressão	ta	tg	trm
Linear	0,8108	0,8459	0,7918
Logarítmica	0,8373	0,8578	0,8231
Polinomial de 2ª. ordem	0,8497	0,8604	0,8392
Polinomial de 3ª. ordem	0,8588	0,8626	0,8483
Polinomial de 4ª. ordem	0,8589	0,8628	0,8484

Observa-se que, a partir da polinomial de terceira ordem, as variáveis temperatura do ar, de globo e radiante média apresentam correlações iguais se consideradas duas casas decimais. Considerando-se ainda este critério, observa-se que a correlação da temperatura de globo varia apenas entre 0,85 e 0,86, apresentando resultados para a correlação linear mais altos do que os das demais variáveis.

4.4. Proposição de modelo baseado em temperatura de globo

Com base nos resultados encontrados no item anterior, optou-se, pela proposição de novo modelo com base na temperatura de globo não apenas pelos resultados estatísticos apresentados, possibilitando a utilização de regressões lineares mais significativas, mas também pela questão física, que explica os resultados encontrados: a temperatura de globo considera as trocas radiantes e convectivas, abrangendo em um único valor a influência da temperatura radiante média, da temperatura do ar e da velocidade do ar.

Se considerarmos que a umidade relativa tem alta correlação com a temperatura do ar, conforme foi verificado, pode-se afirmar que a temperatura de globo, em certa medida, abarca as quatro variáveis inicialmente consideradas. Ressalta-se que a umidade absoluta não está sendo considerada, verificando-se apenas as trocas sensíveis, assumindo que ela permanece mais ou menos constante durante um período e acaba por ter pouca influência nos resultados, seguindo os achados Givoni *et al.* (2003), Nicol *et al.* (2006), Monteiro (2008) e Krueger e Rossi (2010). Desta forma, a proposição de um modelo baseado em temperatura de globo possibilita fácil avaliação das condições ambientais para as situações em que forem possíveis ou requeridos levantamentos *in loco*, uma vez que apenas uma medição é necessária, por meio de um único instrumento.

Considerando-se então os resultados apresentados anteriormente, será proposto um modelo para predição da sensação térmica por meio da utilização de termômetro de globo, uma vez que a correlação dos dados da temperatura deste com as sensações térmicas levantadas em campo foi a mais significativa encontrada. Deve-se considerar a facilidade da realização de medições com termômetro de globo, por meio do qual todas as trocas sensíveis relevantes (radiantes e convectivas) são consideradas.

Para manter a uniformidade de raciocínio que vem se adotando nesta pesquisa (Monteiro e Alucci, 2005, 2007, 2009) as correlações a serem estabelecidas serão realizadas por meio da base empírica estabelecida na Cidade Universitária (Monteiro, 2008), sendo em seguida verificada frente à base empírica do Bairro da Luz (Monteiro e Alucci, 2010). Desta forma, considerando-se os resultados de termômetro de globo e de percepção de sensação térmica, obtém-se a seguinte equação.

$$\text{Sens}' = -3,176 + 0,132 \cdot t_g$$

Equação 3

com: $r = 0,928$; $r^2 = 0,861$; $r^2_{aj} = 0,859$; $ep = 0,325$; $p < 0,001$. A Tabela 6 apresenta um resumo dos resultados estatísticos e a Tabela 7 apresenta análise de variância.

Tabela 6: Resumo estatístico da constante e variável independente

	coeficiente	erro padrão	t	p
constante	-3,176	0,178	-17,835	<0,001
t_g	0,132	0,00632	20,860	<0,001

Tabela 7: Análise de variância da regressão linear

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	1	45,933	45,933	435,145	<0,001
Resíduo	70	7,389	0,106		
Total	71	53,323	0,751		

Ressalta-se que os levantamentos de campo foram realizados por meio de medições com termômetro de globo cinza fosco de 15 cm e que as respostas de percepção de sensação térmica foram coletadas após um período de vinte minutos de exposição às condições ambientais. A seguir serão verificados os resultados frente à base empírica estabelecida no Bairro da Luz.

4.4.1. Verificação dos resultados de modelo baseado em temperatura de globo

Correlacionando-se as sensações térmicas previstas pelo modelo de temperatura de globo (Sens'), baseado nos levantamentos laboratoriais da Cidade Universitária, com as sensações térmicas médias observadas nos levantamentos de campo no Bairro da Luz (Sens), têm-se os resultados seguintes.

$$\text{Sens}' = -0,376 + 0,647 \cdot \text{Sens} \quad \text{Equação 4}$$

com: $r = 0,900$; $r^2 = 0,811$; $r^2_{aj} = 0,806$; $ep = 0,297$; $p < 0,001$. A regressão realizada passou nos testes de normalidade ($P=0,747$) e de variância constante ($P=0,204$). A Tabela 8 apresenta um resumo dos resultados estatísticos e a Tabela 9 apresenta análise de variância.

Tabela 8: Resumo estatístico da constante e variável independente

	coeficiente	erro padrão	t	p
constante	-0,376	0,0690	-5,454	<0,001
Sens	0,647	0,0482	13,416	<0,001

Tabela 9: Análise de variância da regressão linear

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	1	15,857	15,857	180,002	<0,001
Resíduo	42	3,700	0,0881		
Total	43	19,557	0,455		

A regressão realizada é significativa ($p < 0,001$) e apresenta alta correlação com os dados empíricos ($r=0,90$), com valor acima do encontrado para modelos verificados por Monteiro e Alucci (2010). Também para verificação, apresentam-se os resultados encontrados para a correlação da temperatura de globo com a percepção de sensação térmica para os valores verificados nos levantamentos do Bairro da Luz.

$$\text{Sens}' = -3,303 + 0,165 \cdot \text{tg} \quad \text{Equação 5}$$

com: $r = 0,900$; $r^2 = 0,811$; $r^2_{aj} = 0,806$; $ep = 0,413$; $p < 0,001$. A regressão realizada passou nos testes de normalidade ($P=0,880$) e de variância constante ($P=0,139$). A Tabela 10 apresenta um resumo dos resultados estatísticos. A Tabela 11 apresenta análise de variância.

Tabela 10: Resumo estatístico da constante e variável independente

	coeficiente	erro padrão	t	p
constante	-3,303	0,333	-9,914	<0,001
Sens	0,165	0,0123	13,416	<0,001

Tabela 11: Análise de variância da regressão linear

	DF	SS	MS	F	p
Regressão	1	30,714	30,714	180,002	<0,001
Resíduo	42	7,167	0,171		
Total	43	37,880	0,881		

Conforme pode ser verificado pela comparação das equações, a proposta com base nos levantamentos da Cidade Universitária apresenta reta com constante ligeiramente maior e menor inclinação. Comparando os resultados, observa-se maior correlação com a própria base empírica para o caso da Cidade Universitária (0,93 contra 0,90). Assim, continua-se a modelagem adotando-se como base empírica a estabelecida na Cidade Universitária, verificando-se os resultados com a base empírica do Bairro da Luz.

4.4.2. Temperatura Equivalente de Globo (TEG)

Considerando os resultados alcançados e o conceito de temperatura equivalente apresentado por Monteiro (2008), nova modelagem preditiva é proposta. Para a proposição de uma equação que fornece valores de temperatura equivalente de globo, assumiu-se a regressão obtida originalmente na Equação 3. Baseando-se nessa regressão, a relação entre a temperatura equivalente a ser proposta e a percepção de sensação térmica é dada pela equação seguinte.

$$\text{TEG} = 24,1 + 7,6 \cdot \text{Sens}' \quad \text{Equação 6}$$

onde: TEG = temperatura equivalente de globo, em °C. Adotando-se as faixas interpretativas originais para a verificação empírica da percepção de sensação térmica, têm-se os resultados apresentados na Tabela 12. Conforme se verifica na Equação 6, a temperatura equivalente de globo de neutralidade de sensação térmica (TEG_n) é, teoricamente, de 24,1°C, valor central da faixa de neutralidade da tabela apresentada.

Tabela 12: Interpretação da TEG

TEG	Sensação
> 43,1	muito calor
35,6 ~ 43,1	calor
28,0 ~ 35,5	pouco calor
20,3 ~ 27,9	neutralidade
12,7 ~ 20,2	pouco frio
5,1 ~ 12,6	frio
< 5,1	muito frio

5. CONCLUSÕES

Conforme colocado inicialmente, tinha-se por objetivo propor um modelo preditivo de sensação térmica que pudesse ser utilizado em situações em que fossem necessários levantamentos *in loco*, usando procedimentos simples de modo a facilitar a execução dos mesmos. A Temperatura Equivalente de Globo (TEG) cumpre tal objetivo ao apresentar-se como um modelo preditivo de sensação térmica para aplicação em levantamentos

in loco em espaços urbanos abertos na cidade de São de Paulo. E, por se basear apenas na temperatura de globo, requer a utilização de apenas um instrumento quando o objetivo dos levantamentos empíricos for somente estabelecer correlações com sensações térmicas, facilitando sobremaneira a execução dos mesmos. Apresenta ainda a vantagem de ser uma temperatura equivalente e, assim, não requer, necessariamente, escala interpretativa. Referindo-se a uma situação equivalente de comparação, pode ser utilizada como valor de referência para sensação térmica, uma vez que apresenta interpretação de caráter indutivo, em °C, quanto a ambientes mais quentes ou mais frios.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, Elisabeti T.; AMO, Viviane A.; LABAKI, Lucila C. A influência da vegetação e das variáveis climáticas no nível de conforto dos usuários da praça do centro de convivência em Campinas. In: XIII ENTAC. **Anais...** Canela: ANTAC, 2010.
- BORGES, M.; LABAKI, L. Conforto térmico em espaços externos: preferência dos usuários e índices de conforto. In: IV COTEDI. **Memórias...** UAM, 2006.
- BRUSANTIN, Giovana N.; FONTES, Maria Solange G. C. Conforto térmico em espaços públicos de permanência: Uma experiência na cidade de Bauru-SP. In: X ENCAC/VI ELACAC. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.
- COSTA, Angelina. **A influência da forma de ocupação do solo urbano no microclima**: uma fração do bairro de Petrópolis em Natal-RN. Dissertação de mestrado. Natal: UFRN, 2003.
- DACANAL C.; RIBEIRO B.; RANCURA R.; LABAKI L. C. Conforto térmico em espaços livres públicos: estudo de caso em Campinas, SP. In: X Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído / VI Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2009, Natal. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.
- KRÜGER, E. L.; ROSSI, F. A. Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. **Building and Environment**, 46, 3, p.690-697, 2011.
- NICOL, F.; WILSON, E.; UEBERJAHN-TRITTA, A.; NANAYAKKARA, L.; KESSLER, M. Comfort in outdoor spaces in Manchester and Lewes, UK. Windsor conference 2006: Comfort and energy use in buildings. **Conference Proceedings**. Nceub, 2006.
- GIVONI, B.; NOGUCHI, M.; et al. Outdoor comfort research issues. **Energy Environment**, 35, 77, 2003.
- HIRASHIMA, Simone Q. S. **Calibração do índice de conforto térmico temperatura fisiológica equivalente (PET) para espaços abertos do município de Belo Horizonte**. Dissertação (Mestrado). Belo Horizonte: UFMG, 2010.
- ISO (INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION). **ISO 9920**. Ergonomics of the thermal environment: estimation of thermal insulation and water vapour resistance of a clothing ensemble. Genève: ISO, 1995.
- _____. **ISO 8996**. Ergonomics of the thermal environment: determination of metabolic rate. Genève: ISO, 1990.
- _____. **ISO 7726**. Ergonomics of the thermal environment: instruments for measuring physical quantities. Genève: ISO, 1998.
- KRÜGER, Eduardo L.; ROSSI, Francine A. Effect of personal and microclimatic variables on observed thermal sensation from a field study in southern Brazil. **Building and Environment**, 46, 3, p.690-697, 2011.
- MONTEIRO, L. M. **Modelos preditivos de conforto térmico**: quantificação de relações entre variáveis microclimáticas e de sensação térmica para avaliação e projeto de espaços abertos. 378p. Tese (Doutorado). São Paulo, FAUUSP, 2008.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Comparação cruzada entre pesquisas laboratoriais e de campo em conforto térmico em espaços urbanos abertos. **Ambiente Construído** (Online), 10, p.79-101, 2010.
- _____. Conforto térmico em espaços abertos. Parte 1: consideração de variáveis ambientais. In: X ENCAC/VI ELACAC. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.
- _____. Conforto térmico em espaços abertos com diferentes abrangências microclimáticas. Parte 1: verificação experimental de modelos preditivos. In: VIII ENCAC/V ELACAC. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- _____. Procedimentos para quantificação de variáveis para análise termofisiológica em espaços abertos. In: VIII ENTAC/IV ELACAC, 2005, Maceió. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2005.
- MORENO, M.; LABAKI, L.; NOGUCHI, E. Thermal comfort zone for outdoor areas in subtropical climate. In: PLEA. *Towards Zero Energy Building*. Dublin: PLEA, 2008.
- MORENO, M.; NOGUCHI, E.; LABAKI, L. Índice de conforto térmico para áreas externas em clima tropical de altitude. In: VIII ENCAC/V ELACAC. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- PEZZUTO, C.; LABAKI, L. Conforto térmico em espaços urbanos abertos: avaliação em áreas de fluxo de pedestres. In: VIII ENCAC/V ELACAC. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- PRATA-SHIMOMURA, A.; MONTEIRO, L. M.; FROTA, A. PET index applied to wind tunnel erosion technique pictures. In: 7TH ICUC. **Proceedings...** Tokyo: 2009.
- SHIMAKAWA, Andréa H.; BUENO-BARTHOLOMEI Carolina L. Aplicação dos modelos preditivos de conforto PET e PMV em Presidente Prudente-SP: estudo de caso Parque do Povo. In: X ENCAC/VI ELACAC. **Anais...** Natal: ANTAC, 2009.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).