



XIENCAC
ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

VIIELACAC
ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO
NO AMBIENTE CONSTRUIDO

Búzios - RJ - 2011

PROBLEMAS ASSOCIADOS À EXTRAPOLAÇÃO DE INFORMAÇÕES ESPACIAIS E TEMPORAIS NO USO DO PROGRAMA ENVI-MET

Viviane Raquel Denadai Souza (1); João Roberto Gomes de Faria (2)

(1) Aluna do curso de Arquitetura e Urbanismo da FAAC-UNESP, vivisrds@gmail.com

(2) Professor Adjunto do Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo, joaofari@faac.unesp.br

FAAC-UNESP - Univ. Estadual Paulista, Dep. de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo,
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, nº 14-01, Bauru-SP, 17030-360, Tel.: (14) 3103 6059

RESUMO

Devido à quantidade e à complexidade dos fenômenos envolvidos em estudos do clima na camada intra-urbana, modelos numérico-computacionais apresentam-se como uma alternativa viável. Neste trabalho apresenta-se um estudo envolvendo o ENVI-met, programa com um modelo tridimensional de interações solo-vegetação-atmosfera, indicado para estudos envolvendo clima na camada intra-urbana. A abordagem aqui adotada é o estudo de áreas com diferentes densidades e morfologias construtivas, para simular uma alteração desses parâmetros na mesma área. O objetivo é verificar a resposta do programa a alterações quando valores de variáveis de entrada são alterados em decorrência de mudanças no uso e ocupação do solo. Os resultados obtidos apontam para a inviabilidade do uso do ENVI-met em estudos de planejamento urbano onde são previstas grandes alterações no uso e ocupação do solo, devido à grande sensibilidade do modelo a variáveis cujo comportamento é de difícil estimativa nessas situações.

Palavras-chave: simulação computacional, calibração, comportamento térmico.

ABSTRACT

Researches about urban canopy layer climates involve many and complex phenomena. So, numeric models are a good alternative to approach them. This paper presents a study involving ENVI-met, a software composed by a 3D model for soil-vegetation-atmosphere interactions, designed to researches about the canopy layer climates. Changes in land use and occupation were simulated using ENVI-met with data of two urban areas in Bauru (SP) what have different built densities and morphology. The purpose was test the response of ENVI-met when inputs values are modified due changes in land use and occupation. The results indicate that is not viable to use ENVI-met in urban planning researches where occur great changes in land use and occupation, due the high sensibility of the model to variables whose behaviour is difficult to estimate in those situations.

Keywords: computer simulation, calibration, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

O estudo conjunto das diversas variáveis que condicionam o clima na camada intra-urbana é bastante complexo, uma vez que envolve processos de trocas térmicas por condução em regime transiente, convecção, radiação e por mudança de estado físico da água, além de transporte de calor por fluxo turbulento do ar. Nesse sentido, modelos numérico-computacionais têm se apresentado como a alternativa mais viável para sua abordagem, devido à sua rapidez e baixo custo (ARNFIELD, 2003). Modelos computacionais têm sido propostos para tal tipo de estudo nas escalas micrometeorológica e local (conforme classificação de OKE, 2006). Conforme Souch e Grimmond (2006), eles podem ser classificados como de balanço de energia superficial, de interações solo-vegetação-atmosfera e de fluidodinâmica, em ordem crescente de complexidade. Cada um desses modelos pode trabalhar em uma, duas ou três dimensões, também com crescente de complexidade. Evidentemente que, quanto mais complexo o modelo, mais precisos são os resultados mas, também, maiores são as exigências em relação a dados de entrada e recursos computacionais.

A presente pesquisa teve início no projeto “Modelagem computacional do clima urbano de cidades brasileiras de médio porte”, desenvolvida no Núcleo de Conforto Ambiental (NUCAM) da FAAC-UNESP. Posteriormente, ambos foram incorporados ao projeto “Ambiente Térmico Urbano”, desenvolvido de 2008 a 2010 por pesquisadores da UNESP, da UFMG e da UNICAMP. Nele, testou-se o programa ENVI-met (BRUSE e FLEER, 1998 e BRUSE, 2004) em experimentos nas cidades de Bauru (SP), Belo Horizonte (MG) e Campinas (SP) na tentativa de se estabelecer uma abordagem de pesquisa sobre clima urbano comum e adequada a cidades brasileiras. Nesse contexto, estudou-se a aplicabilidade do programa em dois segmentos da área urbana de Bauru, com morfologias distintas, mas sob condições meteorológicas semelhantes e geograficamente próximas.

Conforme Bruse e Fleer (1998), o ENVI-met é um programa com modelo tridimensional da categoria “interações solo-vegetação-atmosfera” para ambientes Microsoft Windows. É aplicável a análises, no ambiente urbano, de efeitos de mudanças em pequena escala no microclima, sob diferentes condições mesoclimáticas. Segundo informação do site (<<http://www.envi-met.com/>>), áreas típicas de aplicação são a climatologia urbana, o projeto de prédios e o planejamento ambiental. Está disponível em regime *freeware* na web, atualmente na versão 3.1 BETA V. Possui uma documentação suficiente clara para pesquisadores da área sem grandes conhecimentos de informática. Para solucionar o modelo, o programa discretiza o espaço em células tridimensionais com dimensões ajustáveis de acordo com as necessidades do projeto e o tamanho da área, em resolução horizontal de 0,5 a 10 m, com capacidade de até 250 x 250 células; na escala vertical, aceita de 25 a 30 células com a mesma faixa de resoluções em escalas equidistante (sendo a primeira célula dividida em 5 camadas) e telescópica (exponencial). Conforme Bruse (2004), o programa trabalha com 4 modelos: atmosférico, de solo, de vegetação e de superfícies de prédios e do solo. Esses modelos, por sua vez, partem das equações clássicas de termodinâmica, de mecânica de fluidos e dos solos, física da atmosfera e outras complementares, assumindo uma série de condições de contorno e parametrizações para torná-las computacionalmente operacionais. Todas as equações são aproximadas pelo método das diferenças finitas e resolvidas por diversos métodos, conforme a conveniência do modelo.

Segundo o manual de operação do programa (<<http://www.envi-met.com/htmlhelp/helpindex.htm>>), são necessários, como entrada de dados: uma base de informação superficial, contendo a posição geográfica do local, geometria das edificações, a posição e o tipo de vegetação, o perfil do solo e o recobrimento superficial; dados meteorológicos relativos à data e horário do início da simulação: temperatura do ar a 2 m do solo, umidade específica a 2500 m, direção e velocidade do vento a 10 m do solo; parâmetros de execução, como o período a ser simulado e o intervalo de tempo de gravação de resultados. Ele assume valores-padrão para uma série de variáveis atmosféricas, do solo, da vegetação e dos prédios, que podem ser alteradas para melhor representar a realidade local. Apenas a velocidade e a direção do vento de entrada são mantidas constantes durante toda a simulação. Como resultados, o ENVI-met apresenta uma lista de aproximadamente 50 variáveis incluindo fluxo de ar, turbulência, fluxos de radiação e índices de conforto. Esses resultados são gravados em arquivos a intervalos de tempo especificados pelo operador do programa e podem ser mapeados para a área através de um aplicativo do programa, o Leonardo, ou recuperados de pontos receptores previamente especificados na área. Os resultados, para cada ponto ou célula da área, são apresentados para cada célula vertical (e suas subdivisões, no caso da primeira). Durante a execução, o programa gera, a partir dos dados iniciais, resultados intermediários para cada passo a seguir. Nesse processo, buscam-se resultados estáveis, obtidos, em geral, após o programa gerar dois ou três ciclos de resultados diários.

Em geral, na bibliográfica relativa ao uso do ENVI-met são encontradas análises das condições microclimáticas atuais de uma área (HAN *et al.*, 2007; JOHANSSON *et al.*, 2007), os impactos no microclima derivados de alterações na geometria das edificações (ALI TOUDERT e MAYER, 2005;

FAHMY e SHAPLES, 2008) ou do uso e ocupação do solo (HAN et al., 2007; WONG e JUSUF, 2007). Nessa última categoria, Chen *et al.* (2009) faz um estudo de sensibilidade dos resultados do ENVI-met em relação a diferentes tipos de recobrimento superficial, profundidade de corpos de água e tipos de vegetação em clima quente-úmido. Conclui que, embora as temperaturas superficiais dos diversos recobrimentos sejam distintas, a temperatura do ar sobre eles pouco muda; a profundidade de corpos de água tem pouco efeito sobre a temperatura do ar; comparando com o solo nu, o recobrimento de grama altera pouco as temperaturas superficial e do ar, mas árvores de 10 m de altura com copa densa podem reduzir a temperatura do ar sob elas significativamente.

É importante ressaltar que não há menção, na bibliografia consultada, a alterações em parâmetros físicos de entrada do programa, em especial às ligadas ao solo, como seus perfis de temperatura e umidade, que são influenciados tanto pela natureza do solo e de seu recobrimento superficial como pela densidade de edificações. Essas variáveis condicionam a profundidade do lençol freático e a mudança em seus valores é uma situação típica em estudos de planejamento urbano.

2. OBJETIVO

O estudo aqui relatado teve por objetivo verificar o comportamento das respostas do ENVI-met quando valores de variáveis de entrada são alterados em decorrência de mudanças no uso e ocupação do solo.

3. MÉTODO

A pesquisa, de caráter exploratório, envolveu levantamentos em campo, simulação computacional e comparação dos dados medidos com os resultados da simulação.

A simulação da alteração das condições de uso e ocupação do solo foi feita a partir do estudo de duas áreas urbanas geograficamente próximas (ambas na área urbana de Bauru, SP, distantes aproximadamente 5,2 km entre si), com diferentes situações quanto ao uso e à ocupação do solo: a primeira é localizada no Núcleo Residencial Presidente Geisel e a segunda no centro da cidade (Figura 1). Apesar de se situarem em níveis topográficos distintos (600 m e 550 m, respectivamente), de acordo com São Paulo (1991) ambas estão sobre a mesma formação geológica e possuem o mesmo tipo de solo (latossolo vermelho escuro), portanto com características de drenagem subsuperficial semelhantes. Dessa forma, elas poderiam representar dois cenários de ocupação urbana de uma mesma área, situação essa típica de trabalhos sobre evolução urbana.

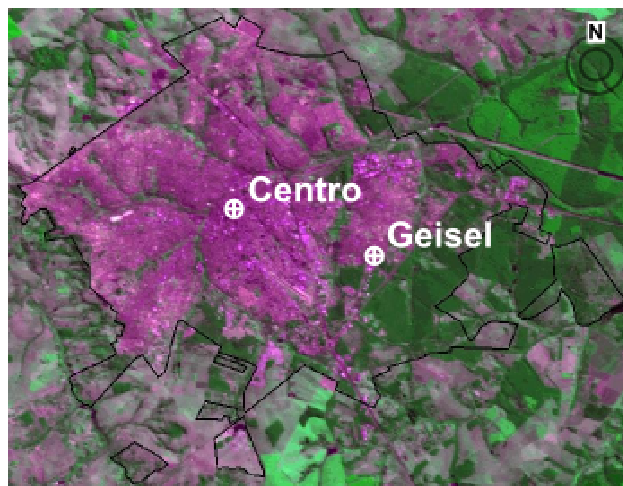


Figura 1 – Localização das áreas de estudo em relação à área urbanizada (em tons avermelhados) de Bauru (SP).
Fonte dos dados primários: imagem CBERS de 27/08/2008.

Nessas áreas foram selecionadas secções transversais de três ruas com pouco ou nenhum movimento de veículos. As do bairro possuem leito carroçável de 8 m de largura mais calçadas de 2,0 m de cada lado; a do centro é exclusiva para pedestres, com largura total de 13 m. A área do bairro é bastante homogênea, com edificações unicamente térreas com recuos variáveis e presença de apenas alguns arbustos (Figura 2), enquanto o entorno da secção de medições na área central é composta por prédios de 3 a 6 pavimentos, todos com a fachada alinhada à testada do lote (Figura 3). A relação altura /largura (H/W) para a área do bairro varia de 0,21 a 0,33, enquanto que no centro ela varia de 1,0 a 2,0 no entorno das secções de medições.

Foram realizadas campanhas nos dias 27 e 29 de agosto de 2010, onde se mediu a irradiância solar global no plano horizontal (I_{gh}). Foi usado um radiômetro de balanço de radiação solar e infravermelha

modelo CRN1, da Kipp & Zonen, montado a 1,5 m do solo e acoplado a um *datalogger* Campbell. O instrumento era deslocado, em intervalos de 2 min, a cada 1 m ao longo de seções demarcadas em cada rua estudada. As medições ocorreram somente durante o período diurno, por questões de segurança dos pesquisadores. Os valores registrados foram comparados aos das estações automáticas locais do Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP (IPMet) e do INMet, para a calibração do instrumento.



Figura 2 – Área de estudo no Núcleo Residencial Presidente Geisel: a) vista aérea, com a área modelada (retângulo vermelho) e as seções de medição; b) Rua Manoel Vicário (seção L-O); c) Rua Venâncio Cabello (seção N-S).
Fontes: a) Google Earth, acessado em 30 mai. 2011; b e c) fotos dos autores.



Figura 3 – Áreas de estudo no centro: a) vista aérea, com a área modelada (retângulo vermelho) e as a seção do transecto; b) Rua Batista de Carvalho, na esquina próxima ao transecto.
Fontes: a) Google Earth, acessado em 30 mai. 2011; b) foto dos autores.

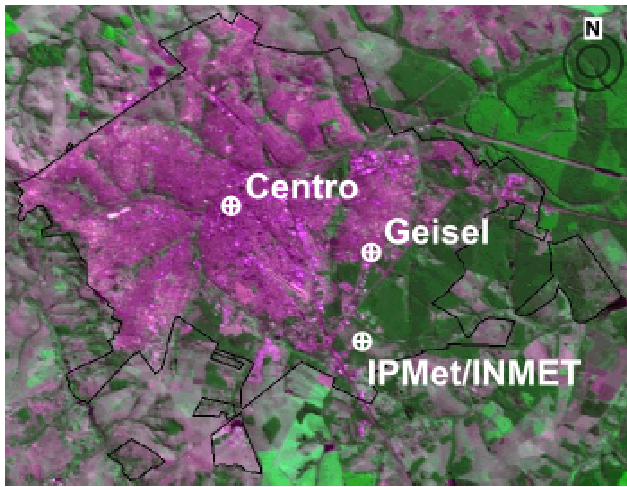
Originalmente previa-se a medição de Igh e da temperatura do ar, esta última através de termômetros com *dataloggers* HOBO Pro Series. Infelizmente, constatou-se, após as campanhas de medição, problemas na programação dos instrumentos, de forma que os dados obtidos foram perdidos. Procurou-se então trabalhar com os dados de temperatura do sensor interno do radiômetro, mas o manual do fabricante informava que os valores poderiam superestimar em demasia a temperatura do ar sob forte incidência de radiação solar.

O ENVI-met usa a umidade específica a 2500 m de altitude como dado de entrada. Como não se dispõe em Bauru de perfis em altitude de temperatura e umidade do ar, foram usados dados cedidos pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas da UNESP (IPMet, Figura 4) resultantes do modelo computacional do EMC/NCEP (*National Centers for Environmental Prediction/Environmental Modeling Center*), usado na previsão do tempo.

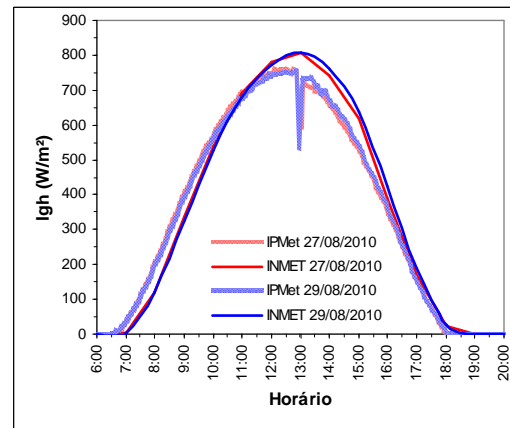
As distribuições da temperatura (T_b s) e da umidade relativa (UR) do ar e da Igh dos dias do experimento também foram cedidas pelo IPMet, oriundas de sua estação meteorológica automática e registradas a cada 5 min. A estação fica instalada numa área gramada, na periferia da área urbana de Bauru, a 630 m de altitude, sob a mesma formação geológica e mesmo tipo de solo que as áreas estudadas, e seu entorno é composto por matas de cerrado antropogênico. No mesmo terreno, a aproximadamente 50 m, localiza-se uma estação automática do INMET, cujos dados horários dos dias do experimento, obtidos de seu site (<<http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>>), foram lançados ao lado dos do IPMet para validação (Figura 4). Os valores foram comparados com o índice de concordância de Willmott (WILLMOTT, 1982), índice esse usado também nas demais avaliações de resultados do trabalho. Tal índice (d) mede o grau de aderência de curvas de distribuição de variáveis previstas (P) e observadas (O) e é dado

por $d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P'_i| + |O'_i|)^2} \right]$, $0 \leq d \leq 1$, sendo $P'_i = P_i - \bar{O}$ e $O'_i = O_i - \bar{O}$, \bar{O} = média dos valores observados.

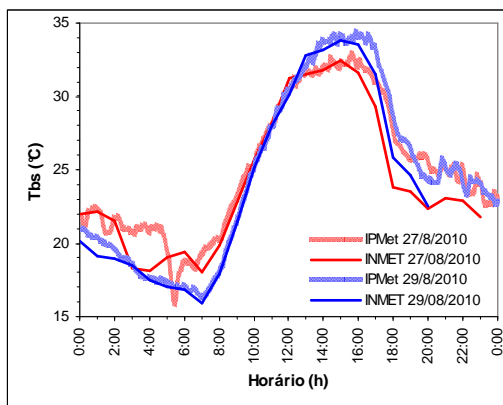
Dadas as características da área do IPMet, ela também poderia se constituir num terceiro cenário de ocupação urbana de uma mesma área, conforme hipótese formulada anteriormente.



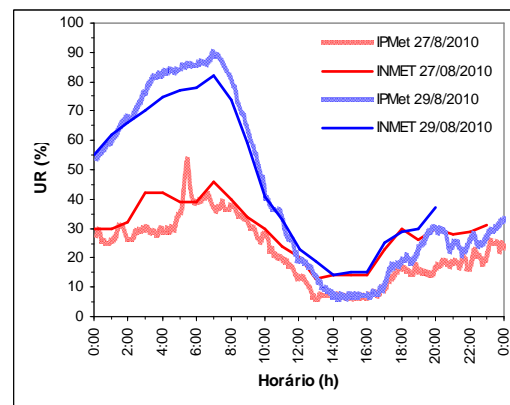
a)



b)



c)



d)

Figura 4 – a) Localização do IPMet em relação às áreas de estudo; distribuição horária de b) Igh; c) Tbs medida pelo IPMet e INMET; d) UR medida no IPMet e no INMET, no período de 27 a 29/8/2010. Obs.: 1) nota-se uma anomalia sistemática nos dados de Igh do IPMet no horário de 12h 55min, que foi desconsiderada no trabalho; 2) os valores de Igh do INMET são fornecidos de forma acumulada em uma hora; assim, os valores distribuídos são médios. Fonte dos dados primários: IPMet e INMET.

Tabela 1 – Índices de aderência de Willmott resultantes da comparação dos dados do IPMet com os do INMET para os dias do estudo.

Variável	Índice de aderência de Willmott	
	27/08/2010	29/07/2010
Igh	0,99	0,99
Tbs	0,97	0,99
UR	0,84	0,99

Para o uso do ENVI-met, o primeiro passo foi a correção de sua estimativa de Igh em relação aos dados do IPMet. Para tanto, calcularam-se os valores de Igh do ENVI-met a partir de seus dados de irradiância solar direta, transformados em irradiância solar direta no plano horizontal pelos algoritmos de posição solar do NOAA (PELLETIER, 2008), e difusa. A correção foi feita por proporcionalidade média entre os valores obtidos e os dados do IPMet. Como os dias nos quais foram realizados os estudos o céu estava totalmente limpo, as curvas do ENVI-met corrigidas ficaram praticamente coincidentes com as dos dados medidos e o índice de aderência de Willmott foi 1,00 em ambos casos.

A seguir, o ENVI-met foi calibrado para a área do IPMet através de um modelo de área com resolução de horizontal de 2x2 m e vertical de 2 m, a partir dos dados dos dias do experimento.

Como não se têm em Bauru registros de temperatura e de umidade relativa do solo (URS), assumiu-se a distribuição de temperaturas no solo proposta por Costa (1982):

- De 0 a 20 cm de profundidade: temperatura sol-ar do horário de início da execução do modelo;
- De 20 a 50 cm de profundidade: temperatura média diária do ar;
- Abaixo de 50 cm de profundidade: temperatura média mensal do ar.

Foram testados diversos níveis de umidade nas diversas camadas do solo, até que as respostas de temperatura e umidade relativa do ar ficassem o mais próximo possível dos dados do IPMet. Posteriormente, o mesmo procedimento foi repetido para as áreas de estudo, para se verificar sua influência nos resultados.

Seguindo instruções do autor do programa a partir de seu site, o modelo foi ajustado para o modo de execução cíclica (parâmetro LBC-TYPES, no arquivo de configuração), mais conveniente para áreas urbanas.

As simulações, tanto as de calibração como das áreas de estudo, foram iniciadas às 9 horas. Apesar desse ser um horário no qual a atmosfera começa a ficar turbulenta, aumentando a probabilidade do modelo do ENVI-met tornar-se instável, corresponde ao primeiro horário do dia quando se tem o dado simulado de umidade específica do ar a 2500 m.

Não houve convergência nos valores dos índices de aderência quando se compararam os valores de temperatura e umidade relativa do ar medidos no IPMet com resultantes do ENVI-met em relação ao dia de simulação e aos valores de umidade relativa da camada superficial do solo (URS). Dessa forma, assumiu-se como estável o segundo dia de simulação (dia 1), que contém uma série diurna completa de resultados e o menor custo computacional.

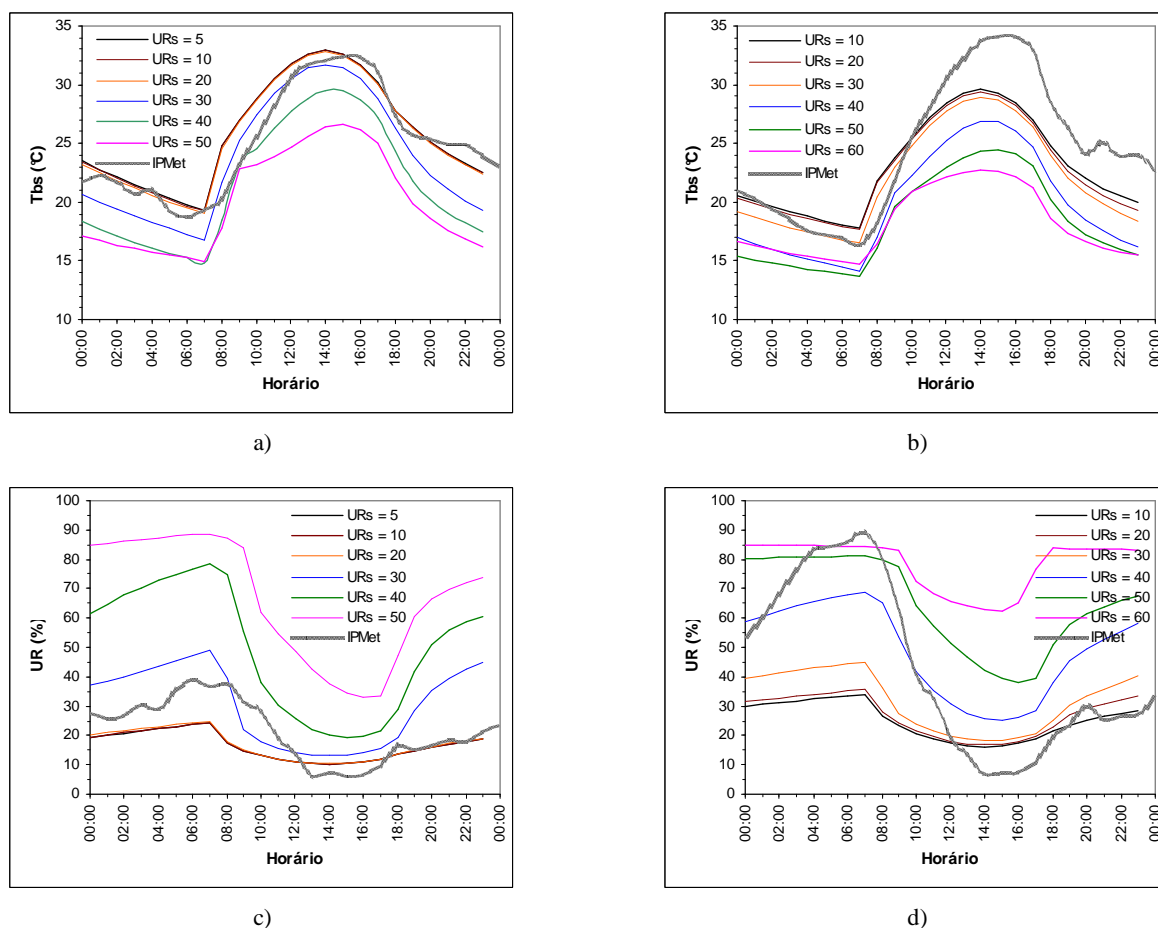


Figura 5 – Distribuições da Tbs (a, b) e da UR na camada superficial do solo (c, d) geradas pelo ENVI-met em relação aos dados medidos pelo IPMet para vários valores de URS para os dias 27 e 29/8/2010.

A Figura 5 apresenta as respostas de Tbs e UR do ENVI-met para esse perfil de temperaturas e vários valores de URS para a camada superficial de solo (verificou-se, nas simulações, que a influência da umidade das demais camadas de solo é mínima): o aumento da URS causa o rebaixamento dos perfis diários de Tbs e UR, além da redução da amplitude diária dessas variáveis. Por esses resultados, os efeitos da redução da URS tornam-se mínimos para valores abaixo de 10%.

Conforme os resultados da avaliação da qualidade dos resultados simulados em relação aos valores medidos (Tabela 2), a URS de 10% compatibiliza o melhor desempenho para a temperatura e a umidade relativa do ar nos dois dias de estudo. Apesar disso, verifica-se uma queda na qualidade das respostas no dia

29, que pode ser explicado pelo aumento da UR no período manhã e pela redução, ao longo do dia, da umidade específica a 2500 m de altitude: como o início da simulação ocorreu também no período da manhã, essa UR maior implicaria, a princípio, na redução da amplitude térmica do dia, o que não ocorreu, uma vez que a umidade (tanto ao nível do solo como a 2500 m) caiu aos níveis das do dia 27 à tarde, causando, ao contrário, um aumento na amplitude térmica.

Tabela 2 – Avaliação da qualidade dos resultados simulados pelo ENVI-met de Tbs e UR em relação aos dados medidos no IPMet.

URS (%)	Índice de aderência de Willmott			
	27/08/2010		29/08/2010	
	Tbs	UR	Tbs	UR
5	0,99	0,72	-	-
10	0,99	0,74	0,92	0,58
20	0,99	0,72	0,91	0,58
30	0,96	0,47	0,90	0,64
40	0,85	0,34	0,78	0,85
50	0,73	0,71	0,69	0,75
60	-	-	0,64	0,54

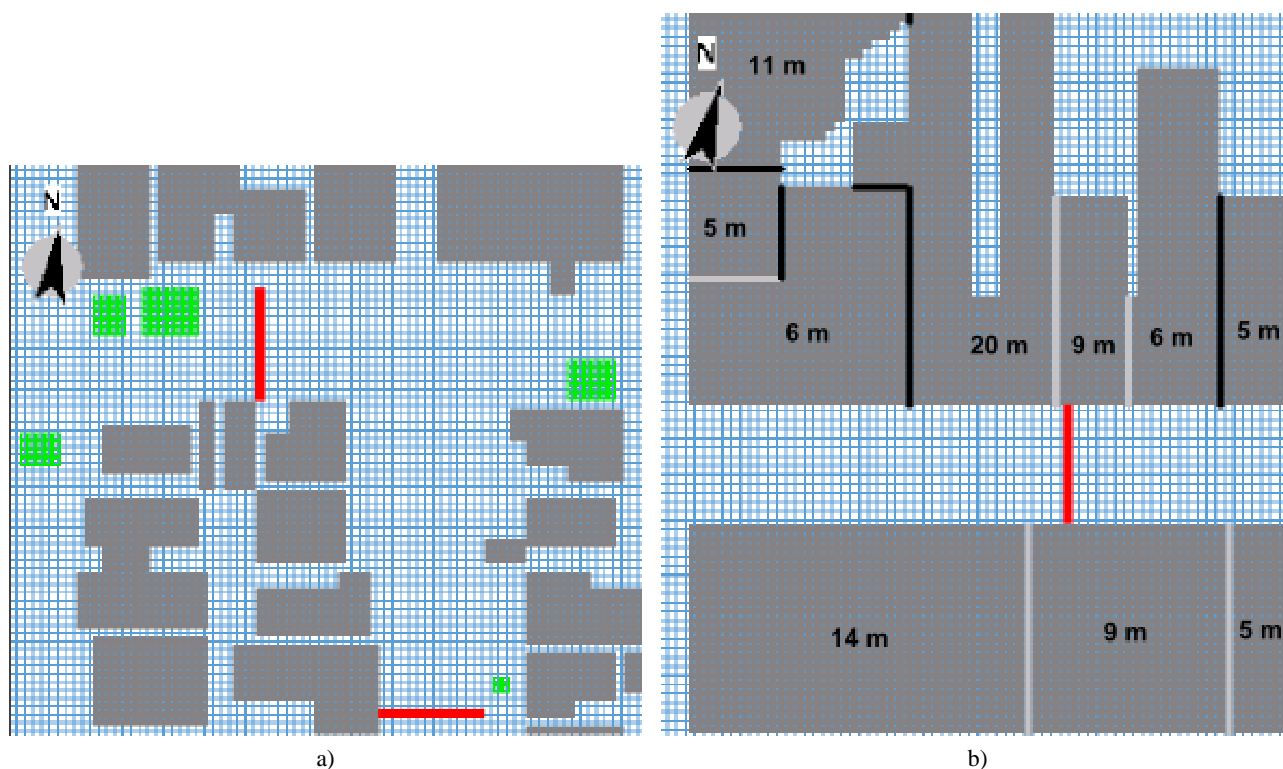


Figura 6 – Modelos do ENVI-met para as áreas de estudo: a) bairro; b) centro. As barras em vermelho correspondem às secções com os receptores. Na figura a) todos os prédios têm 4 m de altura; na figura b) as alturas estão indicadas sobre os prédios.

A seguir, foram elaborados os modelos do ENVI-met para as áreas de estudo, com resolução horizontal de 1x1 m e vertical de 2 m. Tal qual nas áreas, foram criadas sequências de pontos de receptores de 1 em 1 m nas secções. O modelo da área do bairro ficou com 78x70x20 células e o do centro com 70x79x23 células, ambos com 6 *nesting grids*. O número de células por secção varia no bairro de 17 a 22 e no centro a secção é formada sempre por 13 células. No primeiro modelo, a edificação mais alta tem 4 m e, no segundo, 20 m. Assim, cada secção de via na área do bairro conta com 14 receptores e na área do centro com 13 receptores (Figura 6).

4. RESULTADOS E ANÁLISES

Em função da calibração realizada no item anterior, as duas áreas de estudo foram simuladas considerando-se válidos os resultados do segundo dia. Os gráficos da Figura 7 mostram a resposta do ENVI-met em relação aos dados medidos na área de bairro e na Figura 8 são mostrados os valores análogos para a área central. Os valores de Igh são função somente das condições de céu e da geometria das obstruções ao

redor do ponto de cálculo. Assim, nos gráficos dos resultados dessa variável são mostrados todos os pontos de cada secção conjuntamente, de forma que se possa ter um panorama geral de sua incidência. No caso da Tbs, são apresentados os resultados do ponto situado no meio de cada secção; os demais pontos apresentam resultados muito semelhantes.

A radiação solar direta incide plenamente nas superfícies da área do bairro (Figura 7a e b), principalmente na secção L-O, onde as fachadas norte das construções não sombreiam a via, o que acontece na secção N-S. Nesta última secção observam-se maiores desvios nos valores de Igh, principalmente nas áreas sombreadas (baixos valores de Igh), devido à imprecisão geométrica do modelo.

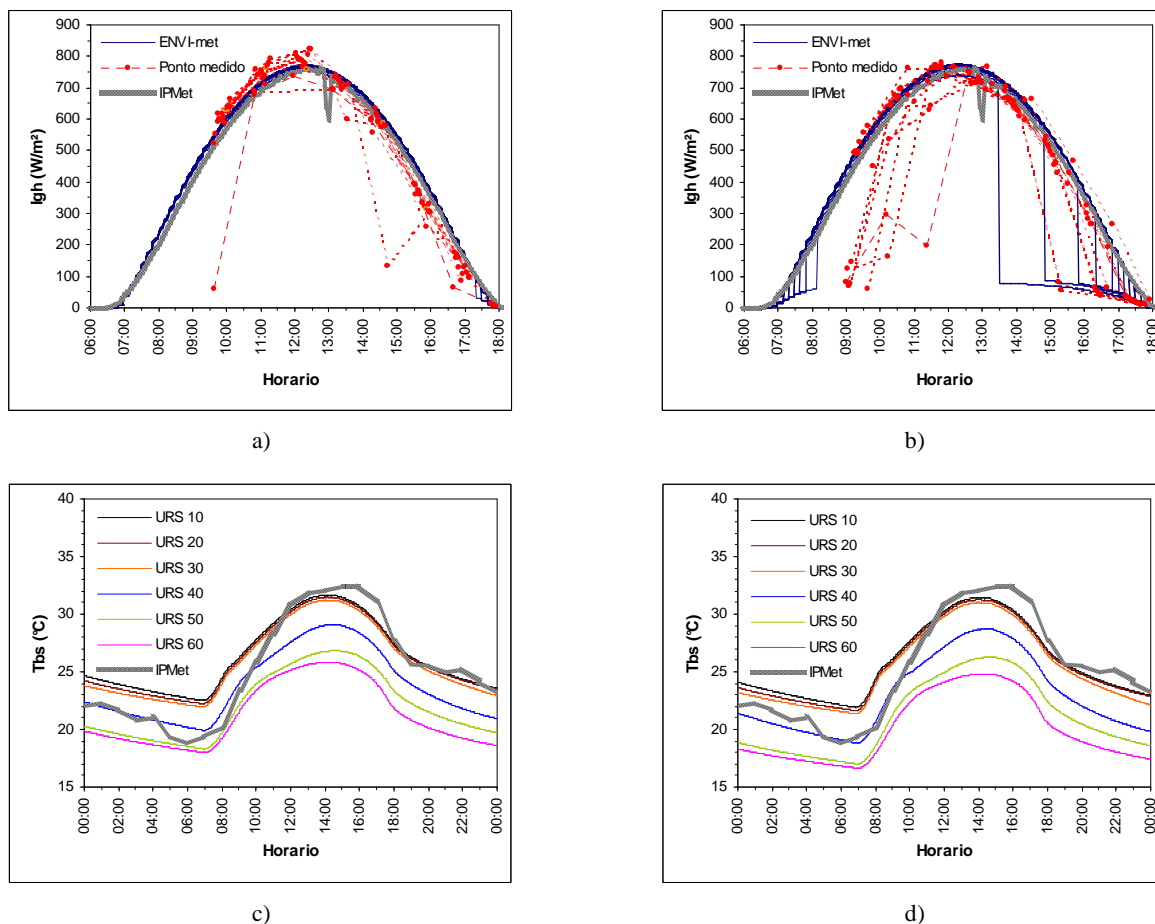


Figura 7 - Resultados da área de estudo do bairro: a) Igh na secção L-O; b) Igh na secção N-S; c) Tbs no ponto central da secção L-O; d) Tbs no ponto central da secção N-S.

Pela natureza das superfícies, altamente impermeabilizadas (calçamento, asfalto, cobertura ou piso pavimentado), sem praticamente nenhum sombreamento, e da geometria das construções, é de se esperar que a área do bairro apresente maiores amplitudes térmicas diárias e temperaturas máximas diárias do ar maior que as registradas no IPMet. No entanto, a Tbs máxima calculada pelo ENVI-met fica, na melhor resposta, ligeiramente abaixo da do IPMet, mas nesse caso a Tbs mínima fica aproximadamente 3 °C acima da de referência (Figura 7c e d).

Na área central, os valores de Igh (Figura 8a e b) são bastante influenciados pelas elevadas relações H/L. Assim, como a secção é N-S, os pontos mais próximos ao lado norte da via são sombreados o dia todo pelos prédios; os demais pontos recebem radiação solar direta principalmente no período da manhã, devido à ligeira inclinação do eixo da via. Novamente os maiores desvios dos dados calculados em relação aos medidos devem-se às imprecisões geométricas do modelo.

Por conta do grande período de sombreamento, é de se esperar que a amplitude térmica diária seja menor na área central. De fato, a amplitude calculada pelo ENVI-met (7,6 K) é menor que a registrada no IPMet (Figura 8c e d), e compatível com a amplitude média encontrada por Bertacchi e Faria (2003) na mesma área: no período de 15 de julho a 15 de agosto de 2002, de 9,5 K. No entanto, considera-se que o período no qual foi realizado o trabalho tenham ocorrido amplitudes máximas, em função da estabilidade do tempo e da ausência de chuva há mais de um mês; no caso, a amplitude máxima encontrada no trabalho citado foi de 9,5 K.

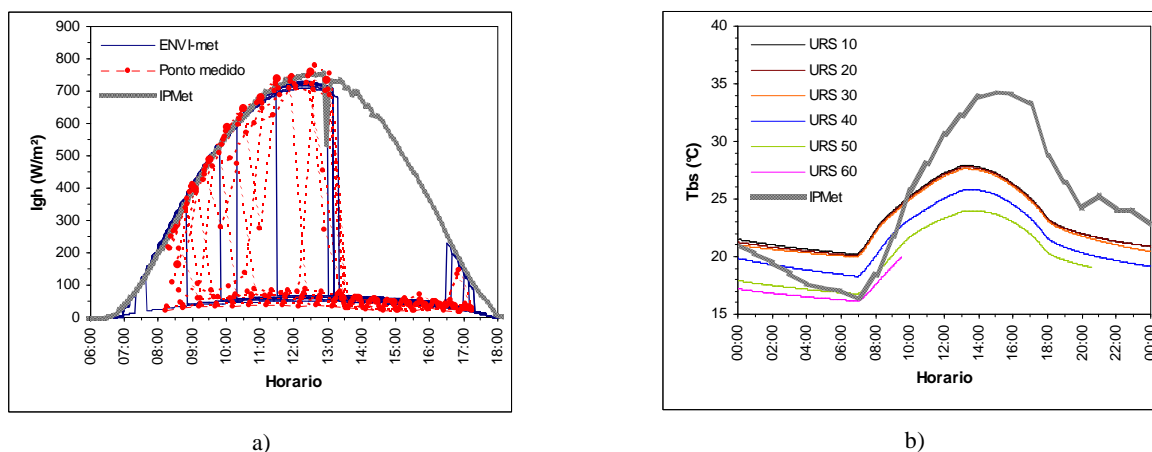


Figura 8 – Respostas de a) irradiância solar global no plano horizontal e b) temperatura do ar em um ponto da área de estudo central.

Em relação à URS, os menores valores (10 a 30%) resultaram em melhores respostas em relação à temperatura do ar. No entanto, as curvas de distribuição horária da variável não se aproximaram satisfatoriamente dos valores medidos nos pontos das áreas de estudo.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo, simulou-se o comportamento da irradiância solar e da temperatura do ar de dois segmentos da área urbana de Bauru através do *software* ENVI-met. Devido às semelhanças topográficas e geomorfológicas, ambas as áreas e mais a área da estação de referência dos dados meteorológicos poderiam ser vistas como uma área única, com três cenários de urbanização. Foi nesse contexto que se analisou o conjunto de resultados.

Em dias de céu limpo, como os presentes no estudo, o ENVI-met reproduz satisfatoriamente as irradiâncias solares direta e difusa, sendo a primeira condicionada à precisão do modelo geométrico do local estudado.

Em relação aos dados de entrada, a estabilidade das condições atmosféricas, em especial a homogeneidade da umidade a 2500 m, ao longo do dia estudado, é essencial para a geração de resultados fieis à realidade, uma vez que a entrada de dados do modelo dessa versão do ENVI-met corresponde ao valor de um único horário.

A variação de outro dado de entrada, a umidade relativa da camada superficial de solo, causa deslocamentos e variações na amplitude diária das distribuições horárias da temperatura e da umidade relativa do ar: da mesma forma que a umidade relativa do ar, sua redução acarreta a elevação dos valores instantâneos e da amplitude diária da temperatura do ar. Por outro lado, na umidade relativa do ar seu efeito é mais complexo, sendo que sua elevação causa inicialmente o aumento da amplitude diária dos valores instantâneos e, a partir de um determinado valor (que parece variar caso a caso), a amplitude torna a cair, com os valores instantâneos em patamares mais elevados.

Embora restritos, os resultados deste trabalho indicam que a aplicação do ENVI-met no estudo de cenários de urbanização nos quais ocorrem grandes alterações na forma de uso e ocupação do solo pode não fornecer resultados reais, uma vez que o adensamento e a verticalização urbana são em geral acompanhados pela redução da umidade da camada superficial do solo.

Dessa forma, embora a modelagem do ENVI-met seja bastante complexa, deve-se salientar a indicação feita por Bruse, seu autor, em seu primeiro artigo sobre o programa, segundo a qual ele é aplicável ao estudo resultante de mudanças de pequena escala no microclima urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALI TOUDERT, F.; MAYER, H. Street design and thermal comfort in hot and dry climate. In: Fifth International Conference on Urban Climate, 1-5 Sept. 2003, Lodz, Poland. **Proceedings...**, Lodz, 2005. Disponível em: <http://nargeo.geo.uni.lodz.pl/~icuc5/text/O_20_2.pdf>. Acesso em: 7 fev. 2008.
- ARNFIELD, J. Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **Int. J. Climatol.**, n. 23, 2003. p. 1-26.
- BERTACCHI, M. L.; FARIA, J. R. G. Ilhas de calor na cidade de Bauru (SP): As diferenças de temperatura e a configuração do solo local. In: VII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído e III Conferência Latino-Americana Sobre Conforto e Eficiência Energética em Edificações, 2003, Curitiba. **Anais do ENCAC-COTEDI 2003**. Florianópolis : UFSC/ANTAC, 2003. p. 646-652.

- BRUSE, M. **Updated overview over ENVI-met 3.0**. 2004. Disponível em: <<http://www.envi-met.com/documents/papers/overview30.pdf>>. Acesso em: 7 fev. 2008.
- BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with three-dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**, v.13, p. 373-384, 1998.
- CHEN, Z.; KRARTI, M.; ZHAI, Z.; MENG, Q; ZHAO, L. Sensitive analysis of landscaping effects on outdoor thermal environment in a residential community of hot-humid area in China. In: The Seventh International Conference on Urban Climate, Japan, 29 June - 3 July 2009, Yokohama. **Proceedings...**, Yokohama, Japan, 2009.
- COSTA, E. C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. São Paulo : Edgard Blücher, 1982.
- FAHMY, M.; SHARPLES, S.; Passive design for urban thermal comfort: a comparison between different urban forms in Cairo, Egypt. In: 25^a Conference on Passive and Low Energy Architecture, Ireland, 22-24 Oct., 2008, Dublin. **Proceedings...**, Dublin, 2008. Disponível em: <http://architecture.ucd.ie/Paul/PLEA2008/content/papers/poster/PLEA_FinalPaper_ref_307.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2009.
- HAN, S. G.; MUN, S. H.; HUH, J. H. Changes of the micro-climate and building cooling load due to the green effect of a restored stream in Seoul, Korea. In: Building Simulation 2007, 3-6 Sept. 2007, Beijing, China. **Proceedings...**, Beijing, 2007.
- JOHANSSON, E.; SPANGENBERG, J.; SHINZATO, P.; DUARTE, S. H. D.; BOSCO, L. Impacto da vegetação no microclima urbano - área da Luz - SP. In: ENCAC-ELACAC 2007 - IX Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 8-10 ago. 2007, Ouro Preto. **Anais...**, Ouro Preto, 2007.
- OKE, T.R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. IOM Report No.81, WMO/TD. No. 1250. Geneva: World Meteorological Organization, 2006. Disponível em: <<http://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2009.
- PELLETIER, G. SolRad - a solar position and solar radiation calculator for Excel/VBA. In: **Environmental assessment program – models for TMDLs**. Disponível em: <<http://www.ecy.wa.gov/programs/eap/models/solrad.zip>>. Acesso em: 24 mar. 2008.
- SÃO PAULO. SECRETARIA DE ENERGIA E SANEAMENTO. DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA; Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Controle de erosão: bases conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional; orientações para o controle de boçorocas urbanas**. São Paulo: DAEE/IPT, 1991.
- SOUCH, C.; GRIMMOND, S. Applied climatology: urban climate. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 2, p. 270-279, 2006.
- WILLMOTT, C. J. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin American Meteorological Society*, v. 63, n. 11, p. 1309-1313, 1982.
- WONG, N. H.; JUSUF, S. K. GIS-based and computer simulation evaluation on NUS campus master plan. In: 2nd PALENC Conference and 28th AIVC Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Ventilation Technologies in the 21st Century, September 2007, Crete island, Greece. **Proceedings...**, Crete island, 2007. v. 2, p. 1121-1126.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos apoios financeiros da FAPESP, através do Auxílio-Pesquisa proc. Nº. 2007/08097-2 e da bolsa de Iniciação Científica proc. Nº. 2008/10719-4, e do CNPq, através do proc. Nº. 400646/2008. Agradecem também a colaboração do IPMet, que forneceu os dados fundamentais ao desenvolvimento do experimento.