

ANÁLISE DO IMPACTO MICROCLIMÁTICO DA ADIÇÃO DE ÁREAS VERDES EM VIAS URBANAS DE CURITIBA

Flávia Osaku Minella (1); Eduardo Krüger (2)

(1) Doutora, arquiteta, flavia.osaku@gmail.com

(2) Doutor, Professor do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia, ekruger@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Av. Sete de Setembro, 3165 CEP. 80230-901 Curitiba PR

RESUMO

A adição ou retirada de vegetação no meio urbano provoca alterações no balanço hidrológico e energético. Nesse sentido, a vegetação pode ser utilizada como estratégia para alcançar níveis mais baixos de estresse térmico em dias com desconforto por calor. Em Curitiba, duas importantes ações voltadas à mobilidade consideram a inserção de vegetação para a requalificação da paisagem urbana. São elas: o projeto para a implantação do primeiro metrô do Estado do Paraná e a transformação do trecho urbano da antiga Rodovia Federal BR-116 em via urbana. O objetivo da presente pesquisa é analisar impacto microclimático da inserção de áreas verdes em vias urbanas no período diurno e em situação de verão. Para isso, foram utilizadas medições em campo para a coleta de dados microclimáticos, bem como simulações computacionais com a ferramenta ENVI-met. Para avaliação do conforto térmico foram utilizados os índices Temperatura Fisiológica Equivalente (PET) e o Universal Thermal Climate Index (UTCI). A análise de cenários arborizados em comparação com os cenários atuais mostrou que a presença de árvores de copa densa pode, em geral, auxiliar na redução do nível de estresse térmico em até duas categorias.

Palavras chaves: áreas verdes, clima urbano, conforto térmico, simulação computacional.

ABSTRACT

The addition or removal of vegetation in urban areas induces changes in the hydrological and energy balance. In this sense, vegetation can be used as a strategy to achieve more tangible levels of thermal stress on days with heat discomfort. In Curitiba, two important mass transport-related actions consider the inclusion of vegetation in urban redevelopment schemes. Firstly, the project for the implementation of the first subway in the State of Parana and, secondly, the transformation of the old Federal Highway BR-116 to an urban axis. The objective of this research is to analyze the microclimatic impact of green areas on urban axis under daytime summer conditions. For this purpose, field measurements were carried out for microclimate data gathering and computer simulations were run with the ENVI-met tool. To evaluate the thermal comfort indices both the Physiological Equivalent Temperature (PET) and the Universal Thermal Climate Index (UTCI) were used. The analysis of greener scenarios relative to the current settings showed that the presence of dense crown trees can generally assist in reducing the level of thermal stress up to two categories.

Keywords: green areas, urban climate, thermal comfort, computer simulation.

1. INTRODUÇÃO

A vegetação tem impacto na qualidade do ar e no clima, estando relacionada à qualidade de vida urbana (LOIS; LABAKI, 2011). Nesse sentido, áreas verdes podem auxiliar no incremento do conforto térmico externo e na obtenção de níveis mais baixos de estresse térmico em dias com desconforto por calor. Conforme Erell, Pearlmutter e Williamson (2011), para essa situação ser factível duas condições são necessárias: (1) o ar não pode estar extremamente quente, isto é, com temperatura maior que 35°C, nem muito úmido e (2) o fluxo de ar deve ser mantido a uma determinada taxa. Essa constatação é determinante para a dissipação de calor pelo corpo humano por convecção e evaporação, influenciando diretamente no balanço de energia ao nível do pedestre.

Segundo Mascaró (1996), a temperatura do ar sob agrupamentos vegetais pode ser 3 a 4 °C mais baixa que em áreas expostas à radiação solar direta, a qual pode ser interceptada entre 60 a 90% (OLGYAY, 1998, reduzindo também a temperatura superficial do solo.

Uma importante função da arborização para o planejamento das cidades é poder ser utilizada como recurso na requalificação da paisagem urbana, como proposto no projeto do primeiro metrô do Estado do Paraná denominado Linha Azul e na transformação de um trecho da antiga Rodovia Federal BR-116 em via urbana, denominada Linha Verde, ambos localizados na cidade de Curitiba. O plano do metrô prevê aumentar a capacidade de transporte público dos eixos estruturais Norte/Sul, os quais possuem maior carregamento diário. Com a liberação do corredor central exclusivo ao transporte coletivo, prevê-se a requalificação urbana destas para uma via pedonal arborizada. A Avenida Linha Verde (inaugurada no ano de 2009) estende-se por 22 bairros em uma extensão de aproximadamente 22 km. As alterações no zoneamento urbano e na tipologia de uso e ocupação do solo foram definitivas para que a Linha Verde pudesse se constituir como eixo indutor de crescimento e desenvolvimento da cidade (IPPUC/FIPE, 2012). Foram propostas intervenções físicas voltadas ao sistema viário, ao transporte, ao uso do solo e ao meio ambiente. No escopo do projeto para meio ambiente, ressalta-se a criação de um parque linear.

Entre os métodos de avaliação dos efeitos da vegetação no clima citam-se estudos que utilizam simulação computacional para a criação de cenários hipotéticos, como: Chen e Wong (2006), Fahmy e Sharples (2009) e Ng et al. (2012).

2. OBJETIVO

O objetivo é analisar o impacto microclimático da inserção de áreas verdes em vias urbanas no período diurno e em situação de verão.

3. MÉTODO

Curitiba (25°31' S, 49°11' W, 917 m acima do nível do mar) abrange uma área de 435,036 km², possui uma população estimada de 1.848.946 habitantes (estimativa para o ano de 2013), sendo a cidade mais populosa do sul do Brasil e a oitava em nível nacional (IBGE, 2014). De acordo com a classificação de Köppen-Geiger, o clima de Curitiba é predominantemente mesotérmico com verões frescos (Cfb). Entre as médias mensais, a temperatura máxima é de 26°C e a mínima é de 7,4°C, sendo que ventos advindos do Leste são comuns durante o ano todo (GOULART; LAMBERTS; FIRMINO, 1998). Esta seção está dividida em cinco partes, a saber: (1) apresentação dos pontos de medição; (2) coleta de dados microclimáticos em campo; (3) índices de conforto térmico utilizados; (4) procedimentos gerais aplicados nas simulações microclimáticas e (5) cenários propostos.

3.1 Apresentação dos pontos de medição (receptores)

As localizações dos pontos de medição coincidem com as dos pontos receptores no modelo ENVI-met, a partir do qual são feitas as leituras dos dados de saída. Foram considerados dois locais de medição, denominados Sete de Setembro e Linha Verde. Em ambos os locais, foram selecionados pontos representativos da morfologia urbana e ocupação do solo, isto é, locais consolidados e adensados.

O trecho que engloba a área de medição no Setor Estrutural da Avenida Sete de Setembro (localizado cerca de 2 km do centro de Curitiba) apresenta edificações construídas conforme tipologia do Plano Massa, apresentando afastamento lateral mínimo ou nenhum afastamento lateral (Figura 1a). Possui azimute de 67° e deflexão de 23° em relação ao eixo Leste-Oeste.

Na Linha Verde, foi escolhido para a locação da estação meteorológica um ponto próximo a Estação Vila Fanny (localizado cerca de 7 km do centro de Curitiba). Os motivos elencados para a escolha de tal ponto foram: área mais ou menos plana, grau de consolidação e segurança.

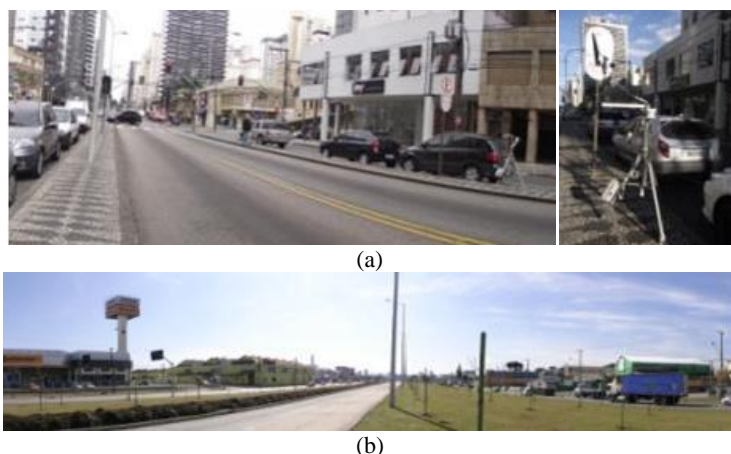


Figura 1 – Locais de medição: (a) Sete de Setembro, (b) Linha Verde.

No recorte englobado nas simulações, mais precisamente na borda da Avenida, predominam edifícios de dois pavimentos de uso comercial; no restante, a predominância é por edifícios térreos de uso habitacional, existindo ainda alguns barracões e pontos comerciais. A estação meteorológica foi alocada na ciclovia do canteiro central da Linha Verde (Figura 1b). A Linha Verde possui azimute de 37° e deflexão de 53° em relação ao eixo Leste-Oeste.

3.2 Coleta de dados microclimáticos em campo

A coleta de dados em campo serve para ajustar os dados simulados com aqueles obtidos in loco; validando, assim, os resultados das simulações. As medições das variáveis microclimáticas em campo foram realizadas em dois dias em cada ponto, sempre das 9h00 até 15h00, período no qual há maior circulação de pedestres. O ponto na Sete de Setembro foi monitorado nos dias 10/03/2012 e 11/03/2012. O ponto na Linha Verde foi monitorado no dia 06/03/2012 e 07/03/2012. A condição de céu em todos os dias de medição foi céu claro, sem nuvens ou com poucas nuvens esparsas.

As estações meteorológicas utilizadas foram da marca HOBO modelo H21-001. Cada estação estava equipada com os seguintes instrumentos: sensor de temperatura e umidade (S-THB-M002) a 1,30 m do solo; piranômetro de silício (S-LIB-M003) a 1,30 m do solo e sensor de direção e velocidade do vento (S-WCA-M003) a 1,90 m do solo. Nos conjuntos de estações meteorológicas utilizaram-se, também, termômetros de globo (variável necessária ao cálculo da T_{rm}) a 1,30 m do solo, com $\varnothing=2''$, pintados na cor RAL-7001/ cinza médio (THORSSON et al., 2007). As alturas dos instrumentos de medição seguem as recomendações da WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2008) e de Campbell (1997). As faixas de precisão dos instrumentos satisfazem às recomendações da norma ISO 7726 (1998), que dispõe sobre os instrumentos para a medição de variáveis físicas.

Para todos os casos, a T_{rm} (em $^\circ\text{C}$), importante variável na obtenção dos índices de conforto térmico, foi calculada pela fórmula para convecção forçada, definida pela norma ISO 7726 (1998).

As fotos olho de peixe para obtenção do fator de visão do céu (FVC), parâmetro adimensional que possibilita quantificar a porção de céu visível a partir de determinado ponto, foram obtidas com lente Sigma Fisheye 8 mm F-35 acoplada à câmera Nikon D80. O conjunto foi posicionado de forma a corresponder à altura do sensor de temperatura e umidade do ar (1,30 m do solo). O cálculo estimado do FVC foi realizado no modelo Rayman (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007). Este mesmo modelo serviu para traçar a carta solar, que sobreposta à foto olho de peixe, indica o período de incidência solar no ponto durante um ciclo diário.

3.3 Índices de conforto térmico utilizados

Na análise do nível de estresse térmico, são utilizados dois índices de conforto térmico: a Temperatura Fisiológica Equivalente (Physiological Equivalent Temperature - PET) e o Universal Thermal Climate Index (UTCI). Ressalta-se que faixas de conforto de cada índice não estão ajustadas para Curitiba. Considera-se que o fundamental nessa pesquisa é perceber a possibilidade de mudanças de categorias de conforto térmico a partir de cenários urbanos alternativos.

Para o cálculo do PET (HÖPPE, 1999), são consideradas as seguintes variáveis climáticas: T_a , T_{rm} , UR e v . E as seguintes variáveis individuais: taxa metabólica, eficiência mecânica, isolamento da vestimenta e atividade. Na presente pesquisa o PET foi calculado por intermédio do modelo RayMan (MATZARAKIS; RUTZ; MAYER, 2007). As informações pessoais foram baseadas nos dados de um homem padrão segundo a norma ISO 8996 (2004), sendo consideradas as seguintes características: idade 30 anos, altura 1,75 m e peso 70 kg. A taxa metabólica utilizada foi de 110 W e o valor de isolamento térmico das roupas considerado foi de 0,5 clo (condição de verão).

As variáveis de entrada para o cálculo do UTCI (JENDRITZKY et al., 2009), são: v a 10 m de altura (m/s), T_a ($^\circ\text{C}$), UR (%) e $T_{rm} - T_a$ ($^\circ\text{C}$). A taxa metabólica é assumida como constante e igual a 150 W/m² ou 2,6 met (pessoa caminhando a 4 km/h em terreno plano), e o grau de isolamento térmico da vestimenta é

atribuído a partir da T_a com base em observações empíricas em estudos de campo europeus (INTERNATIONAL..., 2001). O cálculo do UTCI foi realizado on line (<http://www.utci.org/utcineu/utcineu.php>). Para a conversão da velocidade do vento de 1,90 m para 10 m de altura do solo, utilizou-se a Equação 2 (OKE, 2006):

$$u_1/u_{ref} = \ln(z_1/z_0)/\ln(z_{ref}/z_0) \quad \text{Equação 1}$$

Onde u_1 é a velocidade do vento a altura desejada, u_{ref} é a velocidade do vento medido, z_1 é a altura desejada, z_{ref} é a altura dos instrumentos de medição e z_0 é o coeficiente de rugosidade.

O coeficiente de rugosidade adotado foi de 0,1, típico para áreas abertas com obstáculos ocasionais (WIERINGA et al., 2001). A Tabela 1 corresponde às categorias de estresse térmico para os dois índices considerados e está embasada nas informações de Mayer e Matzarakis (1998) e Bröde et al. (2011).

Tabela 1 – Categorias de estresse térmico para PET e UTCI.

PET	UTCI	Categorias de estresse térmico ao calor
18 a 23°C	9 a 26°C	Sem estresse térmico
23,1 a 29°C	26,1 a 32°C	Moderado estresse térmico
29,1 a 35°C	32,1 a 38°C	Forte estresse térmico
35,1 a 41°C	38,1 a 46°C	Muito forte estresse térmico
mais de 41,1°C	mais de 46,1°C	Extremo estresse térmico

Fonte: Fundamentado em Matzarakis (1998) e Bröde et al. (2011)

3.4 Procedimentos gerais aplicados nas simulações microclimáticas

O modelo computacional utilizado é o ENVI-met 3.1 Beta 5 (domínio público, disponível em <http://www.envi-met.com/>), desenvolvido por Bruse e Fleer (1998), com base nas leis fundamentais da dinâmica dos fluidos e da termodinâmica, de modo a simular as interações microclimáticas no ambiente urbano com resolução padrão de 0,5 m até 10 m no espaço e de 10 segundos no tempo (BRUSE, 2012).

3.4.1 Modelagem

O modelo ENVI-met permite modelar a área de estudo nas três dimensões espaciais, sendo organizado sobre uma grade, constituída por células ortogonais de mesmo tamanho. O modelo do cenário atual utilizado na Sete de Setembro foi confeccionado por Rasia (2010) para um estudo relacionado à qualidade do ar daquela região. No entanto, algumas modificações se fizeram necessárias, como o tamanho da grade z e a geração do método vertical aplicado. Na presente pesquisa, foram mantidos os tamanhos das grades x e y (6m), mas considerou-se 3m para a altura da grade z . Para as galerias advindas do Plano Massa foram consideradas grades com 3m de altura e sobrelojas com 6m de altura. O perímetro modelado corresponde a um domínio de 840m x 720m, totalizando uma área de 604.800 m². O ponto SS1 corresponde ao ponto de monitoramento. Para uma análise mais ampla foram adicionados os pontos SS2, SS3 e SS4.

Na Figura 2, a cor cinza corresponde às áreas construídas. Para a inserção de vegetação, pode-se escolher entre as opções disponíveis no banco de dados do modelo ou estabelecer uma nova configuração. No modelo ENVI-met, a vegetação é representada esquematicamente por um bloco, sendo que o corpo da planta tanto para cima da superfície, como para baixo, é dividido em 10 partes equidistantes. A divisão do corpo da planta, acima da superfície, é constituída pela densidade de área foliar (Leaf Area Density, LAD) (BRUSE, 2012). Para a vegetação arbórea foi selecionada árvore de 15 m de altura, copa densa e sem folhas na base (sigla T2, LAD para cada segmento: 0,000 0,000 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 2,180 1,720 0,000), representada na cor verde escuro. O critério para a escolha do padrão da árvore foi baseado na semelhança com as árvores da região. Para a superfície gramada, foi alterada a altura da grama existente no banco de dados do programa de 50 cm para 20 cm (sigla xx, LAD para cada segmento: 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300 0,300), representada na cor verde clara. O critério para a escolha do padrão da árvore foi baseado na semelhança com as árvores da região.

Para a modelagem do cenário atual da Linha Verde foi utilizada planta cadastral cedida pela prefeitura de Curitiba projetada sobre imagem de satélite (GOOGLE EARTH, 2012). A altura das edificações foi realizada de maneira visual durante levantamento in loco, sendo estipulada uma altura de 3 m para cada pavimento e contado o número de pavimentos de cada edificação. O recorte selecionado para o estudo compreende um perímetro de 576 m, tanto no eixo x , como no eixo y , perfazendo 331.776,0m². O tamanho (em m) de cada célula de grade utilizada foi de 6 x 6 x 3 m (eixos x , y e z). Para simplificação do modelo, o tipo de solo escolhido foi asfalto, tanto para a área do modelo como para as bordas do modelo. Na Figura 2b, note que o ponto LV1 corresponde ao local de medição das variáveis climáticas. Foram considerados, também, os pontos LV2 e LV3.

Na direção horizontal, mais especificamente na área que circunda o limite da área principal, pode ser acrescentada uma área de aninhamento, a qual consiste em um campo de transição bidimensional para os fluxos de vento e radiação solar, evitando instabilidades na borda da área principal. Para esta área, 5 grades

de célula se mostraram suficientes em ambos os modelos. Para a configuração das grades verticais, são oferecidas as opções equidistantes ou telescópicas. Esta última opção é recomendada no caso de ser necessário incluir edificações de grande altura e de não ser objeto principal de análise os processos ocorridos nas partes mais altas do modelo. Deve-se fixar um valor em porcentagem para o fator de expansão, que pode iniciar logo a partir da célula de grade mais próxima do solo ou a partir de uma altura definida pelo usuário. Nos dois modelos, o fator telescópico de 20% foi aplicado a partir de 57m de altura do solo.

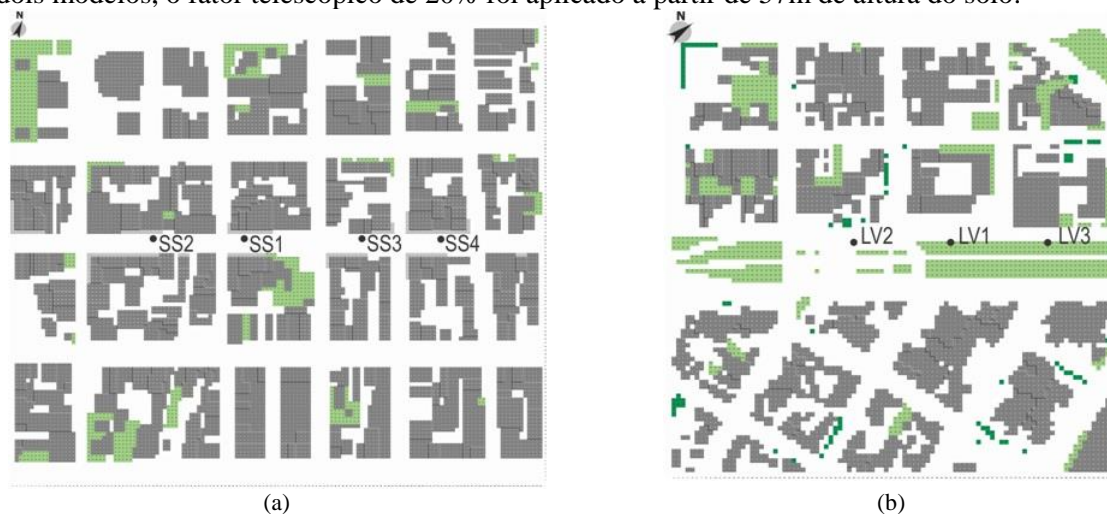


Figura 2 – Modelos finalizados: (a) Sete de Setembro, (b) Linha Verde.

3.4.2 Ajustes nas configurações dos modelos

Os dados climáticos das estações de referência servem como variáveis de entrada no modelo ENVI-met. Para os estudos em Curitiba, utilizaram-se dados coletados no centro politécnico da Universidade Federal do Paraná, obtidos na plataforma disponível online pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/maps/automaticas.php>). O dado de umidade específica do ar a 2.500 m (em g/kg) permanece constante durante a simulação e pode ser obtido, por exemplo, no site da Universidade de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>).

Inicialmente, os primeiros testes com os modelos da Sete de Setembro e da Linha Verde foram realizados a partir dos valores médios diários de velocidade e direção do vento, como também, de temperatura e de umidade relativa do ar. Em relação à umidade específica do ar a 2500 m de altura, faz-se a ressalva de que no site de sondagens atmosféricas da Universidade de Wyoming, não constam dados relativos aos meses de janeiro até maio de 2012 para a cidade de Curitiba. Para contornar essa situação, foram considerados os dados correspondentes a 0Z do mês de março dos anos de 2011 e 2013, calculada uma média aritmética para o mês de março de cada ano e depois uma média final.

Nos testes iniciais, tanto na Sete de Setembro como na Linha Verde, os dados preditos apontaram valores de T_a no período analisado acima daqueles medidos; sendo necessário um valor de entrada mais baixo do que o valor médio diário. Optou-se, então, por utilizar o dado horário de T_a às 0h00; para as outras variáveis climáticas ficaram mantidas as médias diárias (Tabela 2).

Tabela 2 – Configuração do modelo da Linha Verde e Sete de Setembro – dia medido.

Área de estudo	Sete de Setembro	Linha Verde	Configuração
Data	10/03/2012	07/03/2012	Dia medido
Início da simulação	00:00:00	00:00:00	Atmosfera neutra
Velocidade do vento (m/s)	1,7	2,2	Média diária
Direção do vento (graus)	110	68	Média diária
Comprimento de rugosidade	0,1	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	291	291,7	Dado às 0h00
Umidade Especifica a 2500 m (g/kg)	9	9	Valor calculado
Umidade Relativa do ar (%)	64	64	Média diária

A função solar adjust refere-se ao ajuste do cálculo para a radiação de onda curta, variando a partir de 50% até 150% do valor padrão calculado pelo ENVI-met, sendo utilizado o valor de 1,2. Foi considerado céu claro, sem nuvens. Para as condições laterais do modelo utilizou-se a opção forced. As outras opções de

configuração foram mantidas originais. Foram descartadas as 33 primeiras horas de simulação. Os resultados entre a T_a medida e predita para o período de análise podem ser observados no Figura 3.

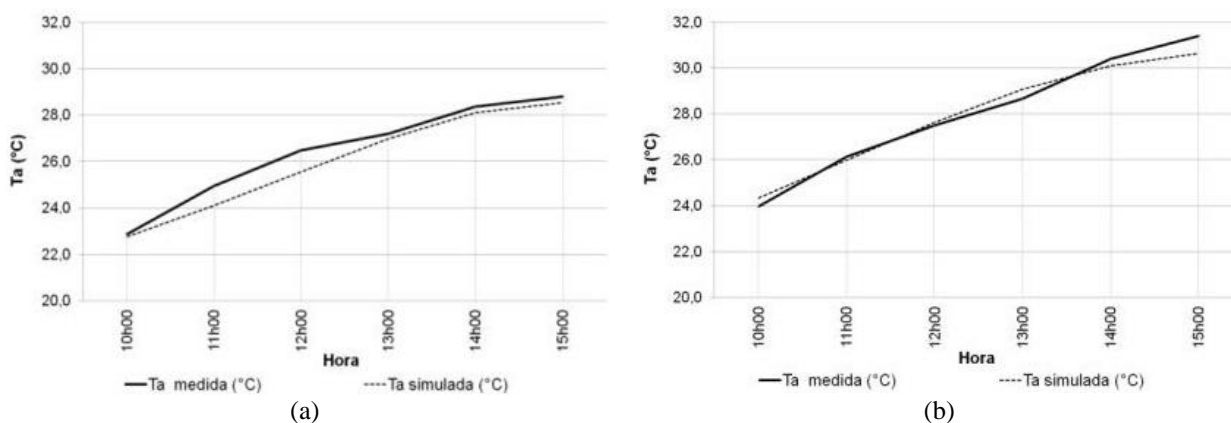


Figura 3 – Comparação entre a T_a medida e simulada: (a) Sete de Setembro, (b) Linha Verde

Especificamente na Sete de Setembro ressalta-se que, principalmente nas duas primeiras horas de medição a T_{rm} predita apresentou valores demasiadamente altos se comparados aos valores medidos; fator que refletiria diretamente na determinação das diferenças entre os índices de conforto medidos e simulados. Desta forma, optou-se por considerar nos cenários simulados da Sete de Setembro apenas o recorte horário das 12h00 até às 15h00.

Na Tabela 3 constam os valores médios medidos e preditos dos pontos monitorados na Sete de Setembro (período das 12h00 até às 15h00) e na Linha Verde (período das 10h00 até às 15h00), considerando as seguintes variáveis climáticas: T_a (°C), T_{rm} (°C), I_g (W/m^2), UR (%), v (m/s), PET (°C) e UTCI (°C). Na Sete de Setembro, a condição de conforto no período analisado tanto na situação medida como na predita foi em forte estresse térmico ao calor na escala PET e em moderado estresse térmico ao calor na escala UTCI. Na Linha Verde, as situações medidas e preditas coincidiram na categoria de muito forte estresse térmico para o índice PET e na categoria de forte estresse térmico para o índice UTCI.

Tabela 3 – Valores médios medidos e preditos: Sete de Setembro e Linha Verde

Ponto	Média	T_a (°C)	T_{rm} (°C)	I_g (W/m^2)	UR (%)	v (m/s)	PET (°C)	UTCI (°C)
Sete de Setembro	medida	26,5	41,8	410	48	1,1	30,2	29,3
	predita	26,0	49,0	436	44	0,7	29,3	28,7
Linha Verde	medida	28,0	56,8	855	43	2,1	36,7	32,2
	predita	28,0	58,0	996	45	1,7	38,4	33,3

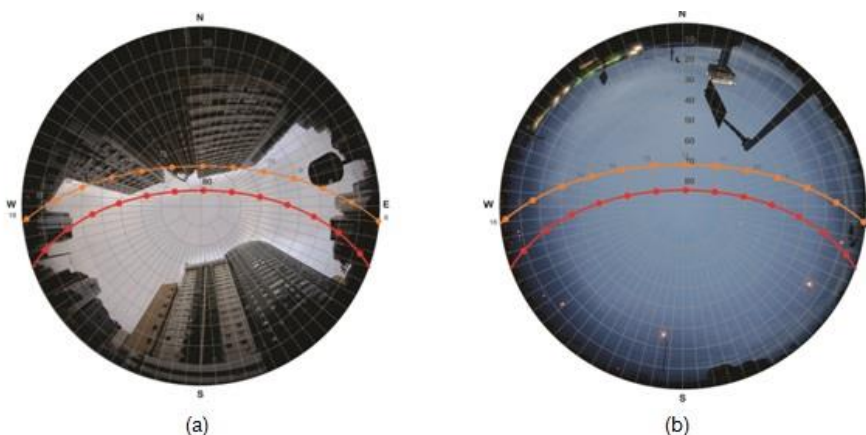


Figura 4 – Foto olho de peixe e traçado solar para: (a) Sete de Setembro e (b) Linha Verde

A Figura 4 corresponde à carta solar sobreposta a foto olho de peixe para a Sete de Setembro e para a Linha Verde. O traçado na cor laranja corresponde aos dias em que os pontos foram monitorados (dia 10/03/2012 na Sete de Setembro e dia 07/03/2012 na Linha Verde).

Conforme pode ser observado, durante o período das 11h00 até às 18h00 do dia 10/03/2012, o ponto na Sete de Setembro estava sujeito ao sombreamento das edificações do entorno. Desta forma, optou-se em concentrar as simulações dos cenários futuros não para um dia específico, mas para um dia típico de projeto, uma vez que haveria menos sombreamento no cânion urbano, propiciando uma melhor avaliação da condição de conforto térmico. O traçado na cor vermelha corresponde ao dia típico de projeto 28/01.

As características de um dia típico de projeto servem como referência para o desenvolvimento de projetos que respondam as exigências termo-higrométricas, proporcionando uma melhor resposta quanto ao conforto térmico. O dia típico lida com um dia teórico, sendo desenvolvido por Goulart, Lamberts e Firmino (1998). Segundo os autores, a declinação solar é o parâmetro para estabelecer a data de referência. Para a pesquisa foi selecionado o dia 28/01 como data de referência, dia típico de nível 1%.

Para a simulação com o dia típico de projeto, foram utilizados na configuração dos dados de entrada do ENVI-met os valores médios diários das variáveis v , dir e U . Para o valor de entrada de T_a foi considerado o dado registrado às 0h00, em ambas as localidades. Para a determinação do valor de umidade específica seguiu-se o mesmo critério na determinação da umidade específica do mês de março. Os dados de entrada constam da Tabela 4. O fator de ajuste solar para ondas curtas foi de 1,2. Para as condições laterais do modelo, manteve-se a opção forced.

Tabela 4 – Configuração do modelo da Linha Verde e Sete de Setembro – dia típico de projeto.

Área de estudo	Sete de Setembro e Linha Verde	Configuração
Data	28/01/2012	Dia típico de projeto nível 1%
Início da simulação	00:00:00	Atmosfera neutra
Velocidade do vento (m/s)	3,2	Média diária
Direção do vento (graus)	90	Média diária
Comprimento de rugosidade	0,1	Valor estipulado
Temperatura do ar (K)	293,6	Dado às 0h00
Umidade Especifica a 2500 m (g/kg)	9	Valor calculado
Umidade Relativa do ar (%)	80	Média diária

3.5 Cenários propostos

A Figura 5 corresponde à modelagem do cenário proposto para melhoria do ambiente térmico na Sete de Setembro e na Linha Verde. Em tal cenário, foi considerada a possibilidade máxima da utilização de cobertura arbórea. Note que os pontos LV1 e LV3 estão situados sob a copa das árvores, enquanto o ponto LV2 está situado no entorno das árvores inseridas no modelo. As áreas construídas estão representadas pela cor cinza, as superfícies gramadas pela cor verde claro e as árvores de 15 m de altura, copa densa, sem folhas na base pela cor verde escuro.

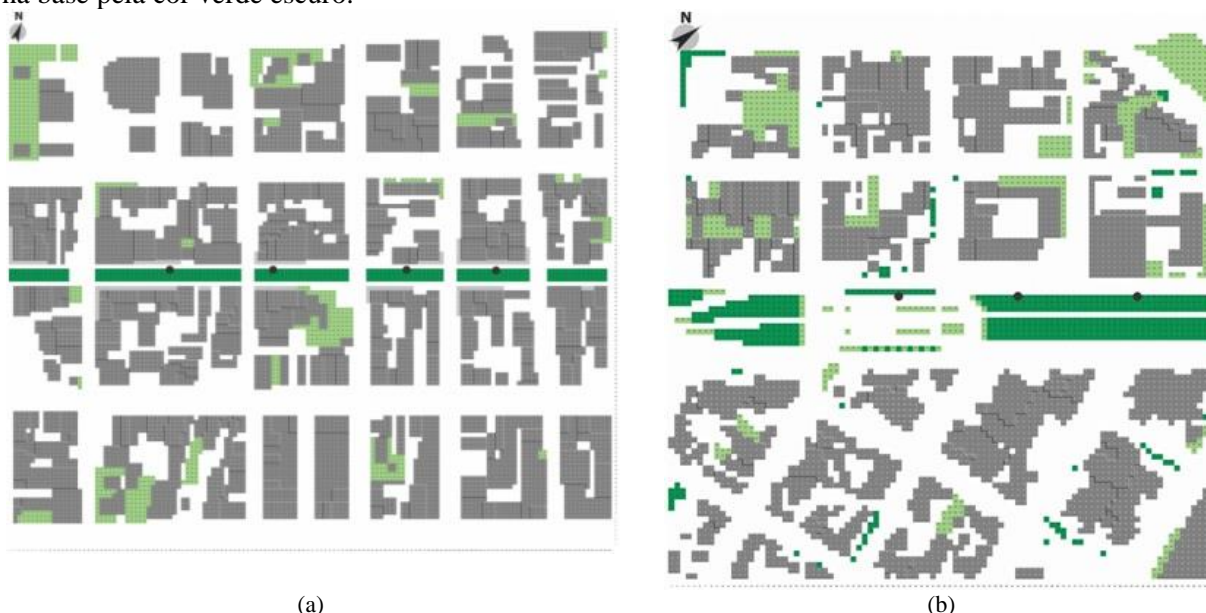


Figura 5 – Cenário proposto: (a) Sete de Setembro, (b) Linha Verde.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Devido à complexidade inerente à simulação do microclima urbano, uma vez que diversas variáveis compreendem a sua formação, a capacidade de reprodução da situação real no ambiente de simulação será sempre limitada em algum aspecto (como exemplo de limitações do modelo, citam-se: a modelagem ortogonal, a padronização da temperatura interna das edificações a um valor constante e a desconsideração

do efeito de inércia térmica da massa edificada). Nesse sentido, os resultados aqui auferidos devem ser entendidos como indicadores de tendências.

A Tabela 5 contém dados de temperatura do ar e categoria de estresse térmico do cenário atual da Sete de Setembro. Os valores de fator de visão do céu (FVC) correspondem aos fornecidos pelo modelo ENVI-met. No cenário atual, para um dia típico de projeto, considerando a média do período de análise, observa-se que a Ta média variou de 29,2°C no ponto SS2 até 31,1°C no ponto SS4. Nessa situação, os pontos SS1, SS3 e SS4 estariam em extremo estresse térmico ao calor considerando o índice PET. Já o ponto SS2 estaria em muito forte estresse térmico ao calor. Na categorização do índice de conforto UTCI, os pontos SS1 e SS3 estariam em muito forte estresse térmico, enquanto os pontos SS2 e SS4 estariam em forte estresse térmico ao calor.

Tabela 5 – Sete de Setembro: cenário atual.

Hora	SS1 (FVC 0,47)	SS2 (FVC 0,49)	SS3 (FVC 0,55)	SS4 (FVC 0,55)
	Ta (°C)	Ta (°C)	Ta (°C)	Ta (°C)
média	29,5	29,2	30,2	31,1
PET (°C)	48,3	38,3	47,9	45,7
categoria de estresse térmico ao calor	Extremo	Muito forte	Extremo	Extremo
UTCI (°C)	38,5	33,5	38,3	37,0
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte	Forte	Muito forte	Forte

A Tabela 6 apresenta os dados do cenário proposto e as diferenças em relação ao cenário atual para a Sete de Setembro. Nota-se que o ponto SS2 apresentou a menor redução na Ta entre os pontos analisados, com 0,6°C. O ponto com redução mais significativa foi o SS4 com média de 1,1°C. Embora tenham ocorrido diferenças entre os índices de conforto térmico PET e UTCI no cenário atual, a partir da adição de área arborizada no cenário proposto, a melhora máxima obtida em todos os pontos e para ambos os índices foi em moderado estresse ao calor. Esse fato demonstra que a inserção de vegetação produz efeitos mais significativos nas categorias de estresse térmico do índice PET do que nos níveis do índice UTCI.

Tabela 6 – Sete de Setembro: cenário proposto e diferenças em relação ao cenário atual.

Hora	SS1 (FVC 0,00)		SS2 (FVC 0,02)		SS3 (FVC 0,01)		SS4 (FVC 0,00)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
média	28,9	0,7	28,7	0,6	29,4	0,8	30,1	1,1
PET (°C)	28,4	20,0	27,9	10,4	28,6	19,3	28,6	17,1
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	
UTCI (°C)	28,6	9,9	28,2	5,3	28,8	9,5	28,9	8,1
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Moderado		Moderado		Moderado	

Para todo o perímetro modelado, a partir do cenário proposto e com inserção de área arborizada correspondendo a 3,6%, a Ta sofreria uma redução pouco significativa, correspondendo a 0,2°C. Se considerada apenas a via na qual as interferências foram aplicadas diretamente, correspondendo a 85,3% de área arborizada, a redução de Ta passa a ser de 0,6°C (Tabela 7).

Tabela 7 – Comparação entre a Ta dos cenários atual e proposto.

Hora	Ta (°C) - modelo completo		Ta (°C) - trecho da Avenida	
	cenário atual	cenário proposto	cenário atual	cenário proposto
Média	30,3	30,1	30,0	29,4
Diferença	0,2		0,6	

A Tabela 8 corresponde aos dados de Ta, categoria de estresse térmico e FVC do cenário atual na Linha Verde. A maior média de Ta encontra-se no ponto LV3, com 30°C. O ponto menos aquecido é o ponto LV1, com 29,4°C. A categoria de estresse térmico para ambos os pontos é em muito forte para o índice PET e em forte estresse térmico ao calor para o índice UTCI. O ponto LV2 apresentou uma Ta média intermediária entre os valores médios registrados nos pontos LV1 e LV3. No entanto, para o índice PET este ponto estaria em extremo estresse térmico ao calor no período de análise. Essa situação decorre do ponto LV2 apresentar maior valor de Trm, uma vez que o mesmo encontra-se sobre superfície pavimentada; enquanto os outros dois pontos encontram-se sobre superfície originalmente gramada. Na avaliação do índice UTCI, o ponto LV2 encontra-se em forte estresse térmico, mesma categoria dos outros pontos.

Tabela 8 – Linha Verde: cenário atual.

Hora	LV1 (FVC 0,97)	LV2 (FVC 0,97)	LV3 (FVC 0,97)
	Ta (°C)	Ta (°C)	Ta (°C)
média	29,4	29,6	30,0
PET (°C)	38,5	45,6	39,4
categoria de estresse térmico ao calor	Muito forte	Extremo	Muito forte
UTCI (°C)	33,6	36,9	34,3
categoria de estresse térmico ao calor	Forte	Forte	Forte

A partir da inserção de arborização no cenário proposto, percebe-se que o ponto LV3, que possuía a maior Ta entre os três pontos, sofre maior redução, com média de 1,2°C. No ponto LV1 a Ta é reduzida em média 0,9°C. Nesses pontos, a categoria de muito forte estresse térmico passa para moderado estresse térmico ao calor, na avaliação dos índices PET e UTCI (Tabela 9).

Tabela 9 – Linha Verde: cenário proposto e diferenças em relação ao cenário atual.

Hora	LV1 (FVC 0,13)		LV2 (FVC 0,63)		LV3 (FVC 0,13)	
	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)	Ta (°C)	Dif (°C)
média	28,5	0,9	29,1	0,4	28,8	1,2
PET (°C)	28,2	10,3	40,6	5,0	28,4	11,0
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Muito forte		Moderado	
UTCI (°C)	28,4	5,2	34,7	2,2	28,8	5,6
categoria de estresse térmico ao calor	Moderado		Forte		Moderado	

No ponto LV2, a redução na Ta é menos significativa, pois o mesmo encontra-se ao lado das copas das árvores e não sob estas. A redução média na Ta foi de 0,4°C. A redução média de 5,0 °C no índice PET, permite que o ponto passe de extremo para muito forte estresse térmico, porém a redução de 2,2°C no índice UTCI não é suficiente para uma melhora na condição de conforto, fazendo com que o ponto permaneça em forte estresse térmico.

Considerando toda a área modelada, observa-se uma redução de 0,5°C na Ta média a partir da introdução de 4,6% de área arborizada (Tabela 10). Levando em conta apenas o recorte do trecho da Avenida Linha Verde modelada, a Ta sofre uma redução média de 0,6°C a partir do cenário proposto, com a introdução de 27,5% de área arborizada.

Tabela 10 – Comparação entre a Ta dos cenários A e B.

Hora	Ta (°C) - modelo completo		Ta (°C) - trecho da Avenida	
	cenário atual	cenário proposto	cenário atual	cenário proposto
Média	30,0	29,5	29,8	29,2
Diferença	0,5		0,6	

5. CONCLUSÕES

Para um dia típico, considerando o período diurno e a situação de verão, a inserção de árvores de copa densa no centro das avenidas Sete de Setembro e Linha Verde, formando um parque linear, não é capaz de alcançar conforto térmico. No entanto, as categorias de estresse térmico podem ser reduzidas em até duas categorias mais próximas da neutralidade térmica.

Em média, o corredor verde implantado sobre a canaleta de ônibus influenciou a redução da Ta nos passeios em 0,5°C. Na Linha Verde a inserção de vegetação no canteiro central, afetaria a Ta média nos passeios em 0,6°C.

Se comparado o impacto da arborização dos cenários propostos na Sete de Setembro e na Linha Verde, pode-se considerar que nesta última localidade o efeito foi mais significativo, pois uma menor porcentagem de área verde foi adicionada (27,5% contra 85,3%) e a mesma redução na temperatura do ar foi alcançada (0,6°C). Vale lembrar que no cenário atual, a Linha Verde apresenta maior exposição à radiação solar incidente (maior fator de visão do céu).

Ressalta-se que a adição de área verde foi disposta de modo a configurar corredores verdes. Porém, resultados mais satisfatórios poderiam ser obtidos se a vegetação fosse distribuída ao longo da malha urbana e não concentrada em apenas uma única via. Nesse sentido, ressalta-se que a forma de distribuição e da densidade da copa da árvore são fatores determinantes para os resultados alcançados.

No que tange à acuidade do modelo ENVI-met na versão 3.1 Beta 5, o programa mostrou-se eficaz para o cumprimento dos objetivos propostos na pesquisa. O modelo tem sido empregado em diversos estudos, no entanto, são poucos os que utilizam testes estatísticos para a validação dos dados. Em geral, observou-se que o índice de conforto térmico PET tende a classificar em uma categoria acima o estresse térmico quando comparado ao UTCI. Detectou-se, também, que no UTCI as categorias de estresse térmico possuem uma faixa mais ampla do que o índice PET, o qual mostrou ser mais sensível as alterações na cobertura vegetal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BRÖDE, Peter et al. Deriving the Operational Procedure for the Universal Thermal Climate Index UTCI. *Int J Biometeorol*, special issue UTCI, p.1-14, 2011.
- BRUSE, Michael. **ENVI-met website**. Disponível em: <<http://www.envi-met.com>>. Acesso em: 21 jan. 2012.
- BRUSE, Michael; FLEER, H. Simulating Surface-Plant-Air Interactions Inside Urban Environments with a Three Dimensional Numerical Model. *Environmental Software and Modelling*, v. 13, p. 373-384, 1998.
- CAMPBELL, S. **Application Note**: Weather Station Siting and Installation Tools. 1997.
- CHEN, Y.; WONG, N. H. Thermal benefits of city parks. *Energy and Buildings*. 38, 105-120, 2006.
- ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate**: designing the spaces between buildings. Earthscan/James & James Science Publishers, London, 2011, 266p.
- FAHMY, M.; SHARPLES, S. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. *Build Environ*, v. 44, n. 9, p. 1907-1916, 2009.
- GOOGLE Inc. **Google Earth**. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 19 dez. 2012.
- GOULART, S.; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. **Dados climáticos para projeto e avaliação energética de edificações para 14 cidades brasileiras**. Florianópolis: PROCEL/Núcleo de Pesquisa em Construção, UFSC, 1998.
- HÖPPE, Peter. The Physiological Equivalent Temperature: a index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, n.43, p. 71-75, 1999.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Anuário Estatístico do Brasil 2013**. v. 70. Rio de Janeiro: IBGE, 2014.
- INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO DE CURITIBA (IPPUC)/ FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISAS ECONÔMICAS (FIPE). **Estudo de impacto ambiental da Operação Urbana Consorciada Linha Verde – EIA – OUCLV**. São Paulo, v. I, 2012. Disponível em: <<http://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/operacao-urbana-eia/560>>. Acesso em 04 jan. 2013.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7726**: ergonomics of the thermal environment: instruments of measuring physical quantities. Switzerland, ISO, 1998.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF BIOMETEOROLOGY. **Commission 6 for the Development of a Universal Thermal Climate Index (UTCI)**. Meeting Report, Freiburg, Germany, June 7-8, 2001. Freiburg: ISB Commission, 2001.
- JENDRITZKY G.; HAVENITH G.; WEIHS P.; BATCHVAROVA E. **Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being**, Final Report COST Action 730, 2009.
- LOIS, E.; LABAKI, Lucila C. Conforto térmico em espaços externos: uma revisão. In: 6. ENCONTRO NACIONAL e 3. ENCONTRO LATINO-AMERICANO SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. *Anais...* São Pedro, 2001.
- MASCARÓ, Lucia. **Ambiência Urbana**. 1 ed. Porto Alegre: Sagra – DC Luzzatto, 1996.
- MATZARAKIS, A.; RUTZ, F.; MAYER, H. Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model. *Int J Biometeorol*, v. 51, p. 323-334, 2007.
- MAYER, Helmut; MATZARAKIS, Andreas. Human-biometeorological assessment of urban microclimates' thermal component. In: Int. Symposium on Monitoring and Management of Urban Heat Island. Fujisawa, Japan. **Proceedings...**1998, p.155-168. 1998.
- NG, E.; LIANG, C.; WANG, Y. N.; YUAN, C. A study on the cooling effects of greening in high-density city: an experience from Hong Kong. *Build Environ*, v. 47, p. 256-271, 2012.
- OKE, Tim R. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites**. Report N°. 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: 05 ago. 2009.
- OLGYAY, Victor. **Arquitetura y clima**. Manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona, Editora Gustavo Gili, 1998.
- RASIA, Francisco B. C. **Simulação e análise da dispersão de poluentes nas vias estruturais em Curitiba**, Paraná. 2011. 211 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Programa de Pós Graduação em Tecnologia. UTFPR, Curitiba, 2011.
- THORSSON, S. et al. Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. *International Journal of Climatology*. n.27, p.1983 -1993, 2007.
- WIERINGA J., DAVENPORT A. G., GRIMMOND C. S. B., OKE T. R. New revision of Davenport roughness classification. In: Third European & African Conference on Wind Engineering, Eindhoven, The Netherlands, July 2-6, 2001. **Proceedings** Edited by J.Wisse, K.Kleinman, C.Geurts, M.de Wit.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). Guide to meteorological instruments and methods of observation. No. 8. Geneva : World Meteorological Organization, 2008. Disponível em: <http://www.wmo.int/pages/prog/gcos/documents/gruanmanuals/CIMO/CIMO_Guide-7th_Edition-2008.pdf>. Acesso em: 29 mar. 2013.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Capes pela concessão da bolsa de doutorado.