**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

Áreas verdes e conforto térmico: o papel da vegetação no controle dos ventos

Helena Cristina Padovani Zanlorenzi

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Conservação de
Ecossistemas Florestais

**Piracicaba
2015**

Helena Cristina Padovani Zanlorenzi
Arquiteta

Áreas verdes e conforto térmico: o papel da vegetação no controle dos ventos
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **DEMÓSTENES FERREIRA DA SILVA FILHO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestra em Ciências, Programa: Recursos
Florestais. Opção em: Conservação de
Ecossistemas Florestais

Piracicaba
2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - DIBD/ESALQ/USP

Zanlorenzi, Helena Cristina Padovani

Áreas verdes e conforto térmico: o papel da vegetação no controle dos ventos / Helena Cristina Padovani Zanlorenzi. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

129 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Silvicultura urbana 2. Clima urbano 3. Conforto térmico 4. Barreira aos ventos 5. LAI
6. ENVI-met® I. Título

CDD 715.2
Z31a

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

Ao Gustavo,
Meu filho e meu melhor amigo,
Com amor, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por sempre iluminar e proteger meus passos.

Aos meus pais Guido e Maria Helena, pelo amor, apoio e incentivo incondicionais ao longo de toda a minha vida.

Ao meu filho Gustavo, pelo companheirismo, por ter sempre participado de minhas conquistas enquanto buscava as dele, e seguimos crescendo juntos.

Aos meus irmãos e à tia Yvonne Casale Padovani, por sempre acreditarem em mim, e à Ana Cláudia Valério pelo incentivo para buscar uma oportunidade na ESALQ.

Ao meu orientador Prof. Dr. Demóstenes Ferreira da Silva Filho, pela confiança e apoio constante, acreditando em meu potencial.

À Profa. Dra. Alessandra Rodrigues Prata Shimomura, pela preciosa atenção e disponibilidade, em especial por ocasião das medições em campo.

Ao Prof. Dr. Hilton Thadeu Zarate do Couto pelo importante auxílio na estatística, e ao Prof. Dr. João Luís Ferreira Batista pelas orientações e sugestões.

À Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki e à UNICAMP, pela pronta colaboração no empréstimo de equipamentos do LACAF para as medições em campo, com suporte dos técnicos Obadias e Daniel.

Ao Prof. Luiz Carlos Chichierchio, meu grande mestre há tantos anos, a quem devo grande parte do que sei da profissão e da vida, por seu constante apoio ao meu desenvolvimento pessoal, profissional e acadêmico.

Ao Prof. Dr. Clóvis Pinto de Castro, pela pronta disponibilidade em me auxiliar no acesso à Unimep e pela amizade e apoio.

Ao Juscelino Rodrigues Monção Neto, Gerente Administrativo da Unimep, bem como aos funcionários e vigias da instituição, agradeço pelos prestativos esforços em colaborar para minha coleta de dados no campus Taquaral.

À Profa. Dra. Denise Helena Silva Duarte, pelo suporte bibliográfico, pelos ensinamentos e valiosos comentários pertinentes à minha pesquisa.

À Profa. Dra. Maria de Assunção Ribeiro Franco, pelas orientações e sugestões.

À Léa Dobbert, colega e amiga para todos os momentos, pelo apoio constante e irrestrito.

Ao Flávio Henrique Mendes, pela amizade e boa vontade em me auxiliar no uso do ENVI-met, na coleta de dados em campo e em tantas outras tarefas, sempre que precisei.

Ao Jefferson Lordello Polizel, pela pronta resposta a todas as solicitações de ajuda, tanto no levantamento de campo quanto no tratamento dos dados, e pela preciosa amizade.

Ao colegas do CMQ, pela ajuda, carinho e amizade, em especial à Camila, Luciana, Mariana, Felipe e Gustavo pela colaboração nos trabalhos de campo. Luciana, grata também pela ajuda na estatística!

À Giovana Oliveira, pela atenção e disposição sempre que precisei ao longo desta etapa.

Ao Prof. Dr. Natal Gonçalves e ao Alexandre Vendemiatti, pela acolhida na ESALQ por ocasião do curso de extensão Como as Plantas Funcionam, e à Zélia Maria Angeli Caniatti (in memoriam), por me informar sobre este curso que me abriu tantas portas.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão da bolsa de estudos para esta pesquisa.

Aos amigos Bia, Lia, Lúcia, Dal, Renata e Carol, agradeço o carinho e o apoio em todas as horas.

A todos que de alguma forma participaram desta caminhada, meus sinceros agradecimentos.

“Outras vezes oiço passar o vento,
E acho que só para ouvir passar o vento
vale a pena ter nascido”

Alberto Caeiro (Fernando Pessoa),
em Poemas Inconjuntos, 1915

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	19
1 INTRODUÇÃO	21
1.1 Objetivos	22
1.1.1 Objetivos gerais	22
1.1.2 Objetivos específicos	22
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 O clima e os ventos	25
2.1.1 Os ventos e os fatores climáticos globais	25
2.1.2 Os ventos no microclima	27
2.2 Aspectos bioclimáticos	32
2.2.1 Os ventos e o conforto ambiental	32
2.2.2 Conforto térmico em espaços abertos	35
2.2.3 O papel dos ventos e da vegetação no conforto térmico	43
2.3 Barreiras vegetais	49
2.3.1 Características das barreiras vegetais	49
2.3.2 Configurações pré-estabelecidas para o controle dos ventos	50
2.3.3 O LAI e as barreiras vegetais	62
3 MATERIAL E MÉTODOS	65
3.1 Área de estudo	65
3.1.1 Caracterização geográfica e climática local	65
3.1.2 Caracterização física do espaço estudado	67
3.2 Pontos de medição	68
3.2.1 Escolha e descrição das amostras	69
3.2.2 Localização das barreiras e dos pontos de medição	71
3.3 Coleta de dados	72
3.3.1 Medições das variáveis microclimáticas	72
3.3.2 Equipamentos utilizados	72
3.3.3. Condições de medição e configuração das barreiras	72
3.3.4 Medição do LAI	77

3.3.5 Dados da Estação Meteorológica da ESALQ	77
3.3.6 Dados extras	78
3.4 Simulação computacional	78
3.4.1 O modelo ENVI-met®	78
3.4.2 Dados de entrada no programa ENVI-met®	79
3.4.3 Modelagem da área	82
3.5 Análise estatística dos dados	82
3.5.1 Critérios e considerações	82
3.6. Análises comparativas	82
3.7 Análise pelos parâmetros de conforto térmico	82
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	83
4.1 LAI medidos	83
4.2 Análise dos resultados – Ventos	83
4.3. Análise dos resultados – Ventos x Temperatura do ar	89
4.4 Análise dos resultados – Comparativo com registros da ESALQ: Ventos, Temperatura e Umidade do ar	93
4.4.1 Ventos	93
4.4.2 Temperatura do ar	94
4.4.3 Umidade relativa do ar	95
4.5 Simulações no ENVI-met® - Dados de saída	96
4.6 Análise comparativa entre os dados medidos e os simulados	101
4.7. Análise dos resultados – Conforto térmico	104
4.7.1. Carta Bioclimática (Figura 7)	104
4.7.2. Nomograma de Temperatura Efetiva (Figura 8)	105
4.7.3. Diagrama de Conforto para indivíduos em movimento (Figura 9)	107
4.8 Relação entre LAI e barreiras arbóreas	108
4.9 Outras considerações	109
5 CONCLUSÕES	111
REFERÊNCIAS	113
APÊNDICES	119
ANEXOS	125

RESUMO

Áreas verdes e conforto térmico: o papel da vegetação no controle dos ventos

Entender o clima dos espaços urbanos em suas diversas conformações é objeto de grande interesse para a melhoria da qualidade de vida da população que usufrui desses espaços. Cada microclima requer intervenções específicas para a obtenção de condições favoráveis de conforto higrotérmico tendo em vista a saúde e o bem estar de seus usuários. O objetivo desta pesquisa foi avaliar elementos de vegetação como barreira aos ventos visando o conforto térmico em espaços abertos. O procedimento utilizado foi quantificar a interferência de elementos vegetais na passagem dos ventos, na altura dos pedestres, a partir de configurações de vegetação pré-estabelecidas. O cenário eleito para este estudo foi a área externa do Campus da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), localizado no bairro Taquaral em Piracicaba, SP. Embora trate-se de clima predominantemente quente, há relatos de desconforto no local em dias frios decorrente do excesso de ventos. Foram estudadas três diferentes espécies dispostas em arranjos com intenção de barreira aos ventos: *Jasminum mesnyi* Hance, *Pseudosasa japonica* (Steud.) Makino e *Pinus caribaea* Morelet. As variáveis microclimáticas medidas foram temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, em três posições distintas por espécie: em um campo aberto próximo, antes e depois da barreira. O período de coleta de dados foi das 9 às 21 horas, em intervalos de 3 minutos, durante três dias por espécie, nos meses de agosto e setembro de 2014. Os resultados obtidos no campo aberto foram comparados aos registrados na estação meteorológica da ESALQ-USP no mesmo período. Foi feita a medição do LAI (Índice de Área Foliar) das espécies. Foram realizadas simulações computacionais em modelagem da área no programa ENVI-met® 3.1, com os dados de Densidade de Área Foliar (LAD) estimados a partir dos valores de LAI obtidos nas medições, como parte dos estudos de viabilidade para adoção do LAI como parâmetro na previsão de resultados, o que permitiria sua aplicabilidade a outras espécies. Os resultados obtidos indicam uma tendência favorável a este princípio, porém estudos com maior intensidade amostral são necessários para obtenção desta correlação. Outras aplicações podem ser beneficiadas com esta linha de estudo, como a previsão do risco de queda de árvores.

Palavras-chave: Silvicultura urbana; Clima urbano; Conforto térmico; Barreira aos ventos; LAI; ENVI-met®

ABSTRACT

Green areas and thermal comfort: the role of vegetation in control of winds

Understanding the climate of urban spaces in their various conformations is subject of great interest to improve the quality of life of the population that occupies these spaces. Each microclimate requires specific interventions to obtain favorable terms of hygrothermal comfort owing to health and welfare of its members. The objective of this research was to evaluate plant matter as a barrier to winds targeting the thermal comfort in open spaces. The procedure was quantifying the interference of tree elements in the passage of winds, at a pedestrian level, from pre-established vegetation settings. The chosen scenario for this study was the campus of the Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), located in the Taquaral neighborhood in Piracicaba, SP. While dealing is predominantly warm weather, discomfort is reported in cold weather due to the excessive winds in the external areas. We studied three different species placed in arrangements intended as wind barriers: *Jasminum mesnyi* Hance, *Pseudosasa japonica* (Steud.) Makino and *Pinus caribaea* Morelet. Microclimate variables measured were air temperature, relative humidity and wind speed, in three different positions by species: in a nearby open field, before and after the barrier. The data collection period was from 9 to 21 o'clock, at 3-minute intervals for three days by species, in August and September 2014. Results obtained in open field were compared with those recorded at ESALQ-USP's weather station during the same period. The LAI (Leaf Area Index) of the species was measured. Computer simulations were performed by modeling the area in ENVI-met® 3.1 program, with the Leaf Area Density data (LAD) estimated from the LAI values obtained in measurements, as part of feasibility studies for the adoption of LAI as a parameter in the forecast results, allowing its applicability to other species. The results indicate a positive trend towards this principle, however, studies with larger sample intensity are required in order to achieve this correlation. Other applications may benefit from this line of study, such as the prediction of falling trees risks.

Keywords: Urban forestry; Urban climate; Thermal comfort; Windbreaks; LAI; ENVI-met®

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Diagrama global de ventos	26
Figura 2 –	Correntes superficiais eólicas dos oceanos	27
Figura 3 –	Gradientes da velocidade do vento	29
Figura 4 –	Representação esquemática da atmosfera urbana	30
Figura 5 –	Balanço energético de uma pessoa	35
Figura 6 –	Relação idealizada ao longo de um dia entre a temperatura do ar (curva superior) e a radiação à superfície (curva inferior)	36
Figura 7 –	Carta Bioclimática	37
Figura 8 –	Nomograma de Temperatura Efetiva para pessoas normalmente vestidas, em trabalho leve	38
Figura 9 –	Condições de conforto térmico de indivíduos em movimento .	40
Figura 10 –	Temperaturas do ar medidas em uma noite de verão em Washington, DC ao longo de um transecto a partir de área residencial, no distrito de negócios e em parques gramados centrais	45
Figura 11 –	Representação da variação da temperatura do ar da área rural para a área urbana	45
Figura 12 –	Infiltração e escoamento superficial em resposta a 100 mm de precipitação por mais de 24 horas para floresta, pasto, áreas residenciais e áreas comerciais	48
Figura 13 –	Tipos de barreiras de árvores	51
Figura 14 –	Experimentos em túnel de vento para obtenção dos fluxos de ar em torno de 4 tipos de barreira de mesma altura diferenciadas pela forma	53
Figura 15 –	Distribuição das velocidades do vento no entorno de uma barreira de média densidade	54
Figura 16 –	Redução da velocidade do vento em torno de barreiras com diferentes densidades	55
Figura 17 –	Perfis horizontais de velocidades do vento normalizadas à altura $z = 0,1 H$ para vários ângulos de incidência em um quebra-ventos de espessura $w = 0,5 H$ e porosidade 75%	57

Figura 18 –	Perfis horizontais de velocidades do vento normalizadas à altura $z = 0,1 H$ para vários ângulos de incidência em um quebra-ventos de espessura $w = 0,5 H$ e porosidade 43%	57
Figura 19 –	Efeito das árvores como barreira aos ventos	59
Figura 20 –	Limites aerodinâmicos e zonas de fluxo dos ventos em uma barreira sólida típica perpendicular ao fluxo	60
Figura 21 –	Padrões esperados de fluxo de ventos para arranjo típico de árvores	61
Figura 22 –	Estudos tridimensionais das barreiras e checagem das limitações de desempenho	61
Figura 23 –	Situação da área de estudo: (A) a localização do Estado de São Paulo no Brasil; (B) a cidade de Piracicaba no centro-leste do Estado de São Paulo; (C) o perímetro urbano com localização da área de estudo	65
Figura 24 –	Caracterização topográfica da área de estudo	66
Figura 25 –	UNIMEP Campus Taquaral e entorno: (a) em destaque e (b) foto do local	68
Figura 26 –	Sítios de coleta de dados: UNIMEP Taquaral e ESALQ	68
Figura 27 –	UNIMEP Taquaral (a) em 13 jun. 2007 antes da remodelação do Campus e (b) em 16 abril 2015 após a remodelação	69
Figura 28 –	Pinus em volta da Quadra de Esportes: (a) foto externa em 29 maio 2012 e (b) foto interna em 23 jul. 2014	70
Figura 29 –	Jasmim ao lado do Bloco 7	70
Figura 30 –	Bambu no Bloco de Educação Física	71
Figura 31 –	UNIMEP Taquaral – Pontos de medição: (A) Jasmim, (B) Bambu e (C) Pinus, sendo 3 pontos por vegetação: (1) em campo aberto, (2) antes da barreira e (3) após a barreira	71
Figura 32 –	JASMIM: Configuração da barreira	73
Figura 33 –	JASMIM: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Ponto 2 (antes da barreira)	73
Figura 34 –	JASMIM: (a) Ponto 3 (após a barreira) e (b) Detalhe da espécie	73
Figura 35 –	BAMBU: Configuração da barreira	74
Figura 36 –	BAMBU: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Passagem do	

	Ponto 1 para o Ponto 2	74
Figura 37 –	BAMBU: (a) Ponto 2 (antes da barreira) e (b) Ponto 3 (após a barreira)	75
Figura 38 –	BAMBU: (a) Pontos 2 e 3 e (b) Área entre o Bambu e o Pinus	75
Figura 39 –	PINUS: Configuração da barreira	76
Figura 40 –	PINUS: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Ponto 3 (após a barreira)	76
Figura 41 –	PINUS: (a) Ponto 2 (antes da barreira) e (b) Ponto 3 (após a barreira)	76
Figura 42 –	O equipamento <i>LAI-2000 Canopy Analyzer</i>	77
Figura 43 –	Distribuição estimada dos valores de LAD a partir dos LAI medidos em cada vegetação	81
Figura 44 –	Valores de LAI resultantes	83
Figura 45 –	Intensidades do vento por vegetação	86
Figura 46 –	Intensidades do vento por vegetação e por ponto medido	87
Figura 47 –	Ventos – JASMIM Pontos 1 a 3 – Dias 06, 07 e 08 ago. 2014	87
Figura 48 –	Ventos – BAMBU Pontos 1 a 3 – Dias 09, 11 e 15 ago. 2014.	88
Figura 49 –	Ventos – PINUS Pontos 1 a 3 – Dias 06, 08 e 09 set. 2014 ...	88
Figura 50 –	Ventos – JASMIM Pontos 2 e 3 - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014.	88
Figura 51 –	Ventos – BAMBU Pontos 2 e 3 - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014	89
Figura 52 –	Ventos – PINUS Pontos 2 e 3 - Dias 06, 08 e 09 set. 2014	89
Figura 53 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 1	90
Figura 54 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 2	90
Figura 55 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 3	90
Figura 56 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 1	91
Figura 57 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 2	91
Figura 58 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 3	91
Figura 59 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 1	92
Figura 60 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 2	92
Figura 61 –	Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 3	92
Figura 62 –	Ventos UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014	93
Figura 63 –	Ventos UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU - Dias 09, 11 e 15	

	ago. 2014	93
Figura 64 –	Ventos UNIMEP x ESALQ – Série PINUS - Dias 06, 08 e 09 set. 2014	93
Figura 65 –	Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014	94
Figura 66 –	Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014	94
Figura 67 –	Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série PINUS	95
Figura 68 –	Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM ...	95
Figura 69 –	Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU ...	96
Figura 70 –	Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série PINUS	96
Figura 71 –	Simulação – Ventos SE (158°) – 09/08/2014 às 9h00	97
Figura 72 –	Simulação – Ventos SE (158°) – 09/08/2014 às 21h00	98
Figura 73 –	Simulação – Ventos E (90°) – 09/08/2014 às 9h00	99
Figura 74 –	Simulação – Ventos E (90°) – 09/08/2014 às 21h00	100
Figura 75 –	Vento simulado – JASMIM	101
Figura 76 –	Vento simulado – BAMBU	101
Figura 77 –	Vento simulado – PINUS	102
Figura 78 –	Vento medido (MED) x simulado (SIM) – 08 ago. 2014	103
Figura 79 –	Vento medido (MED) x simulado (SIM) – 09 ago. 2014	103
Figura 80 –	Carta Bioclimática – JASMIM	104
Figura 81 –	Carta Bioclimática – BAMBU	104
Figura 82 –	Carta Bioclimática – PINUS	105
Figura 83 –	Nomograma de Temperatura Efetiva – JASMIM	105
Figura 84 –	Nomograma de Temperatura Efetiva – BAMBU	106
Figura 85 –	Nomograma de Temperatura Efetiva – PINUS	106
Figura 86 –	Diagrama de Conforto – JASMIM	107
Figura 87 –	Diagrama de Conforto – BAMBU	107
Figura 88 –	Diagrama de Conforto – PINUS	108
Figura 89 –	Gráfico de Tendência – LAI x % de atenuação dos ventos	109
Figura 90 –	Rajadas de vento – Ponto C1 (Pinus – campo aberto)	110
Figura 91 –	Rajadas de vento – Ponto C2 (Pinus – antes da barreira)	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Rugosidades típicas para diferentes terrenos	29
Tabela 2 –	Síntese de limitações e potencialidades do vento em meio urbano	33
Tabela 3 –	Escala de Beaufort e a descrição do vento correspondente (colunas I e II), relacionados aos limites de velocidade e seus efeitos sobre as pessoas (colunas III e IV)	34
Tabela 4 –	Critérios de conforto .relacionados ao vento e a relação entre a escala de Beaufort e a velocidade do ar em (m/s), para velocidades médias (alturas 2 m e 10 m) e para rajadas (altura 2 m)	39
Tabela 5 –	Dados de entrada nas simulações do modelo ENVI-met®	80
Tabela 6 –	Valores de LAI resultantes a partir de 3 medições por espécie, com 10 repetições por medição	83
Tabela 7 –	Resultados – BAMBU	84
Tabela 8 –	Resultados – JASMIM	85
Tabela 9 –	Resultados – PINUS	85
Tabela 10 –	Ventos resultantes entre os Pontos 2 e 3 x LAI por vegetação	108

1 INTRODUÇÃO

É quase um lugar comum afirmar que existe uma interação bem clara entre o vento e o espaço urbano construído. É também evidente que o desenvolvimento, particularmente importante nas últimas décadas, das nossas cidades, que crescem não só em termos de área ocupada mas também em altura, veio introduzir alterações profundas em algumas das ideias clássicas que permitiam exprimir e avaliar o equilíbrio entre o Homem e o Ambiente Construído (SARAIVA, 1994, p. 23).

Os movimentos do ar podem ser divididos nas categorias de Vento e Brisa. Os ventos que ocorrem em períodos frios podem ser interceptados, enquanto pode-se utilizar o efeito refrescante das brisas em períodos quentes (OLGYAY, 1963).

Os estudos de conforto térmico que envolvem a avaliação e a quantificação dos ventos são complexos diante da variabilidade instantânea que apresentam, porém alguns parâmetros podem ser estabelecidos. A maior parte das pesquisas já realizadas relativas a ventos em áreas externas são empíricas.

Pesquisas recentes adotam modelos computacionais com diferentes objetivos. No estudo do clima urbano, muitos pesquisadores utilizam-se de modelos para simular as condições climáticas de uma determinada localidade, em diferentes escalas. Esses instrumentos são de grande importância porque permitem uma quantificação precisa dos resultados, inclusive em simulações de possibilidades futuras, o que traz o benefício de escolha da melhor solução de intervenção nos espaços por planejadores e urbanistas.

Há diversos estudos em espaços abertos para avaliar as condições de verão e suas alternativas para amenizar as altas temperaturas resultantes. Embora a predominância deste enfoque seja altamente justificada, há casos de desconforto térmico nos dias frios.

O presente estudo utilizou como cenário a área externa do Campus Taquaral da Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP), situado na cidade de Piracicaba SP, para as medições de campo. Trata-se de uma área extensa, distante do aglomerado urbano, com utilização intensa e diuturna por estudantes, professores, funcionários e demais frequentadores, com relatos de desconforto decorrente de excesso de ventos no inverno, embora a região apresente condições climáticas onde altas temperaturas ocorrem em quase todo o ano. O campus mostra-se interessante para pesquisas específicas sobre o comportamento da vegetação diante dos ventos

por conter arranjos arbustivo-arbóreos implantados para funcionar como barreira nos dias frios.

Foi considerada a utilização do Índice de Área Foliar (LAI) e da Densidade de Área Foliar (LAD) como parâmetros de referência para os elementos arbóreos que compõem as barreiras aos ventos, visando permitir a reprodução do experimento com outras espécies dentro das condições de desempenho estabelecidas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo foi avaliar o comportamento de elementos vegetais como barreira aos ventos.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos foram:

- quantificar a interferência de elementos arbóreos na passagem dos ventos, na altura dos pedestres, a partir de configurações e características de vegetação pré-estabelecidas;
- comparar os resultados obtidos em diferentes configurações e composições vegetais;
- explorar a hipótese de que arranjos de vegetação projetados com determinadas características e configurações são elementos eficientes para o controle dos ventos em espaços abertos;
- introduzir a variável LAI, facilmente mensurável, como uma medida a ser explorada nos estudos de barreiras vegetais em áreas urbanas;
- aplicar os dados obtidos em simulação computacional buscando otimização de estudos preditivos de barreiras arbustivo-arbóreas;
- contribuir para que os resultados deste trabalho sejam comparados com outros obtidos em situações semelhantes, sob o enfoque de conforto ambiental e planejamento urbano;

- buscar resultados úteis para a silvicultura urbana incrementando dados do comportamento físico das árvores perante os ventos, para estudos desta influência na manutenção, ciclo de vida e risco de queda de determinadas espécies arbóreas;
- servir de embasamento para estudos futuros de predição e simulação de casos sobre o tema, onde há ainda muitas frentes a serem exploradas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O clima e os ventos

Os fenômenos que caracterizam a Atmosfera abrangem escalas de tempo e espaço muito amplas (OKE,1987). Embora trate-se de eventos contínuos, há um consenso razoável na divisão em escalas para estudo considerando-se os seguintes limites:

- Microescala: de 10^{-2} a 10^3 m
- Escala local: de 10^2 a 5×10^4 m
- Mesoescala: 10^4 a 2×10^5 m
- Macroescala: 10^5 a 10^8 m

Quanto à escala vertical, ainda segundo Oke (1987), nos estudos de interação entre a atmosfera e a superfície terrestre, a influência efetiva da superfície concentra-se nos 10 Km inferiores da atmosfera em uma camada denominada troposfera.

2.1.1 Os ventos e os fatores climáticos globais

Os ventos originam-se das diferenças de pressão na superfície terrestre que estão associadas às diferenças de aquecimento entre as diferentes zonas do globo, tratando-se de um processo de redistribuição da energia solar pelos movimentos atmosféricos, segundo Saraiva (1994).

Para Bonan (2002), os ventos são o equilíbrio de três forças agindo simultaneamente: a força do gradiente de pressão, a força de Coriolis e as forças de atrito na superfície terrestre. O gradiente de pressão é a principal causa do movimento do ar. Se a força do gradiente de pressão fosse a única força que atuasse sobre o ar, os ventos sempre soprariam diretamente de alta para baixa pressão. No entanto, a força de Coriolis desvia o ar que se move.

Ainda segundo Bonan (2002), a força de Coriolis é o movimento causado pela rotação da Terra, que empurra os ventos para a direita de seu caminho pretendido no hemisfério norte e para a esquerda no hemisfério sul; é maior para ventos fortes do que para ventos fracos; é zero ao longo do equador e maior nos polos. O efeito produzido é um vento que sopra no sentido oposto ao da rotação

terrestre (KOENIGSBERGER, 1977). O vento resulta das forças térmicas e da força de Coriolis: ventos de noroeste acima do Equador, e ventos de sudeste abaixo do Equador, conhecidos como Alísios de noroeste e sudeste (Figura 1).

Figura 1 – Diagrama global de ventos
Fonte: Frota (2001) a partir de Koenigsberger (1977)

Conforme Prata (2005), de uma maneira geral existem três tipos de correntes atmosféricas: os Ventos Alísios (fracos, entre latitudes 30°N e 30°S), os Ventos Oestes (rápidos, entre latitudes 30° e 60° , nos dois hemisférios) e os Ventos Polares (tempestuosos, nas latitudes de 60° até os polos Norte e Sul). No Brasil predominam os Ventos Alísios de sentido sudeste.

A área onde se juntam os ventos do norte e do sul formando a Frente Tropical recebe o nome de Zona de Convergência Intertropical, onde há condições de calma completa ou de brisas muito leves e irregulares, por isso também ser chamada de Zona de Calmas Equatoriais (KOENIGSBERGER, 1977).

Figura 2 – Correntes superficiais eólicas dos oceanos
Fonte: Bonan (2002)

Bonan (2002) afirma que a circulação geral da atmosfera explica as principais zonas climáticas do mundo (Figura 2). Os hemisférios norte e sul diferem em circulação dos ventos. Esta diferença surge por causa da diferente distribuição da terra em dois hemisférios: mais de 70% de toda a terra está no Hemisfério Norte; entre as latitudes 40°N e 75°N, mais de 50% da superfície é composta por terra. No Hemisfério Sul, a área da superfície é inferior a 25%. Os continentes aquecem e arrefecem mais rapidamente do que os oceanos.

Ainda segundo Bonan (2002), a correlação entre as zonas climáticas e a biogeografia não é meramente passiva, refletindo o resultado da dinâmica clima-vegetação em que a distribuição geográfica da vegetação afeta e é afetada pelo clima. Consequentemente, mudanças naturais e induzidas pelo homem na cobertura da terra podem alterar o clima.

2.1.2 Os ventos no microclima

Os dados macroclimáticos são obtidos nas estações meteorológicas e descrevem o clima geral de uma região, dando detalhes de insolação, nebulosidade, precipitações, temperatura, umidade e ventos. Os dados mesoclimáticos, nem sempre de fácil obtenção, informam as modificações do macroclima provocadas pela topografia local como vales, montanhas, grandes massas de água, vegetação ou tipo de coberturas de terreno como, por exemplo, salitreiras. No microclima são levados em consideração os efeitos da ação humana sobre o entorno, assim como a influência que estas modificações exercem sobre a ambiência dos edifícios (MASCARÓ, 2004, p. 35).

O vento não é um fenômeno constante: varia instantaneamente de direção e intensidade. Trata-se de um dos fatores mais importantes nas condições de conforto humano em espaços abertos; no entanto seu comportamento é difícil de prever e controlar por sofrer influências de um grande número de variáveis globais, regionais e locais (NIKOLOPOULOU, 2004).

Saraiva (1994) afirma que em termos locais – em escalas que envolvem distâncias de até poucos quilômetros – o gradiente de pressão e o efeito das forças de Coriolis podem ser desprezados. Desta forma resulta essencialmente uma camada limite em que ventos fortes, com velocidades médias superiores a 3 a 4 m/s e a 10 m acima do solo, têm a causa da turbulência assumida como essencialmente mecânica.

Perto da superfície os ventos encontram árvores, edifícios, colinas e outros objetos. O aumento do atrito resultante retarda a velocidade do vento e desvia a direção do seu movimento (BONAN, 2002).

Outro fator importante é a rugosidade da superfície. Ainda segundo Bonan (2002), as superfícies ásperas geram mais turbulência e têm fluxos de calor sensível e latente maiores do que superfícies lisas, mantidos todos os demais fatores. A rugosidade superficial varia muito com o tipo de cobertura do solo. O solo nu é uma superfície lisa. Superfícies urbanas são superfícies ásperas, dependendo da densidade e altura dos edifícios. A presença de vegetação aumenta a rugosidade da superfície em relação à altura e densidade do dossel.

O tipo de solo afeta o gradiente de velocidade do vento (KOENIGSBERGER, 1977). A velocidade do vento é sempre menor próximo ao solo do que em alturas maiores; esta diferença é muito maior quando o solo é irregular do que em uma superfície contínua e lisa como a água. Em lugares montanhosos, o vento terá maior velocidade na crista das montanhas. Nos vales a velocidade do ar será mais baixa, desde que sua orientação não coincida com o sentido do vento. Grandes extensões de água podem originar brisas costeiras locais, direcionadas da água para a terra durante o dia e da terra para a água à noite (BONAN, 2002).

Figura 3 – Gradientes da velocidade do vento
 Fonte: Mascaró (2004) a partir de Koenigsberger (1977)

Oke (1987) fornece gradientes semelhantes de perfis do vento junto ao solo (Figura 3). Nikolopoulou (2004) apresenta perfis de velocidade do vento para três diferentes tipos de terreno: urbano (à altura $H = 500\text{m}$; rugosidade máxima $\alpha = 0,40$), suburbano ($H = 400\text{ m}$; $\alpha = 0,28$) e campo aberto ($H = 275\text{ m}$; $\alpha = 0,16$).

A Tabela 1 foi citada por Saraiva (1994) e reproduzida por Mascaró (2004), contendo as rugosidades típicas para diferentes tipos de terreno, obtidas a partir de medições em campo.

Tabela 1 – Rugosidades típicas para diferentes terrenos obtidas por medições em campo

CATEGORIA DE TERRENO	DESCRIÇÃO DO TERRENO	LARGURA DA RUGOSIDADE (m)
1	MAR ABERTO, TUNDRA, DESERTO, GELO.	0,001
2	CAMPO ABERTO COM VEGETAÇÃO BAIXA OU ÁRVORES ESPARSAS.	0,03
3	ÁREA SUBURBANAS, PEQUENOS POVOADOS, ÁREAS DE BOSQUES.	0,3
4	NUMEROSOS EDIFÍCIOS ALTOS, CENTROS URBANOS, ÁREAS INDUSTRIAIS DESENVOLVIDAS.	3

Fonte: Mascaró (2004)

Lopes (2007) afirma que as condições de estabilidade da Camada Limite Atmosférica (CLA) afetam seus perfis de temperatura e de velocidade dos ventos.

Uma definição útil de CLA identifica-a como sendo a camada de ar imediatamente acima da superfície da terra, cujos efeitos de atrito, aquecimento e arrefecimento são sentidos directamente à escala temporal inferior a um dia e onde os fluxos de quantidade de movimento, energia (nomeadamente calor) e massa são transportados e difundidos por movimentos turbulentos. A espessura da CLA é definida como a altura acima da superfície terrestre onde a velocidade atinge 99% da velocidade do escoamento não perturbado (LOPES, 2007, p. 20).

Oke (1987) também realizou importantes estudos relativos aos ventos locais e regionais que interferem no domo climático urbano. Os estudos consideram a microescala (10^{-2} a 10^3 m). As modificações trazidas pela cidade trazem como consequência a formação de duas subcamadas distintas, como mostra a Figura 4 (OKE, 1987, 2006; também retratado por MASCARÓ, 2004; PRATA, 2005; LOPES, 2007; ERELL, 2011).

Figura 4 – Representação esquemática da atmosfera urbana
Fonte: Oke (1987)

Para Oke (1987), quando o ar flui do campo para a cidade, encontra um conjunto novo e muito diferente de condições de contorno. Assim, de acordo com a Figura 4, uma camada limite interna desenvolve-se no sentido do vento a partir da camada limite da cidade. A camada limite urbana ou atmosfera urbana superior (*urban boundary layer*) é uma faixa em que ocorre um fenómeno de mesoescala cujas características são reguladas pela natureza da superfície urbana. Abaixo do nível do telhado é a camada de dossel urbana ou atmosfera urbana inferior (*urban canopy layer*), que é resultante de processos de microescala que ocorrem nas ruas (*canyons*), nos espaços entre os prédios. O clima resultante nesta faixa é uma mistura de cada um dos microclimas que caracterizam seus arredores imediatos.

Lombardo et al. (2003) descrevem que o processo de formação de ilhas de calor caracteriza-se pelo incremento da temperatura nos centros urbanos em relação às áreas de entorno. Uma explicação para isso é o fato de os materiais utilizados na

construção civil armazenarem calor, assim as áreas mais adensadas e menos arborizadas tendem a apresentar temperaturas mais altas mesmo durante a noite.

Ainda conforme Oke (1987), as áreas urbanas apresentam sinais claros de modificações inadequadas da paisagem e do clima e estão em contínuo processo de expansão, para acomodar o afluxo de migrantes de áreas rurais e o aumento natural da população. Isto faz o estudo de clima urbano duplamente importante; primeiro para garantir um ambiente agradável e saudável para os moradores urbanos, e segundo para buscar evitar que os efeitos da urbanização tenham repercussões prejudiciais sobre climas em grande escala (até mesmo global). O tamanho do "efeito urbano" muitas vezes torna-se difícil de estimar. O ideal seria a obtenção de um conjunto amplo de dados do clima de uma região antes da urbanização para posterior comparação com os resultados no espaço urbanizado. Como isso raramente é possível, o mais comum é comparar os dados climáticos do centro de uma área urbana com aqueles medidos nas zonas rurais ou na área suburbana circundante. Na seleção dos dados para comparação é particularmente importante tentar eliminar os efeitos devidos a outros fatores como topografia, corpos d'água e os efeitos do vento pertinentes à própria área urbana.

A medição da velocidade e direção do vento é altamente sensível a sofrer distorção por obstáculos (OKE, 2006). Obstáculos criam alterações no fluxo médio do vento e turbulência; os efeitos são sentidos em todas as escalas, incluindo os efeitos de relevo local devido a colinas, vales e falésias, mudanças bruscas de rugosidade ou na elevação da superfície, perturbação do fluxo em torno de grupos de árvores e edifícios, individuais e conjuntos. Localizações individuais experimentam velocidade e direção altamente variáveis, uma vez que a corrente de ar interage com arranjos de construção individuais, ruas, pátios e árvores.

O aquecimento diferencial da terra possibilita haver sobre as regiões mais aquecidas, ar atmosférico com menor densidade. Por sua vez, regiões mais frias, possuem sobre si, ar atmosférico mais denso. Essas diferenças da densidade ocasionam um caminhar do ar mais denso, em direção ao menos denso. A força resultante da necessidade do equilíbrio das diferentes densidades do ar atmosférico, estabelece variações na pressão atmosférica, propiciando o aparecimento de gradientes de pressão de características horizontais.

Esse gradiente de pressão estabelece o aparecimento de uma quantidade de movimento (Momentum) na massa de ar. Essa quantidade de movimento, tanto é maior, quanto maior for o gradiente de pressão. O momentum da massa de ar é o vento. O vento tem portanto, a característica de se transferir parcialmente a todo obstáculo que se lhe oferece (OMETTO, 1981, p. 227).

O tipo de cobertura do solo, especialmente o tipo de vegetação, também afeta os climas locais e regionais devido à variação no albedo, água no solo, rugosidade da superfície, fisiologia vegetal, a quantidade de área foliar a partir do qual o calor pode ser trocado e profundidade de enraizamento (BONAN, 2002). Altos valores de albedo resultam em menos radiação solar absorvida na superfície e uma superfície mais fria; albedos baixos resultam em maior absorção da radiação solar e uma superfície mais quente. Albedos variam de cerca de 0,80 a 0,95 para a neve fresca para tão pouco quanto 0,03 a 0,10 para água. Superfícies urbanas têm baixos albedos e portanto maior absorção da radiação solar. O albedo do solo diminui com a umidade devido à radiação ser retida por reflexão interna.

A vegetação possui albedos baixos, tipicamente variando de 0,05 a 0,25, com florestas que absorvem mais radiação solar do que pastagens ou lavouras. Ainda segundo Bonan (2002), o albedo global da superfície é o reflexo combinado de todos os materiais vegetais (folhas e caules) e do solo.

2.2 Aspectos bioclimáticos

2.2.1 Os ventos e o conforto ambiental

Para Saraiva (1994), a questão do conforto ambiental de um indivíduo em um ambiente urbano externo apresenta três componentes distintas quanto à ação direta dos ventos: comodidade e segurança, qualidade do ar ambiente e conforto térmico.

Um dos fatores que mais influenciam nas condições de conforto dos pedestres em espaços abertos é o vento (NIKOLOPOULOU, 2004). Dependendo das condições climáticas, uma determinada intensidade de vento pode ser considerada desejável ou indesejável. O conhecimento do regime de ventos permite aproveitar suas vantagens e defender-se de seus efeitos desfavoráveis, segundo Rivero (1986).

Mascaró (2004) afirma que a ação dos ventos é sentida pelas pessoas como força e como velocidade porque aumenta a taxa de trocas térmicas com o exterior.

Lopes (2007) apresenta um resumo das principais vantagens e inconveniências ambientais provocadas pelo vento em meio urbano, conforme segue (Tabela 2):

Tabela 2 – Síntese de limitações e potencialidades do vento em meio urbano

INCONVENIENTES AMBIENTAIS DO PONTO DE VISTA DO CONFORTO TÉRMICO, MECÂNICO, SEGURANÇA E COMPORTAMENTO DOS INDIVÍDUOS	VANTAGENS AMBIENTAIS DO VENTO DO PONTO DE VISTA DO CONFORTO TÉRMICO E DA SAÚDE
Arrefecimento do ar no inverno (<i>windchill</i>)	Dispersão de poluentes, eventualmente para locais menos densamente povoados
O vento forte pode ser inconveniente para certas atividades de lazer ao ar livre, podendo inviabilizar a permanência de pessoas em certos locais	Regulação dos padrões térmicos desfavoráveis diminuindo, por exemplo, a ocorrência das vagas de calor extremo
Vento efetivo muito forte (superior a 9 m/s) pode afetar a locomoção dos indivíduos	Melhoria dos fatores ambientais que condicionam a saúde e o conforto humano, sobretudo em indivíduos fisicamente mais debilitados (idosos e crianças)
Vento com rajadas superiores a 20 m/s pode ser perigoso para indivíduos mais debilitados, ou pode haver perigo de queda e consequente choque de vários elementos (chaminés, telhas, etc.), contra os indivíduos	
Fator de ansiedade	

Fonte: Lopes (2007)

Para Saraiva (1994), a questão da comodidade e segurança envolve limites de velocidade dos ventos. Penwarden (1973) avalia os efeitos dos ventos em pessoas, estabelecendo limites de velocidade aceitáveis nas cidades, definidos com base na Escala de Beaufort (Tabela 3). Criada por Admiral Sir Francis Beaufort em 1806 para uso no mar, esta escala foi revisada para previsões em terra e é utilizada até hoje. Segundo Prata (2005), não se trata diretamente de uma escala de velocidades, mas de uma escala linear de forças do vento (pressões dinâmicas do escoamento médio).

O incremento trazido por Penwarden (1975) define a escala de tempo envolvida nos limites, uma vez que a escala de Beaufort não é explícita nesta questão. A análise dos efeitos mecânicos indica que ventos com velocidade média de 5 m/s representam o início do desconforto, acima de 10 m/s são desconfortáveis e acima de 20 m/s podem ser perigosos. Estas referências também são citadas por Saraiva (1994) a partir de informações em campo, informando que como base tomou-se a velocidade média em 10 minutos, a 2 m do chão.

A Escala de Beaufort é apresentada por vários autores (PENWARDEN, 1975; KOENIGSBERGER, 1977; SARAIVA, 1994; MASCARÓ, 2004; PRATA, 2005) (ver Tabela 3).

Tabela 3 – Escala de Beaufort e a descrição do vento correspondente (colunas I e II), relacionados aos limites de velocidade e seus efeitos sobre as pessoas (colunas III e IV)

I	II	III	IV
BEAUFORT NÚMERO	DESCRIÇÃO DO VENTO	VELOCIDADE (m/seg)	DESCRIÇÃO DOS EFEITOS DOS VENTOS
0	calmo	menor que 0,4	vento não perceptível.
1	ventos leves	de 0,4 a 1,5	vento não perceptível.
2	brisa leve	de 1,6 a 3,3	vento sentido no rosto.
3	brisa suave	de 3,4 a 5,4	ventos que levemente estendem as bandeiras/ cabelos desarrumados/roupas balançando.
4	brisa moderada	de 5,5 a 7,9	ventos levantando poeira/solo seco/papéis soltos/ cabelos desordenados.
5	brisa fresca	de 8,0 a 10,7	força dos ventos sentidos no corpo/ neve acumulada surgida pelo vento/ limite do vento agradável sobre a terra.
6	brisa forte	de 10,8 a 13,8	uso de sombrinhas com dificuldade/cabelos golpeados imediatamente/dificuldade de caminhar com firmeza/ventos ruidosos, desagradável no ouvido/ ventos nascidos da neve em torno da altura da cabeça.
7	ventania moderada	de 13,9 a 17,1	sentida de maneira inconveniente, quando caminhando.
8	ventania fresca	de 17,2 a 20,7	geralmente impede de progredir/ grande dificuldade com balanço das rajadas.
9	ventania forte	de 20,8 a 24,4	pessoas golpeadas por cima pelas rajadas.

Fonte: Mascaró (2004) a partir de Penwarden (1975)

Blocken et al. (2012) elaboraram estudos a respeito de conforto e segurança para pedestres em relação aos ventos, com base nas melhores práticas desenvolvidas nas últimas décadas. Como resultado apresentam um roteiro geral para simulações em *Computational Fluid Dynamics* (CFD), visando orientar estudos futuros e contribuir para a melhoria na qualidade do meio ambiente em áreas urbanas. Estes estudos envolvem a combinação de dados estatísticos e informações meteorológicas e aerodinâmicas, associados a critérios de conforto e segurança. Também esclarecem que o uso de CFD nestes estudos oferece vantagens consideráveis em relação ao teste em túnel de vento, no entanto o rigor e a confiabilidade das simulações em CFD podem ser facilmente comprometidos; no geral é observada uma correspondência entre simulações e medições, embora localmente desvios significativos estejam presentes. Neste estudo não foram levados em conta os efeitos da vegetação.

2.2.2 Conforto térmico em espaços abertos

Considerando-se que a qualidade dos espaços abertos contribui para a qualidade da vida urbana, conhecer as relações entre variáveis microclimáticas urbanas e as implicações de conforto térmico nos espaços abertos apresenta-se como de suma importância.

O conhecimento dessas relações fornece instrumental para planejamento e projetos de grande escala, possibilitando melhor acomodação das pessoas nos espaços urbanos. Possibilita ainda o desenvolvimento de atividades econômico-culturais específicas, em áreas abertas ou semi-confinadas, como eventos esportivos, espetáculos artísticos, grandes exposições e atividades turísticas (MONTEIRO L., 2008, p. 29).

As fontes de energia radiante estão representadas na Figura 5 para uma pessoa de pé ao lado de uma parede. Neste caso, a radiação direta é recebida com base no ângulo do Sol acima do horizonte. A radiação difusa é recebida em todas as direções a partir de radiação solar refletida pelo céu, pela terra circundante e pela parede. Da mesma forma, o céu, o chão e a parede emitem radiação de onda longa que é absorvida pela pessoa. A radiação solar incidente em uma determinada localidade varia com a época do ano, a hora do dia, nebulosidade e poluição atmosférica. Um valor típico de verão ao meio-dia para céu limpo e seco em latitudes tropicais é da ordem de 1000 W/m^2 . Com céu nublado ou quando na sombra (de modo que a radiação direta é bloqueada), este valor pode ser bem menor, da ordem de 100 W/m^2 . Em dias nublados toda a radiação é difusa. Durante a noite, a radiação de onda longa é a única fonte de energia radiante para a superfície (BONAN, 2002).

Figura 5 – Balanço energético de uma pessoa
Fonte: Bonan (2002)

Ainda na Figura 5, um objeto tem cinco meios para dissipar a energia radiante que incide sobre ele: uma parte da radiação solar incidente é refletida para longe do objeto e a restante é absorvida. Parte do calor é transferida por contato direto com outro objeto (condução). O movimento de ar transporta o calor para fora a partir do objeto (convecção de calor sensível); também ocorre a troca de calor latente na qual o calor é dissipado por uma mudança de estado físico da água (no caso, da forma líquida para a gasosa). A radiação que incide sobre uma superfície ou objeto deve ser equilibrada pela energia irradiada de volta para a atmosfera, pela energia perdida ou ganha por calor sensível e latente, e pelo armazenamento de calor.

Figura 6 – Relação idealizada ao longo de um dia entre a temperatura do ar (curva superior) e a radiação à superfície (curva inferior)

Fonte: Bonan (2002)

O ciclo diurno de fluxos de energia na superfície confere um ciclo diurno de temperatura do ar (Figura 6). Como esclarece Bonan (2002), a intensidade do Sol aumenta durante o dia, quando a radiação solar incidente é maior que a perda líquida de radiação de ondas longas da superfície. Neste ponto, há um ganho líquido de radiação sob a forma de calor e o chão começa a aquecer. O ar em contato com o solo é aquecido por condução. Este aquecimento é maior perto da superfície porque o ar é um mau condutor de calor. A turbulência leva o calor para a atmosfera a partir da superfície. Como resultado, a temperatura do ar também começa a aumentar. Ao meio-dia local, o Sol está em seu ponto mais alto no céu (é o caso da cidade de São Paulo no solstício de verão, em 22 de dezembro), e desde que não haja nuvens, o solo recebe a radiação mais intensa do dia. Quando o Sol se torna

mais baixo no céu a radiação solar diminui; porém enquanto a radiação solar incidente exceder a perda líquida de radiação de onda longa, a energia excedente aquece o ar. Isso cria uma defasagem de tempo entre a radiação solar máxima e a maior temperatura do ar. Sob céu limpo, a temperatura máxima geralmente ocorre no final da tarde, entre 15 e 17 horas. Quando a tarde está com céu nublado ou uma frente fria passa, as temperaturas mais quentes podem ocorrer no início do dia. Quando a radiação de onda longa ultrapassa a radiação solar direta, a temperatura diminui. Este arrefecimento continua durante a noite porque nenhuma energia é obtida a partir do Sol, mas a energia é perdida através de radiação de onda longa. Temperaturas mais baixas costumam ocorrer pouco antes do nascer do sol.

Segundo Frota (2001), a manutenção da temperatura do corpo humano relativamente constante em ambientes cujas condições termo-higrométricas são variadas é feita por meio de seu aparelho termorregulador, que comanda a redução dos ganhos ou o aumento das perdas de calor através de alguns mecanismos de controle. Embora isso ocorra de forma natural, a termorregulação representa um esforço extra ao organismo que gera uma queda na potencialidade de trabalho. “O organismo humano experimenta sensação de conforto térmico quando perde para o ambiente, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, o calor produzido pelo metabolismo compatível com sua atividade.” (FROTA, 2001, p. 20).

Figura 7 – Carta Bioclimática
Fonte: Rivero (1986) a partir de Olgyay (1963)

A Carta Bioclimática de Olgyay (Figura 7) é um índice biofísico; foi desenvolvida a partir de estudos dos efeitos do clima sobre o homem, quer ele esteja abrigado ou não (FROTA, 2001). As zonas de conforto de verão e de inverno aparecem separadas, mas dentro delas distingue-se a zona de conforto ótimo para valores de umidade relativa entre 30 e 65%; as partes restantes indicam faixas com situações aceitáveis. Pode-se considerar que a temperatura do ar é igual à temperatura média radiante. “As linhas de velocidade do ar desenhadas na parte superior indicam os limites até os quais pode deslocar-se a área de conforto de verão à medida que aumenta a ventilação.” (RIVERO, 1986, p. 66).

No uso da Carta Bioclimática, se o ponto determinado pelas condições de temperatura e umidade do ar resultar acima da zona de conforto, deve-se aumentar a velocidade do ar. Se resultar abaixo deve-se aquecer o ambiente, pela radiação solar ou artificialmente. Se a temperatura do ar é elevada mas a umidade é baixa, o movimento do ar pouco favorece, completa Frota (2001).

Outro instrumento para verificação das condições de conforto térmico humano é o Nomograma de Temperatura Efetiva (Figura 8).

Figura 8 – Nomograma de Temperatura Efetiva para pessoas normalmente vestidas, em trabalho leve
Fonte: Frota (2001)

A Temperatura Efetiva, de Yaglow e Houghten, de 1923, foi definida pela correlação entre as sensações de conforto e as condições de temperatura, umidade e velocidade do ar, procurando concluir quais são as condições de conforto térmico. É um índice subjetivo. Essas correlações são apresentadas sob a forma de nomograma. Em 1932, Vernon e Warner apresentaram uma proposta de correção para o índice de Temperatura Efetiva, utilizando a temperatura do termômetro de globo em vez de temperatura seca do ar, para base dos cálculos, posto que a temperatura de radiação, sendo superior ou inferior à temperatura seca do ar, proporciona alterações na sensação de conforto. Observam-se indicações das duas escalas no nomograma do Anexo 3. A zona de conforto térmico delimitada sobre o nomograma de Temperatura Efetiva para pessoas normalmente vestidas, em trabalho leve e se referindo a habitantes de regiões de climas quentes, foi adaptada por Koenigsberger *et alii* (FROTA, 2001, p. 27).

Na Tabela 4, Prata (2005) apresenta a tabela traduzida de Saraiva (1994) com critérios de conforto relacionados ao vento, bem como a relação entre a escala de Beaufort e a velocidade do ar em (m/s).

Tabela 4 – Critérios de conforto relacionados ao vento e a relação entre a escala de Beaufort e a velocidade do ar em (m/s), para velocidades médias (alturas 2m e 10m) e para rajadas (altura 2 m)

CRITÉRIO PRELIMINAR DE CONFORTO RELACIONADO AO VENTO								
UNIDADE: Escala de Beaufort; Temperaturas > 10°C								
		CONFORTO RELATIVO						
ATIVIDADE	ÁREAS PARA APLICAÇÃO	PERCEPTÍVEL	TOLERÁVEL	DESAGRA-DÁVEL	PERIGOSO			
1. andando rápido	Calçada	5	6	7	8			
2. caminhando, andando de skate	Parques, entradas, pistas de skate	4	5	6	8			
3. em pé, sentado por período curto	Parques, áreas de praça	3	4	5	8			
4. em pé, sentado por período longo	Restaurantes ao ar livre, teatros	2	3	4	8			
Critérios representativos para aceitabilidade			< uma vez / semana	< uma vez / mês	< uma vez / ano			
A temperaturas mais baixas pode-se esperar que o nível relativo de conforto se reduza por um número de Beaufort para cada redução de 20°C na temperatura.								
RELAÇÃO ENTRE A ESCALA DE BEAUFORT E A VELOCIDADE DO AR (m/s)								
Escala de Beaufort	1	2	3	4	5	6	7	8
Velocidade média do vento a 10 m de altura em campo aberto	0,9	2,4	4,4	6,7	9,3	12,4	15,5	18,9
Velocidade da rajada a 2 m de altura $\overline{V}_2 = \overline{V}_{10} 1,5 * 0,8$	1	3	5	8	11	15	19	23
Velocidade média do vento a 2 m de altura em área urbana $\overline{V}_2 = 0,5 * \overline{V}_2$	0,5	1,5	2,5	4	5,5	7,5	9,5	11,5

Fonte: Prata (2005)

CrITÉRIOS de conforto semelhantes são fornecidos por Nikolopoulou (2004) para ventos de 5 (m/s), indicando o período de tempo máximo a que as pessoas devem estar expostas para condições de conforto térmico em função da atividade exercida, para temperaturas do ar acima de 10°C e considerando-se pessoas com adaptação das roupas para a estação.

Saraiva (1994), Mascaró (2004) e Prata (2005) retrataram as condições de conforto com base em Penwarden (1975) para passeios em sol pleno e à sombra, como mostra a Figura 9.

Figura 9 – Condições de conforto térmico de indivíduos em movimento
Fonte: Mascaró (2004) a partir de Penwarden (1975)

Penwarden (1975) mostra que o efeito de um aumento na velocidade do vento é maior em baixas velocidades. Em sol pleno, um aumento de velocidade do vento de 0,5 para 5 (m/s) requer um aumento de 9°C na temperatura do ar para manutenção do equilíbrio térmico, enquanto um aumento de 5 para 10 (m/s) requer aumento de temperatura de apenas 1,5°C para o mesmo fim. Sair do sol pleno para a sombra sob um vento de 5 (m/s) traz o mesmo efeito de uma queda de 3,6°C na temperatura do ar.

Quanto à qualidade do ar, Saraiva (1994) ressalta que “a ausência de vento pode ser mais letal que qualquer tempestade”, se não houver retirada adequada dos

poluentes urbanos. A localização e as dimensões das chaminés e sistemas de exaustão devem garantir que a concentração de poluentes não atinja valores limites de segurança para a saúde pública.

Para Stathopoulos (2006), o conforto humano em clima urbano pode ser afetado por uma vasta gama de parâmetros, incluindo velocidade do vento, temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar, qualidade do ar, atividade humana exercida, nível de vestuário, idade, entre outros. Cita que vários critérios relacionados ao vento foram desenvolvidos avaliando as forças mecânicas induzidas pelo vento sobre o corpo humano que afetam conforto e segurança, mas existem diferenças significativas entre os critérios utilizados pelos vários países e instituições para estabelecer valores limite para as condições de vento aceitáveis e inaceitáveis, mesmo quando é usado como critério um único parâmetro, no caso a velocidade do vento. Estas diferenças vão desde o período da velocidade (média ou rajada), sua probabilidade de excedência (frequência de ocorrência) à avaliação da sua magnitude (experimental ou computacional). Seus estudos buscam delinear uma abordagem para o estabelecimento de um índice de conforto global, tendo em conta, além da velocidade do vento, a temperatura e a umidade relativa. Conclui que as simulações computacionais substituem essencialmente a simulação física no túnel de vento de camada limite, pelo menos em princípio; os métodos de CFD envolvem grandes quantidades de dados computacionais mesmo para problemas relativamente simples e a sua precisão é muitas vezes difícil de avaliar quando aplicados a um novo problema onde não foi feita verificação experimental prévia.

Ali-Toudert (2007) trata da importância do conforto térmico ao ar livre sobre a concepção de uma rua urbana. Os efeitos do seu perfil vertical, incluindo formas assimétricas do *canyon*, o uso de galerias e outros dispositivos de sombreamento nas fachadas, dispostos em várias orientações, são avaliados. O estudo foi realizado por meio de modelagem no programa ENVI-met® 3.0, onde o conforto térmico foi avaliado para horas do dia em todo o *canyon* por meio do Índice de Temperatura Fisiológica Equivalente ou *Physiological Equivalent Temperature* (PET). Os resultados revelaram que todos os aspectos de concepção investigados possuem um efeito moderado na temperatura do ar e um forte efeito sobre o calor para um corpo humano e, portanto, sobre a sensação térmica resultante. Quanto maior a abertura para o céu do *canyon*, maior o estresse por calor. A orientação do *canyon* também é importante. Se combinados apropriadamente, todos os elementos de

design investigados podem atenuar o estresse pelo calor no verão e promover o conforto térmico.

Em seu estudo, Mochida (2008) revisa o estado da arte nas pesquisas de previsão das condições térmicas e de ventos no nível dos pedestres em áreas urbanas, principalmente o alcançado pelos pesquisadores no campo da engenharia ambiental no Japão. Revisa o progresso em modelos de turbulência na última década e suas aplicações para os problemas relacionados ao clima e ventos, bem como os recentes progressos no campo da modelagem do dossel para reprodução dos efeitos aerodinâmicos e térmicos de árvores, edifícios e automóveis. Conclui que uma grande quantidade de melhorias e revisões ainda é necessária antes que os fenômenos de escoamento de turbulência em áreas urbanas possam ser reproduzidos com precisão e que os esforços de investigação fundamental para melhorar a precisão das previsões devem ser continuados.

Wu (2012) desenvolveu estudos de estratégias para planejadores com o objetivo de criar condições de conforto para o clima local, a partir de dados meteorológicos, com foco na correlação entre ventos e outros parâmetros microclimáticos. Nos estudos de casos foram feitas simulações em túnel de vento e em CFD. Em suas conclusões, afirma que tanto o túnel de vento quanto o CFD são apenas ferramentas e têm suas limitações, mas ainda assim são importantes em uma série de setores de projeto e contribuem para melhorias no planejamento e obtenção de recomendações úteis para a comunidade.

Gao et al. (2012) afirmam que o fluxo de ar através de ambientes urbanos é um dos fatores mais importantes que afetam a saúde humana e o conforto térmico no interior e exterior, a qualidade do ar e o desempenho energético dos edifícios, e apresentam um estudo sobre os efeitos dos ventos induzidos pelas edificações urbanas utilizando análise estatística. São utilizados dados obtidos em medições ao longo do ano em pesquisas de campo no local de estudo. A associação entre formas arquitetônicas típicas e o vento são investigados; estas formas incluem um *canyon* de rua, um ambiente semifechado, um pátio e um espaço relativamente aberto em um edifício. A análise estatística identificou fatores-chave que descrevem os efeitos da forma construída sobre os fluxos de ar resultantes. Os resultados indicam que as mudanças na direção do vento predominante produziriam diferenças de suas direções e velocidades dentro do complexo arquitetônico.

O trabalho apresentado por Chen (2012) consiste em uma revisão de pesquisas da última década sobre aspectos comportamentais de conforto térmico ao ar livre, direcionada à percepção de conforto térmico e ao uso de espaços externos no contexto do planejamento urbano. A influência do conforto térmico em atividades ao ar livre é uma questão complexa que compreende tanto aspectos climáticos como comportamentais. No contexto global de mudanças climáticas, espaços ao ar livre que proporcionam uma experiência de conforto térmico agradável para pedestres melhoram a qualidade de vida urbana de forma efetiva. São espaços importantes para as cidades sustentáveis para poderem acolher o tráfego de pedestres e atividades ao ar livre e desta forma contribuir para a habitabilidade e a vitalidade urbana.

2.2.3 O papel dos ventos e da vegetação no conforto térmico

As árvores são como bombas de água auto-reguláveis, pois abrem seus estômatos quando existe disponibilidade de água e calor, refrescando o meio pela evapotranspiração das partículas de água, e fecham quando situações adversas ocorrem, preservando condições favoráveis e condicionando o clima urbano, diminuindo a amplitude térmica, adequando a cidade dentro da faixa de conforto térmico humano... (SILVA FILHO et al., 2005, p. 89).

A relação entre vegetação e conforto humano é importante sob diversos aspectos, desde o conforto físico (equilíbrio térmico, melhoria na qualidade do ar) até o psicológico (prazer pelo contato com a natureza). A mais evidente é o conforto térmico otimizado pelo sombreamento em dias quentes.

O efeito dos ventos sobre as pessoas deve ser observado tanto na condição de verão quanto na condição de inverno. Nikolopoulou (2004) ressalta que, de acordo com o clima, determinado nível de vento pode ser considerado desejável ou indesejável. Também esclarece que os efeitos diretos do vento podem ser divididos em duas categorias principais: efeitos mecânicos e efeitos térmicos; o grau de conforto e a tolerância à intensidade dos ventos variam, entre outros fatores, em função do tempo de exposição a eles e do tipo de atividade que está sendo exercida. Seus estudos indicam que barreiras aos ventos compostas por elementos permeáveis, como a vegetação, são os mais adequados na grande maioria dos casos.

As inter-relações entre o clima e a vegetação podem ser vistas em uma variedade de escalas espaciais e temporais. A temperatura de uma folha é regulada

pelas trocas de calor e umidade com o ar circundante. A perda de água durante a transpiração também tende a resfriar uma folha porque grandes quantidades de energia são necessárias para mudar a água do estado líquido para o gasoso (BONAN, 2002).

Segundo Rivero (1986), uma pessoa exposta aos raios diretos do sol experimenta uma sensação de calor equivalente a um aumento de 7°C na temperatura do ar. Mascaró (2004) ressalta que a arborização substitui com vantagem qualquer sistema de sombreamento.

Além da proteção aos ventos em dias frios, a utilização de árvores em espaços urbanos abertos traz benefícios diretos aos usuários nos períodos quentes. Como esclarece Santamouris (2006), as árvores promovem não só a proteção aos raios solares, mas também a redução da temperatura do ar através do processo de evapotranspiração, no qual ocorre a perda de água para a atmosfera por evaporação e por transpiração de forma combinada.

Mascaró (2004) cita que a influência da vegetação na temperatura do ar está relacionada ao controle da radiação solar, do vento e da umidade do ar.

Numerosos estudos têm demonstrado a importância de paisagens de vegetação na melhoria da ilha de calor urbana. Um deles é um estudo das temperaturas do ar noturno durante o verão em Washington, DC, EUA (Figura 10). Na noite estudada em particular, a temperatura média do ar obtida ao longo de um corte transversal do bairro foi de 23°C. No entanto a temperatura variou muito dependendo da localização ao longo do transecto. Uma grande área arborizada de Rock Creek Park teve temperaturas do ar bem mais baixas: 20°C; no distrito comercial do centro foram próximas a 25°C, enquanto na área de *shopping center* nas proximidades foi cerca de 1°C mais frio. Mesmo durante o dia, o Rock Creek Park foi aquecido mais lentamente do que os distritos comerciais e era geralmente 1 a 2°C mais frio ao meio-dia (BONAN, 2002).

Figura 10 – Temperaturas do ar medidas em uma noite de verão em Washington, DC ao longo de um transecto a partir de área residencial, no distrito de negócios e em parques gramados centrais

Fonte: Bonan (2002)

Figura 11 – Representação da variação da temperatura do ar da área rural para a área urbana
Fonte: Santamouris (2006)

Santamouris (2006) apresenta na Figura 11 a forma como a temperatura do ambiente varia de acordo com a distância entre a zona rural e o centro da cidade.

Para uma cidade grande, durante um dia claro com ventos fracos, ao por do sol, a fronteira entre as zonas rurais e urbanas apresenta uma inclinação acentuada de temperatura para a ilha de calor urbano, enquanto o restante da área urbana é caracterizada por um gradiente fraco de aumento das temperaturas; ocorre um pico final no centro da cidade onde a temperatura máxima urbana é encontrada. A diferença entre a temperatura máxima urbana e a temperatura rural é definida como a intensidade urbana de ilha de calor (OKE, 1987).

Monteiro (2003) ressalta que a flora desempenha papel importantíssimo no balanço de energia, particularmente em cidades tropicais com expressiva continentalidade.

Ao compreender as funções ecológicas que criam climas de superfície e as características da paisagem específicas que alteram essas funções, a variabilidade espacial natural no clima pode ser explorada para criar paisagens termicamente eficientes. Nós sempre podemos usar a tecnologia para modificar o clima predominante em prol das necessidades humanas (BONAN, 2002). Olgyay (1963) realizou testes de campo e experimentos em modelos para avaliar a modificação dos fluxos de ar decorrentes de várias combinações de implantação de elementos paisagísticos nas proximidades de edificações. Seus estudos relativos à arquitetura bioclimática são referência até os dias de hoje.

Bottillo et al. (2014) avaliaram a interação entre um campo de fluxo tridimensional e um *canyon* viário urbano, por meio de várias simulações numéricas, considerando-se diferentes velocidades e direções do vento ambiente. O objetivo foi investigar o efeito da radiação solar dentro de um *canyon* para diversas características do ambiente. Os resultados mostram a importância de se considerar um modelo tridimensional e o impacto do componente de velocidade longitudinal sobre os processos de transferência de calor ao longo do *canyon* urbano; demonstrou-se que, para cada condição do vento ambiente, a estrutura sofre alterações significativas ao longo de todo o comprimento do *canyon*.

Shashua-Bar (2000) avaliou o efeito de arrefecimento de pequenas áreas verdes urbanas com várias configurações geométricas no verão. Foram feitos experimentos em 11 locais arborizados no complexo urbano de Telavive durante o período de julho a agosto de 1996. Um modelo empírico foi desenvolvido para prever o efeito de resfriamento no interior dos locais arborizados, baseado na análise estatística de observações experimentais, reunidos de hora em hora. Os

fatores encontrados para explicar mais de 70% da variação da temperatura do ar no interior dos sítios verdes estudados foram o fato da área ser sombreada parcialmente pela copa das árvores e a temperatura do ar dos ambientes não florestados adjacentes aos locais. Em pequenos espaços verdes, o efeito de resfriamento estimado neste estudo é perceptível até cerca de 100 m nas ruas ramificando-se a partir do local. Os resultados empíricos deste estudo permitem o desenvolvimento de ferramentas para que incorporem os efeitos climáticos das áreas verdes no desenho urbano.

De acordo com Monteiro et al. (2008), a utilização de arvoretas com copas baixas e densas diminui o fator de visão de céu, minimizando os ganhos de radiação difusa e contribuindo para o conforto térmico ao longo do dia, ainda que se reconheça que elas também atuem como obstáculos para os ventos. Por outro lado, durante períodos noturnos quentes, atenua a perda de radiação para o fundo de céu.

Park et al. (2012) realizaram uma pesquisa com o objetivo de fazer a relação entre estudos numéricos e medições em campo das condições térmicas de uma via urbana e apresentar informações sobre os efeitos da vegetação neste meio, para uso adequado pelos designers e planejadores. Medições externas foram realizadas em um modelo em escala, onde as condições reais foram reproduzidas para examinar os efeitos quantitativos de vegetação ao longo da calçada e sobre o conforto térmico no verão. Dentre os principais resultados, constataram que a presença de quatro árvores na calçada reduz a velocidade do vento no interior do dossel em até 51%. Árvores ao longo da calçada diminuem a temperatura de globo devido à diminuição do fluxo de radiação resultante da sombra.

Szücs (2013) realizou um estudo de caso em Dublin para examinar se as características climáticas do local favorecem atividades externas prolongadas durante o verão, e investigou em que medida o planejamento urbano e a morfologia urbana resultante influenciam os microclimas existentes, principalmente quanto aos ventos. Microclimas foram simulados pelo ENVI-met®, com inserção de dados de edificações, vegetação e revestimentos. A velocidade do vento foi avaliada para verificar se o local tem características de barrar ou intensificar os ventos. Os resultados indicaram velocidades do vento até 60% maiores que as encontradas no Aeroporto da cidade, em 3 direções predominantes, concluindo que os ventos do local podem suscitar frequência limitada de usuários em seus espaços externos.

Outra importante questão climática a ser considerada refere-se ao aumento da impermeabilização do solo nas cidades. De acordo com Bonan (2002), a alteração nas taxas de permeabilidade do solo nas paisagens urbanas pode afetar o ciclo hidrológico local. As superfícies impermeáveis rígidas e os solos compactados impedem a infiltração no solo, gerando o escoamento superficial excessivo em comparação com paisagens rurais. Sarjetas, esgotos, sistemas de drenagem e outras intervenções humanas podem transmitir rapidamente essa água para canais fluviais. O resultado é que a urbanização aumenta a taxa de vazão de pico, a velocidade do escoamento e o volume total de escoamento como mostra a Figura 12.

Figura 12 – Infiltração e escoamento superficial em resposta a 100 mm de precipitação por mais de 24 horas para floresta, pasto, áreas residenciais e áreas comerciais
Fonte: Bonan (2002)

2.3 Barreiras vegetais

2.3.1 Características das barreiras vegetais

“O efeito benéfico da vegetação sobre o espírito e a saúde humana e a necessidade de inserção do verde na cidade já eram conhecidos desde a antiguidade.” (MONTEIRO, 2007, p. 12). Continua este autor:

O Brasil criado a partir da colonização portuguesa nasceu em um momento em que a Europa pensava belos e utópicos modelos para as cidades, buscando o antagonismo da compacta cidade medieval com suas vielas tortuosas. [...] De qualquer forma, devemos nos lembrar que, nos primeiros momentos da civilização, a vegetação tropical era de uma presença tão dominante diante das vilas portuguesas, que provavelmente não fazia sentido algum pensar em jardins urbanos (MONTEIRO, 2007, p. 26).

A arborização dos espaços públicos decorreu do aumento das cidades, na segunda metade do século XIX, buscando-se o reequilíbrio entre o espaço natural e o construído através do planejamento da paisagem.

É necessário abordar alguns aspectos da ecologia e da climatologia para entender como mudanças na vegetação natural pelos humanos afetam e são afetados pelo clima. A estreita correspondência entre o clima e a vegetação é um dos princípios fundamentais das ecorregiões bioclimáticas, que fornecem um contexto mais natural para resolver os problemas ambientais do que fronteiras políticas ou administrativas (BONAN, 2002).

As árvores também podem funcionar como dispositivo de controle do fluxo e direção dos ventos, de forma a favorecer o condicionamento térmico do ambiente externo.

... os efeitos básicos da barreira são quatro: obstrução, deflexão, filtragem e condução. A *obstrução* bloqueia o fluxo de ar. A *deflexão* desvia a direção do fluxo de ar e, conseqüentemente, sua velocidade. A *filtragem* reduz a velocidade do vento conforme a permeabilidade da barreira. A *condução* direciona o fluxo do ar, modificando sua velocidade (ROBINETTE ¹, 1972; apud MASCARÓ, 2004, p. 80).

A permeabilidade parcial dos elementos arbóreos é favorável por não criar uma barreira rígida que provoca turbulência quando há incidência de ventos fortes.

¹ ROBINETTE, G.O. **Plant, people and environmental quality**. Washington: Department of the Interior, National Park Service, 1972.

Ometto (1981) cita que quebra-ventos muito densos e desde o solo ocasionam a formação de intensa turbulência no lado contrário à incidência do vento, ocasionando uma rápida descida do fluxo de ar junto ao solo, diminuindo o efeito protetor da barreira.

2.3.2 Configurações pré-estabelecidas para controle dos ventos

A paisagem pode ser modificada para adequação do espaço urbano ao conforto humano. Locar objetos com características apropriadas para funcionarem como barreiras aos ventos é uma prática eficiente. A vegetação tem efeito significativo nos fluxos de vento, afetando direção e velocidade. Geralmente, quanto maior e mais densa é a vegetação, maior é o efeito de barreira (BROWN,1995). A maioria dos objetos da paisagem alteram a velocidade e a direção dos ventos; as características dos objetos da paisagem que mais interferem são tamanho, localização, orientação e porosidade.

Barreiras podem ser utilizadas no espaço urbano para proteger a área de pedestres dos ventos em altas velocidades e das turbulências; podem ser estruturas rígidas (edifícios, muros etc) ou permeáveis (como vegetação ou cercas vazadas). Barreiras sólidas tendem a fornecer abrigo mais eficiente próximo à estrutura de proteção, mas tendem a criar turbulência e ventos em altas velocidades um pouco mais adiante. Na maioria dos casos, o uso de barreiras permeáveis traz melhores resultados (NIKOLOPOULOU, 2004).

A Figura 13 apresenta alguns tipos de barreiras de árvores. Sua composição depende da proteção desejada; barreiras de maior altura requerem espécies de folhagem baixa, média e alta (RIVERO, 1986).

A heterogeneidade da barreira possibilita a diversificação da forma da vegetação, aumentando a rugosidade da superfície externa da barreira e reduzindo sua permeabilidade.

Figura 13 – Tipos de barreiras de árvores
Fonte: Rivero (1986)

Segundo Oke (1987), a presença de árvores pode alterar ventos locais. Árvores dispostas em conjunto geralmente diminuem os ventos a uma distância de 20 a 30 vezes a sua altura. Este cinturão que funciona como quebra-ventos, ou *shelterbelt*, tem sido amplamente utilizado em ambientes rurais para atenuar ventos que sopram em fazendas abertas, reduzindo assim a erosão do solo e a perda de calor de edifícios isolados. A maior redução no vento ocorre dentro de uma distância que é inferior a cinco vezes a altura da árvore, onde os ventos são reduzidos de 20 a 40% em áreas abertas.

A permeabilidade da barreira afeta muito a redução do vento. Uma barreira densa tem maior redução na velocidade do vento, mas o bloqueio abrupto de vento produz uma forte turbulência na sua direção, de modo que o efeito de abrigo fica limitado a apenas uma curta distância. O efeito de abrigo também é pequeno em vegetação esparsa, onde os ventos facilmente penetram a barreira. Em contrapartida, o efeito de abrigo é ampliado nos quebra-ventos de média densidade (BONAN, 2002, cap.8, p.16-17), trad. da autora.

Jung et al. (2009) utilizaram o modelo ENVI-met® para investigar as variações de velocidade do vento sobre uma região litorânea da Coreia em caso de incidência de ventos fortes causados por um tufão. Os resultados foram colhidos a 3 m de altura, na situação sem árvores e na situação com árvores de 15 a 20m de altura, sem alteração da topografia, sob mesma velocidade e direção dos ventos. Quando não há vegetação o atrito é relativamente baixo e o vento fica mais forte a sotavento da topografia; quando há vegetação o atrito superficial torna-se maior e ocorre mudança da direção e da velocidade do vento: com ventos incidentes de 55 m/s, a diminuição na velocidade dos ventos é de 10 a 15 m/s. Para verificar a

validade do resultado de modelagem, foram utilizados os dados observados a partir de uma estação meteorológica automática e de medições in loco. Concluiu-se que os resultados medidos e os simulados foram muito semelhantes, e portanto os valores obtidos a partir do modelo são confiáveis o suficiente para prever e verificar as incidências de vento em estudos futuros.

Lee et al. (2010) desenvolveram um sistema de varredura a laser para a medição de características geométricas da copa das árvores. Os resultados foram utilizados para estimar as porcentagens de redução da velocidade do vento pelos quebra-ventos compostos por árvores. Foram feitos dois arranjos arbóreos com diferentes porosidades, com incidência de ventos controlados em duas intensidades. A maior parte das características geométricas da copa das árvores mostrou uma boa correlação com os percentuais de redução de velocidade do vento. O desempenho do sistema de varredura a laser para a estimativa da velocidade do vento por porcentagem de redução pode variar de uma árvore para outra, uma vez que as características da copa e o comportamento quanto à permeabilidade ao fluxo de ar através das árvores podem ser diferentes. Este aspecto precisa ser considerado em uma aplicação particular do sistema da varredura a laser.

Olgay (1963) afirma que a velocidade do ar próximo ao solo pode ser controlada até certos limites. Barreiras reduzem a velocidade dos ventos, cujo efeito mecânico traz mudanças perceptíveis tanto na temperatura quanto na umidade do ar, além dos efeitos evaporativos e do controle no acúmulo de neve.

O tipo de barreira utilizada tem efeito direto no padrão do fluxo de ar e na área de proteção resultantes, como mostraram experimentos em túnel de vento (Figura 14).

Barreiras aos ventos compostas por vegetação também apresentam propriedades estéticas e de sombreamento.

Onde: U_p = velocidade no túnel de vento com a barreira e U_c = velocidade no túnel de vento no ponto correspondente sem a barreira

OBJETO	Distância de 0,1 H até		
	75% REDUÇÃO	50% REDUÇÃO	25% REDUÇÃO
PLACA VERTICAL	13.0 H	15.5 H	21.5 H
FORMA TRIANGULAR	10.5 H	15.0 H	20.5 H
CILINDRO	7.0 H	9.0 H	14.0 H
ÁRVORE PADRÃO	—	13.5 H	27.0 H

Figura 14 – Experimentos em túnel de vento para obtenção dos fluxos de ar em torno de 4 tipos de barreira de mesma altura diferenciadas pela forma

Fonte: Olgyay (1963)

Oke (1978) fornece um panorama do desempenho de uma barreira de altura H e de densidade média (Figura 15). As velocidades estão expressas como uma porcentagem do valor incidente vindo do campo aberto. O fato de tratar-se de uma barreira finita fica evidente no padrão resultante; a velocidade aumenta próximo às extremidades laterais por conta da turbulência provocada pela mudança na direção. Para ser efetiva, a barreira deve ter no mínimo largura de $12 H$ perpendicular à incidência do vento. Olgyay (1963) fornece um gráfico com desempenho equivalente.

Figura 15 – Distribuição das velocidades do vento no entorno de uma barreira de média densidade
Fonte: Oke (1978)

O efeito da densidade da barreira sobre a distância de abrigo é ilustrado na Figura 16 a partir de medições na vizinhança do quebra-ventos. Se a barreira é muito densa, a redução da velocidade do vento é vista como sendo considerável imediatamente a sotavento porque existe pouca ou nenhuma penetração, mas o vento recupera o seu valor anterior de forma relativamente rápida, porque a força da cavidade é intensa e o movimento do ar acima é rapidamente redesenhado. Se assumirmos que uma redução de 10% é o valor de menor significado, em seguida a uma barreira densa pode-se ter sua influência prolongada para cerca de 10 a 15 H na direção do vento. Como esperado, a barreira de baixa densidade fornece a menor proteção perto de sua base, pois permite penetração considerável do fluxo de ar, mas sua recuperação é mais lenta do que na alta densidade, uma vez que o ar que passa através dela fornece um amortecimento em sua cavidade e a zona de fluxo assume uma forma mais uniforme e aerodinâmica. O ponto de recuperação de 90% ocorre a cerca de 15 a 20 H do obstáculo. Assim, a barreira de média densidade fornece o melhor abrigo global por combinar o retardo máximo compatível com o amortecimento mais aerodinâmico.

Figura 16 – Redução da velocidade do vento em torno de barreiras com diferentes densidades
Fonte: Oke (1978)

Segundo Shinzato (2009), em áreas urbanas os valores são menores que os acima citados porque a concentração de edifícios causa turbulência nos ventos antes de passar pelas árvores.

Geiger (1960) já citava que em terrenos sujeitos a ventos fortes é indispensável escolher as espécies adaptadas à situação ecológica. Também é importante o afastamento das linhas e das plantas nas linhas, bem como a largura das faixas e um estudo da associação correta das espécies para barreiras arbóreas.

Simões (1987) realizou estudos com a *Grevillea robusta* A. CUNN como barreira aos ventos, uma espécie australiana com características anatômicas ideais e bastante adaptável. No estudo de 5 barreiras com características diferentes, concluiu-se que o efeito mais benéfico foi obtido na faixa entre 4 e 8 H (onde H é a altura da barreira).

Ainda conforme Simões (1987), a espécie adequada para funcionar como quebra-ventos deve ser ereta, perenifólia, de crescimento rápido, de permeabilidade média e homogênea, além de pouca agressividade na competição radicular. Outras recomendações para quebra-ventos arbóreos seriam: a mais alta possível, em linhas tão longas quanto possível, em disposição perpendicular aos ventos dominantes. O ponto de proteção máxima foi à distância de 2H da barreira mais densa, e à distância de 4H para a barreira mais permeável. O quebra-vento mais eficiente do experimento foi o de 27% de permeabilidade.

Em relação à estrutura do quebra-vento, verificou-se que a melhor proteção é obtida quando a porosidade é homogênea, com o mínimo de espaços vazios entre as árvores. Uma única linha de árvores de **Grevillea robusta**, espaçadas em 5 m entre si, sem desrama, forneceu melhor proteção. Para quebra-ventos em série, a distância máxima entre duas barreiras consecutivas não deve ultrapassar 200 m (SIMÕES, 1987, p. 1).

Skiomore (1976)² e Reddy (1979)³ apud Simões (1987) afirmam que uma barreira muito densa proporciona maior proteção para menores distâncias, enquanto uma barreira pouco densa proporciona menor proteção para maiores distâncias.

Segundo Erell (2011), estudos teóricos e experimentais indicam que uma barreira porosa é mais efetiva que uma barreira sólida. A efetividade de uma barreira arbórea depende de sua posição em relação ao fluxo do vento, da porosidade da barreira, da altura das árvores e da distância do ponto a proteger; a porosidade por sua vez depende do tipo de árvore, da distância entre as árvores e da sobreposição entre as fileiras. A atenuação proporcionada por uma barreira de altura H inicia-se por volta de 5H à frente da barreira e estende-se por até 30H após a mesma.

Conforme indicado nas Figuras 17 e 18, o ângulo de incidência do vento na barreira também afeta seu desempenho (para ângulo de incidência normal, $IA = 0$ e para incidência paralela, $IA = 90^\circ$). À medida que aumenta a porosidade, a redução máxima na velocidade do vento a sotavento torna-se menos intensa. Uma porosidade ótima de 35% pode ser considerada, na proporção entre redução de vento e extensão da área de sombra da barreira.

² SKIOMORE, E.L. Barrier-induced microclimate and its influence on growth and yield of winter wheat. In: TINNUS, R.W. **Shelterbelts on the great plains**: proceedings of the Symposium. Denver, 1976. p. 57-63.

³ REDDY, C.V.K. Shelter belts against storms and cyclones on the coast. **The Indian Forester**, Dehradun, v. 105, n. 10, p. 720-725, 1979.

Figura 17 – Perfis horizontais de velocidades do vento normalizadas à altura $z = 0,1 H$ para vários ângulos de incidência em um quebra-ventos de espessura $W = 0,5 H$ e porosidade 75%
Fonte: Erell (2011)

Figura 18 – Perfis horizontais de velocidades do vento normalizadas à altura $z = 0,1 H$ para vários ângulos de incidência em um quebra-ventos de espessura $W = 0,5 H$ e porosidade 43%
Fonte: Erell (2011)

Yeh et al. (2010) realizaram uma série de simulações em CFD e em túnel de vento para investigar a eficácia de barreiras porosas para prevenir erosão em pátios abertos de estocagem. As simulações têm foco específico nos efeitos da porosidade da barreira, da configuração geométrica e da direção da incidência dos ventos. A validação do modelo simulado foi obtida em boa concordância com os resultados dos experimentos em túnel de vento. Os resultados indicaram que a eficiência da

barreira no controle da passagem do pó depende basicamente da direção da incidência dos ventos. Bourdin (2007) também realizou simulações em CFD que indicaram que a natureza do fluxo formado por trás de quebra-ventos é fundamentalmente dependente da direção do vento; no entanto as simulações não consideraram os estoques em si, e conclusões definitivas sobre a configuração ideal dos quebra-ventos em relação às armazenagens não pôde ser obtida.

Santiago et al. (2007) realizaram experimentos em túnel de vento com barreiras de diferentes porosidades entre 0 e 50%, com o objetivo de determinar a porosidade ótima para a eficiência de uma barreira isolada. As barreiras foram feitas com placas perfuradas contendo furos circulares uniformemente distribuídos. O melhor resultado foi obtido com uma barreira de 35% de porosidade; apresentou o melhor abrigo a uma grande distância, em distâncias pequenas e médias a proteção foi semelhante a de uma barreira de menor porosidade.

Wu et al. (2013) também afirmam que as barreiras de vento porosas são amplamente utilizadas e têm se mostrado mais eficientes do que as barreiras sólidas. Neste estudo foram feitas medições em túnel de vento para avaliar a eficiência de barreiras de diferentes porosidades, quantidades de fileiras e espaços entre elas. O melhor efeito de barreira alcançado foi sempre a favor do vento, utilizando-se uma barreira com 35% de porosidade, de onde sugerem a porosidade ideal entre 30 e 40%. Os estudos também indicam que $6H$ é um bom espaçamento entre fileiras, onde H é a altura da barreira; deste resultado sugerem o espaçamento ideal entre fileiras entre 5 e $7H$. Obviamente, barreiras de vento de duas ou três fileiras proporcionam um melhor abrigo do que as barreiras de uma fileira. Estes resultados indicaram uma boa concordância com estudos anteriores sobre a porosidade.

Para Dong et al. (2010), o campo de turbulência do fluxo de ar atrás de uma barreira porosa tem impactos significativos sobre sua eficiência. Realizaram experimentos em túnel de vento com medições de velocidade e campos de turbulência para barreiras verticais com 11 diferentes porosidades em 7 conformações típicas de barreiras. A redução da velocidade média por trás de todas as barreiras aumentou com a diminuição da porosidade, mas criou um aumento correspondente no componente vertical de turbulência. Concluíram que são necessárias mais pesquisas para fazer uma avaliação abrangente da eficiência de quebra-ventos, tendo em conta os campos de redução de vento e turbulência.

Chu et al. (2013) realizaram experimentos em túnel de vento e em simulações computacionais para investigar o efeito de proteção de quebra-ventos porosos em estradas, considerando-se 4 diferentes alturas (de 0 a 3 m) em 3 diferentes porosidades. Os resultados indicaram que os quebra-ventos porosos podem reduzir significativamente o coeficiente de força lateral nos veículos, e o efeito de barreira de quebra-ventos com altura 2 m mais a barreira de altura 0,8 m é suficiente para proteger os veículos de até 3,6 m de altura, porém as proteções diminuem com o aumento da velocidade dos veículos. As previsões foram validadas por resultados experimentais.

Kuhns (2008) sugere que árvores com copas largas fiquem a cerca de 30 m (100 pés) para reduzir ventos de 15,6 m/s (35 m.p.h.) para 6,7 m/s (15 m.p.h.), como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Efeito das árvores como barreira aos ventos

Fonte: Kuhns (2008). Disponível em:

<<http://forestry.usu.edu/files/uploads/PlantingTreesEnergyConservation.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2015.

Quebra-ventos podem reduzir velocidades de vento até 30 vezes sua altura (H) a favor do vento. Ainda segundo Kuhns, a altura efetiva de um quebra-vento de várias linhas é a da linha mais alta. Grandes áreas devem ter um quebra-vento para cada 10 H a 20 H para a proteção integral. Por exemplo, quebra-ventos de 10 m de altura devem ser plantados a cada 100 a 200 m para efetivamente proteger uma grande área. Recomenda-se que o comprimento do quebra-ventos seja ao menos 10 H.

Para Santamouris (2006), as velocidades do vento usualmente são menores em áreas urbanas quando comparadas às velocidades observadas em áreas rurais, a uma mesma altura. Este efeito deve-se principalmente a mudanças na rugosidade

do terreno, mas também decorre das ilhas de calor urbanas e da canalização dos ventos pelos *canyons*. Ainda segundo Santamouris, o estudo dos ventos urbanos pode ser bastante complicado, uma vez que é afetado por muitos parâmetros do local, como topografia, geometria e dimensões das edificações, ruas e árvores.

Figura 20 – Limites aerodinâmicos e zonas de fluxo dos ventos em uma barreira sólida típica perpendicular ao fluxo

Fonte: Oke (1978)

Na Figura 20, uma barreira sólida de altura h afeta o fluxo incidente até ao menos a altura de $3h$, e até a mesma distância à frente da barreira.

Árvores cuidadosamente locadas podem reduzir a velocidade de ventos indesejáveis (WONG, 2009). Melhorias no microclima e redução da intensidade de ventos em edificações podem ser obtidas com a colocação de plantas perpendicularmente à direção de sua incidência. Deve-se no entanto cuidar para que os quebra-ventos não impeçam a passagem dos ventos refrescantes no verão, especialmente em climas tropicais.

Figura 21 – Padrões esperados de fluxo de ventos para arranjo típico de árvores
Fonte: Brown (1995)

Figura 22 – Estudos tridimensionais das barreiras e checagem das limitações de desempenho
Fonte: Brown (1995)

Para Brown (1995), o método de testes em túnel de vento podem reproduzir as condições naturais para que medições possam ser feitas. O teste empírico é mais utilizado, porém sem a mesma precisão; dados colhidos em medições locais são valiosos para ambientes em condições similares, mas a limitação é que raramente as condições são as mesmas, e por essa razão algumas suposições são adotadas.

Segundo Jones (1992), as taxas reduzidas de turbulência logo após as barreiras tendem a aumentar as temperaturas durante o dia, quando a radiação incidente se dissipará menos que no campo aberto; à noite a barreira poderá trazer o efeito oposto.

Bitog et al. (2012) utilizaram CFD para investigar as características do fluxo ao redor de quebra-ventos compostos por árvores. A eficiência de quebra-ventos depende de muitos fatores que podem ser investigados em experimentos de campo, porém pode haver limitações práticas como condições meteorológicas instáveis e dificuldades em alguns pontos de medição. A investigação por meio de simulações computacionais permite a modelagem das árvores como um meio poroso, onde as propriedades aerodinâmicas das árvores sejam consideradas. A simulação forneceu uma análise do efeito das diferenças entre tipos de árvores, quantidade de fileiras e formas de arranjo na redução da velocidade do vento. As simulações revelaram que, para pinheiros com coeficiente de arrasto = 0,55, a lacuna de 0,5 m entre as árvores foi mais eficaz na redução da velocidade do vento do que lacunas de 0,75 m e 1,0 m. A percentagem de redução foi de 71, 65 e 56%, respectivamente. Duas fileiras de árvores alternadas também foram mais eficazes do que duas fileiras alinhadas ou uma única linha de árvores (nesta ordem, redução de 91, 88 e 71%). Quanto à altura do quebra-vento, a porcentagem de redução na velocidade do vento medida à distância 15H, onde H é a altura da árvore, para uma linha, duas fileiras de árvores alinhadas e duas linhas dispostas alternadamente foi de aproximadamente 20, 30 e 50%, respectivamente. Os experimentos foram validados em simulação em túnel de vento. O CFD mostrou ser uma ferramenta eficaz para simular o fluxo em torno de quebra-ventos de árvores, por permitir visualização quantitativa e investigação de redução de velocidade. No entanto, para a precisão do estudo de simulação, os valores significativos necessários no processo de simulação, como o coeficiente de arrasto da árvore, devem ser determinados com precisão.

2.3.3 O LAI e as barreiras vegetais

O Índice de Área Foliar ou *Leaf Area Index* – LAI é definido como sendo a área de uma face da folha da vegetação pela área de superfície do solo que ocupa (TAN, 2009). É um número adimensional (m^2/m^2), e na prática corresponde à relação da superfície do total das folhas da copa pela área de projeção que ocupa no solo.

Existem duas formas básicas de medição do LAI de uma vegetação: por métodos destrutivos diretos e métodos não-destrutivos indiretos.

O método direto baseia-se no cálculo da área média de folhas individuais coletadas e, a partir destes dados, estima-se o LAI para toda a copa da árvore. O método indireto envolve medidas de transmissão de luz através da copa das árvores e medições por sensores remotos do albedo. Nas medições, o LAI pode ser obtido por métodos ópticos. Apesar de rápido, este método não mostra a distribuição vertical das folhas (SHINZATO, 2009, p. 126).

O LAI é um importante índice de referência para estimativa da densidade das copas das vegetações. Embora não considere a distribuição das folhas ao longo da altura, esta pode ser estimada com medições em diferentes alturas da vegetação que, somando-se a medições da geometria da copa, pode-se obter resultados de distribuição mais precisos.

O índice que considera esta distribuição vertical das folhas é o Índice de Densidade Foliar ou *Leaf Area Density* – LAD, que é determinado pela relação entre a área de folha pela quantidade total de folhas em 1 m³ de copa (grandeza tridimensional).

O índice LAI tem outras aplicações práticas importantes como o *Green Plot Ratio* ou GnPR, utilizado por planejadores urbanos em Singapura, definido como sendo “o LAI médio da vegetação de um local” (TAN, 2009), correspondendo à soma da área total de folhas dividida pela área do local (grandeza tridimensional).

Tan (2009) apresentou os estudos feitos neste trabalho, nos quais foram determinadas categorias para elementos arbóreos, tendo como critério permitir fácil obtenção de dados e incorporar as diversidades entre as vegetações, como diferentes usos na paisagem e fases de desenvolvimento. Estas categorias levam em conta valores estimados de LAI e da área de copa de cada vegetação, a saber: forma do dossel, densidade da copa, tamanho e forma da folha, forma da planta. Resultaram 4 grupos de plantas: árvores, palmeiras, arbustos e relva. Considerando-se as subcategorias e outros parâmetros, foram estimados os valores de LAI a serem adotados em caso de plantas sem medição específica. O objetivo deste estudo foi permitir a estimativa do GnPR em áreas vegetadas urbanas mesmo sem a medição do LAI, mas com auxílio de parâmetros pré-estabelecidos.

O processo de medição dos valores de LAI das vegetações tem se tornado cada vez mais simplificado por conta da evolução dos equipamentos. A definição de categorias de vegetação usando o LAI como critério poderia ser explorada para aplicações em diversas áreas relacionadas a elementos arbóreos.

Em um estudo de desempenho térmico baseado em árvores distintas para desenvolvimento urbano de Cairo, Fahmy et al. (2010) utilizaram o modelo ENVI-met® como plataforma para um parâmetro de modelagem. Para estudar o LAI, o banco de dados de plantas do programa foi utilizado com dados da Densidade de Área Foliar, ou *Leaf Area Density* (LAD). Duas árvores egípcias foram simuladas em 2 sítios urbanos, sendo um sem árvores e outro com árvores. Os valores de LAD foram calculados utilizando-se a definição de LAI para produzir sombra máxima no terreno no horário de pico. Diferentes registros meteorológicos mostraram melhorias no conforto de pedestres e no microclima com o uso das árvores, com cerca de 40 a 50% de interceptação de radiação direta e reduções nos fluxos superficiais ao redor das árvores. Os resultados mostraram que uma árvore de folhas planas, se não apresentar LAI mínimo 1, o sombreamento do solo não cumpre cerca de 50% interceptação da radiação direta e esse valor pode ser usado como uma referência para a seleção de árvores urbanas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

3.1.1 Caracterização geográfica e climática local

A cidade de Piracicaba está localizada na região centro-leste do Estado de São Paulo (22°43'30"S; 47°38'56"W); ocupa área de 1376,9 Km², com 364.571 habitantes, sendo 356.743 na área urbana e 7.828 na área rural (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2010).

O clima local é do tipo Cwa (classificação de Köppen-Geiger), com temperaturas máximas e mínimas médias anuais de 28,2°C e 15,1°C respectivamente, e precipitação média anual de 1.274 mm (LEB – ESALQ – USP).

Figura 23 – Situação da área de estudo: (A) a localização do Estado de São Paulo no Brasil; (B) a cidade de Piracicaba no centro-leste do Estado de São Paulo; (C) o perímetro urbano com localização da área de estudo

Fonte: Google imagens

Conforme Barretto (2006), o município de Piracicaba apresenta uma depressão na parte central de seu território que segue o sentido leste-oeste do curso do Rio Piracicaba. A declividade média foi calculada em 7,8%, com predominância de valores baixos: 42% da área apresenta declives menores do que 5%. A amplitude da altitude é de 360m: as regiões mais baixas estão a 420 m do nível do mar e as mais altas a 780 m, com altitude média de 528m.

No presente estudo, os pontos de interesse estão a uma altitude da ordem de 650m na Unimep (local de coleta dos dados em campo) e de 570 m na Esalq (local de coleta dos dados da estação meteorológica utilizados como referência), conforme indicado na Figura 24.

Figura 24 – Caracterização topográfica da área de estudo

Fonte: TOPODATA – Variáveis geomorfométricas derivadas de dados SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission), INPE, 2008

Barretto et al. (2006) retrata que a área rural do município, considerada aquela em que ainda não houve a consolidação urbana, é de aproximadamente 138.500 ha. Neste espaço, 46% é ocupado pela cana-de-açúcar e 25% por pastagens, atividades que resistem a mudanças há décadas. O clima regional também é favorável ao plantio de culturas anuais como o milho, soja e algodão, entre outros. O passivo ambiental é de no mínimo 11.000 ha, considerando áreas com ausência de cobertura florestal em Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), que são as áreas de reserva potencial fora de APP.

A área urbana consolidada de Piracicaba vem se expandindo nas últimas duas décadas numa taxa média de 150 a 200 m por ano a partir de seu perímetro, principalmente nas direções sudeste e noroeste. Essa expansão se dá sobre áreas que já se apresentam alteradas em relação à região mais caracteristicamente agrícola e que foi denominada de Região do Entorno Imediato (REI). A fragmentação fundiária, o maior impacto sobre os recursos florestais e o adensamento da malha viária são indicadores desse processo de conversão (BARRETTO, 2006, p.7).

Ainda conforme Barretto (2006), Piracicaba é atualmente uma cidade-polo de uma região com quase 3 milhões de habitantes, que representa 8% da população do estado, distribuída em 50 municípios dentro de uma bacia que abrange uma área de 12.400 Km².

3.1.2 Caracterização física do espaço estudado

Os levantamentos de campo foram realizados no Campus Taquaral da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Localizado no bairro Taquaral da cidade e ocupando área de mais de 360 mil metros quadrados, recebe diariamente cerca de 10 mil pessoas entre alunos, professores e funcionários; possui amplos espaços livres, alguns deles acompanhados por espécies distintas de árvores, flores e pássaros. Há muitas queixas de seus usuários por desconforto nos dias frios devido ao excesso de ventos, embora seja uma região com clima predominantemente quente ao longo do ano.

O Campus Taquaral localiza-se na divisa dos municípios de Piracicaba e Rio das Pedras, em uma área com entorno descampado, baixa ocupação territorial e distante da área adensada da cidade (Figura 25). O bairro com moradias próximo ao Campus é de padrão horizontal.

Figura 25 – UNIMEP Campus Taquaral e entorno: (a) em destaque e (b) foto do local
Fontes: (a) *Google Earth*, imagem de 16 abril 2015 e (b) da autora

3.2 Pontos de medição

Na figura 26 é possível localizar o Campus Taquaral (local das medições deste estudo) e a Estação Meteorológica de Piracicaba da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- LEB -ESALQ (local da coleta de dados meteorológicos utilizados como referência), distantes entre si em cerca de 9,4 Km. Ambos estão em área periférica no perímetro urbano, com entorno de perfil predominantemente horizontal e vegetado.

Figura 26 – Sítios de coleta de dados: UNIMEP Taquaral e ESALQ
Fonte: *Google Earth*, imagem de 26 maio 2015

3.2.1 Escolha e descrição das amostras

Os elementos arbustivo-arbóreos escolhidos para este estudo foram três espécies existentes no Campus, especialmente previstas para funcionarem como barreira aos ventos conforme informado pelo administrador do local, em três pontos distintos do Campus Taquaral:

- PINUS: *Pinus caribaea* Morelet

O Campus continha em parte de seu perímetro uma densa camada de Pinus, nas divisas sul e sudoeste, que atuavam como barreira parcial aos ventos de inverno (Figura 27a). Essas árvores foram removidas por consequência da remodelação ocorrida na área do Campus em 2008, quando parte de sua área foi vendida e loteada. Atualmente há Pinus apenas em volta da quadra de esportes do setor da Educação Física, onde foram feitas as medições desta espécie (Figura 27b). A área denominada Fazendinha foi mantida como área particular da UNIMEP.

Figura 27 – UNIMEP Taquaral (a) em 13 jun. 2007 antes da remodelação do Campus, e (b) em 16 abril 2015 após a remodelação
Fonte: Google Earth

Figura 28 – Pinus em volta da Quadra de Esportes: (a) foto externa em 29 maio 2012 e (b) foto interna em 23 jul. 2014

Fonte: da autora

- JASMIM: *Jasminum mesnyi* Hance

Foram plantadas como barreira em linhas contínuas nas laterais dos blocos das salas de aula. Foi escolhido um ponto de medição na lateral do Bloco 7, por ser um ponto mais próximo à área descampada e com menos interferências indesejáveis às medições.

Figura 29 – Jasmim ao lado do Bloco 7

Fonte: da autora, imagem de 23 jul. 2014

- BAMBU: *Pseudosasa japonica* (Steud.) Makino

Foi plantado em linhas contínuas na lateral do acesso ao edifício da Educação Física. São touceiras altas que são aparadas frequentemente.

Figura 30 – Bambu no Bloco de Educação Física
Fonte: da autora, imagem de 23 jul. 2014

3.2.2 Localização das barreiras e dos pontos de medição

Na figura abaixo estão localizados os pontos de medição das três espécies arbóreas A (Jasmim), B (Bambu) e C (Pinus), cada uma delas contendo três pontos: Ponto 1 – em campo aberto próximo; Ponto 2 – antes da barreira; Ponto 3 – depois da barreira.

Figura 31 – UNIMEP Taquaral – Pontos de medição: (A) Jasmim, (B) Bambu e (C) Pinus, sendo 3 pontos por vegetação: (1) em campo aberto, (2) antes da barreira e (3) após a barreira
Fonte: *Google Earth*, imagem de 09 ago. 2014, data de coleta de dados desta pesquisa

3.3 Coleta de dados

3.3.1 Medições das variáveis microclimáticas

Cada espécie estudada teve os dados do monitoramento microclimático colhidos durante três dias, das 9 às 21 horas. As medições foram feitas até as 21 horas porque é um horário de atividades no local quando ocorrem ventos frios; também por ser o horário de entrada de dados no programa de simulação utilizado.

As variáveis foram aferidas concomitantemente em 3 pontos por espécie: Ponto 1 (campo aberto próximo), Ponto 2 (antes da barreira arbórea) e Ponto 3 (após a barreira).

Foram monitoradas as seguintes variáveis: Temperatura do ar (°C) e umidade do ar (%) a cada 5 minutos, e velocidade do ar (m/s) a cada 3 minutos.

As medições foram feitas em agosto e setembro de 2014.

Os equipamentos foram fixados em tripés a 1,5 m de altura, com ajustes quando necessário, descritos em cada caso.

3.3.2 Equipamentos utilizados

Cada estação de medição foi composta dos seguintes equipamentos devidamente calibrados:

- Um medidor de temperatura e umidade relativa do ar, modelo *Logger Type ThermaData*, protegido da radiação direta em caixa ventilada, registrando a cada 5 minutos;
- Um anemômetro / termômetro digital Testo 445 com sensor registrando a cada 3 minutos; registrador alimentado por bateria externa e protegido por caixa de isopor.

3.3.3 Condições de medição e configuração das barreiras

A. JASMIM

As medições foram efetuadas nos dias 06, 07 e 08 de agosto de 2014, com céu claro e tempo estável. Os equipamentos ficaram todos a 1,5 m de altura por tratar-se de terreno plano (Figura 32).

Figura 32 – JASMIM: Configuração da barreira
Fonte: da autora

Figura 33 – JASMIM: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Ponto 2 (antes da barreira)
Fonte: da autora, imagens de 07 ago. 2014

Figura 34 – JASMIM: (a) Ponto 3 (após a barreira) e (b) Detalhe da espécie
Fonte: da autora, imagens de 07 ago. 2014

B. BAMBU

As medições foram efetuadas nos dias 09, 11 e 15 de agosto de 2014, com céu claro e tempo estável. Os dias intermediários tiveram pancadas de chuva à tarde e os dados colhidos não foram considerados. Os equipamentos dos Pontos 1 e 3 ficaram a 1,5 m de altura por trata-se de terreno plano. O Ponto 2 (antes da barreira) teve o anemômetro alongado em 50 cm para equiparar-se à altura do Ponto 3 (depois da barreira), por estar em desnível (Figura 35).

Figura 35 – BAMBU: Configuração da barreira

Figura 36 – BAMBU: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Passagem do Ponto 1 para o Ponto 2
Fonte: da autora, imagens de 11 ago. 2014

Figura 37 – BAMBU: (a) Ponto 2 (antes da barreira) e (b) Ponto 3 (após a barreira)
 Fonte: da autora, imagens de 11 ago. 2014

Figura 38 – BAMBU: (a) Pontos 2 e 3 e (b) Área entre o Bambu e o Pinus
 Fonte: da autora, imagens de 11 ago. 2014

C. PINUS

As medições foram efetuadas nos dias 06, 08 e 09 de setembro de 2014, com céu claro e tempo estável. Estas medições não foram efetuadas na sequência do Bambu pela indisponibilidade de parte dos equipamentos. Nos Pontos 1 e 3, os coletores dos dados ficaram todos a 1,5 m de altura por tratar-se de terreno plano. O Ponto 2 (antes da barreira) teve o anemômetro elevado em 1,5 m para equiparar-se à altura do Ponto 3 (depois da barreira), para compensar o desnível entre eles (Figura 39).

Figura 39 – PINUS: Configuração da barreira

Figura 40 – PINUS: (a) Ponto 1 (campo aberto) e (b) Ponto 3 (após a barreira)
Fonte: da autora, imagens de 06 set. 2014

Figura 41 – PINUS: (a) Ponto 2 (antes da barreira) e (b) Ponto 3 (após a barreira)
Fonte: da autora, imagens de 06 set. 2014

3.3.4 Medição do LAI

No presente trabalho, os valores de LAI foram medidos em campo nas três vegetações com o equipamento *LAI-2000 Plant Canopy Analyzer* (método óptico), durante o período da coleta dos dados microclimáticos. Foram feitas as medições acima e abaixo da copa de cada vegetação, sendo 3 medições por planta com 10 repetições cada. Com os dados coletados, o equipamento fez a estimativa do LAI médio automaticamente. Os resultados estão no item 4.1.

Figura 42 – Equipamento LAI-2000 *Plant Canopy Analyzer*

Fonte: Disponível em: <<http://www.licor.com/corp/history.html>>. Acesso em: 27 maio 2015

Os dados de entrada no programa utilizado consideram a distribuição em altura na copa (LAD), cujos valores foram previstos a partir dos dados obtidos de LAI nas medições para cada vegetação, através de estimativas das distribuições.

3.3.5 Dados da Estação Meteorológica da ESALQ

Os dados coletados na Base de Dados da Estação Meteorológica Automática – Área de Física e Meteorologia da LEB – ESALQ - USP foram utilizados para comparação com os dados colhidos em campo aberto na UNIMEP durante as medições.

Os dados disponibilizados pela estação automática da ESALQ foram registrados a cada 15 minutos e os equipamentos situam-se à mesma altura do solo das medições efetuadas na UNIMEP (1,5 m do piso).

Foram comparados os dados de temperatura do ar, umidade do ar e velocidade do vento, obtidos no mesmo período.

3.3.6 Dados extras

Dentro do período das medições microclimáticas no Pinus (no dia 05 de setembro de 2014) foram colhidos dados de velocidade do vento a cada 3 segundos durante 50 minutos, onde é possível verificar o perfil das rajadas de vento, em dois pontos de medição: em campo aberto (Ponto 1) e antes da barreira (Ponto 2). Os resultados estão no item 4.9.

3.4 Simulação computacional

3.4.1 O modelo ENVI-met®

O modelo ENVI-met® v. 3.1 foi utilizado para simulação da área estudada. Trata-se de um modelo projetado para simular interações da superfície com o ar e com o ambiente (DOBBERT, 2014).

Para Bruse (2009), criador do modelo, o principal objetivo é que o usuário tenha facilidade para carregar e iniciar suas simulações sem gastar muito tempo, trabalhando com a própria interface de forma simplificada.

O *software* ENVI-Met® é um modelo microclimático tridimensional proposto por Bruse em 1998 (SHINZATO, 2009). O modelo proporciona interações superfície - vegetação – atmosfera, calculando o balanço de energia para ondas curtas e longas por meio das variáveis: radiação, reflexão de edifícios e vegetação, fluxo do ar, temperatura, umidade, turbulência local e sua taxa de dissipação. Também determina as temperaturas de superfície (pisos e envoltória dos edifícios), as trocas de água e calor no solo e parâmetros biometeorológicos, como a temperatura efetiva e o *Predicted Mean Vote* – PMV (FANGER⁴, 1972 apud SHINZATO, 2009). Trata-se de um modelo de acesso gratuito, atualmente utilizado em trabalhos de pesquisa na área de Clima Urbano.

Segundo Bruse⁵ (1998) apud Szücs (2013), o programa consiste de 5 grupos de modelagem:

⁴ FANGER, P.O. **Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering**. New York: McGraw Hill, 1972.

⁵ BRUSE, M.; FLEER, H. Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. **Environmental Modelling and Software**, v. 13, p. 373–384, 1998.

- Atmosférico: calcula o movimento do ar, a turbulência tridimensional, temperatura do ar, umidade relativa do ar e considera obstáculos como edifícios e vegetação.
- Superficial: calcula emissão de ondas longas e a reflexão da radiação de ondas curtas por diferentes superfícies, considerando as radiações de onda curta e de onda longa. Considera o albedo das superfícies, o sombreamento em função da trajetória solar e calcula a evaporação do vapor d'água da vegetação, bem como a transpiração do solo, levando em conta a modificação dos fluxos de ar pela vegetação.
- Da vegetação: calcula a temperatura foliar e o balanço energético das folhas considerando parâmetros fisiológicos e meteorológicos. Para caracterizar a vegetação, o programa utiliza-se da Densidade de Área Foliar ou *Leaf Area Density* (LAD).
- Biometeorológico: calcula o Voto Médio Previsto ou *Predicted Mean Vote* (PMV) com base nos dados meteorológicos.
- Do solo: calcula processos no solo que levam em conta a combinação de superfícies naturais e artificiais na área urbana estudada, além de calcular as trocas entre massas de água e o meio ambiente.

Este modelo foi adotado na presente pesquisa por permitir a obtenção de dados resultantes de intensidade e direção dos ventos a partir da modelagem da área estudada considerando a presença da vegetação. Além disso, permite a inserção dos valores de LAI medidos nos locais onde estão os elementos arbóreos estudados. A visualização do resultado é feita com a ferramenta Leonardo, que faz parte do programa.

3.4.2 Dados de entrada no programa ENVI-met®

Os dados do modelo foram calibrados para o local de estudo conforme indicado na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados de entrada nas simulações do modelo ENVI-met®

DADOS DE ENTRADA (Vento Sudeste)	VALORES
Dia de início da simulação (DD/MM/YYYY)	07/08/2014
Hora de início da simulação (HH:MM:SS)	21:00:00
Total de horas de simulação	48:00
Salvar modelo a cada (min)	60
Velocidade do vento (m.s^{-1})	3,9
Direção do vento ($^{\circ}$)	158 e 90
Rugosidade z_0 no ponto de referência	0,1
Temperatura atmosférica inicial (K)	299,59
Umidade específica a 2500 m (g/Kg)	3,2
Umidade relativa a 2 m (%)	81,2
Tamanho do modelo (m)	670 x 530
Tamanho da malha utilizada (grids)	150 x 189
Fator de ajuste de radiação	0,72

Foram feitas duas sequências de simulações, variando entre elas apenas o ângulo de incidência dos ventos: Sudeste (158°) na primeira sequência e Leste (90°) na segunda. Os demais dados foram mantidos. A página de configuração dos dados de entrada do ENVI-met® para as simulações com vento Sudeste (158°) estão no Apêndice A.

As simulações foram feitas por um período de 48 horas e foram desprezadas as primeiras 6 horas por tratar-se de período de estabilização dos dados conforme recomendado por Assis et al. (2013). O período de simulação variou de 07/08/2014 às 21h00 até 09/08/2014 às 21h00.

Os dados de entrada foram obtidos da seguinte forma:

- Imagem de 09/08/2014 obtida no *Google Earth* com recorte do polígono com ferramenta de captura; conversão para formato (bmp); adequação da taxa de proporção da imagem para modelo a ser utilizado. A imagem foi recortada nas dimensões 670 x 530 m. Foi definida a relação metros / pixel com a imagem resultante correspondente a 3,5 x 3,5 m / grid.
- Velocidade do vento (entrada) = conforme valor medido na data simulada (no ponto P1, série Jasmim, às 21h00).

- Direção do vento = dados da estação da ESALQ. Direção predominante na data da medição: Sudeste = 158° . Posteriormente foi feita uma segunda simulação considerando ventos com ângulo de incidência 90° (Leste) que também ocorrem com frequência.
- Umidade relativa = obtida na coleta de campo no mesmo ponto e horário.
- Temperatura atmosférica inicial e Umidade específica a 2500 m = do site da Universidade de Wyoming⁶.
- Dados de vegetação: no banco de dados de vegetação do programa ENVI-met®, os valores de densidade de copa (LAD) são distribuídos em 10 camadas, cujo total resulta no valor de LAI da copa. Desta forma, os valores das 10 camadas foram estimados de acordo com a geometria da copa, totalizando o LAI médio medido para cada vegetação.

Na obtenção do LAD a partir do LAI, na distribuição em altura deve-se considerar a altura do tronco sem copa (trecho com $\text{LAI} = 0$), distribuindo-se os valores medidos apenas no trecho de altura com copa.

Figura 43 – Distribuição estimada dos valores de LAD a partir dos LAI medidos em cada vegetação

O banco de dados de vegetação com o acréscimo das três espécies estudadas pode ser visto no Apêndice B.

⁶ UNIVERSITY OF WYOMING, College of Engineering, Department of Atmospheric Science.

Disponível em: <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em: 29 abril 2015.

3.4.3 Modelagem da área

A modelagem da área estudada foi feita com base na foto aérea com os pontos de medição da Figura 31. As alturas dos edifícios foram obtidas por observações in loco e suporte de imagens do *Google Street View*.

3.5 Análise estatística dos dados

3.5.1 Critérios e considerações

Para quantificar a atenuação da velocidade do vento pela vegetação, faz-se necessário considerar sempre a diferença entre o maior e o menor valor de velocidade do vento, entre os valores ‘antes da barreira’ e ‘depois da barreira’. Porém em alguns instantes nas medições houve inversão do sentido do vento, e o maior valor resultou ‘após a barreira’. Para manter a coerência nos resultados, os dados foram corrigidos para que sempre fosse considerado o maior valor antes do menor, uma vez que o foco principal desta pesquisa foi conhecer valores de atenuação das barreiras e não os valores absolutos das velocidades do vento próximo às barreiras.

3.6 Análises comparativas

Para comparação entre os elementos arbóreos quanto à atenuação na passagem dos ventos, cada dia medido por planta foi considerado como uma repetição.

Os valores medidos em campo que foram comparados com os registrados na ESALQ não sofreram as alterações descritas no item 3.5.1, pois aqui os dados utilizados são os medidos em campo aberto e não os próximos às barreiras. Os resultados estão no item 4.4.1.

As comparações entre os valores medidos em campo e os registrados na ESALQ também foram feitas para a temperatura do ar (°C) e umidade relativa do ar (%). Os resultados estão nos itens 4.4.2 e 4.4.3.

3.7 Análise pelos parâmetros de conforto térmico

Os resultados obtidos em campo foram analisados conforme parâmetros de conforto térmico constantes no item 2.2.2; ver item 4.7.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LAI medidos

Os valores de LAI medidos nos 3 elementos vegetais estudados apresentaram os seguintes resultados:

Tabela 6 – Valores de LAI resultantes a partir de 3 medições por espécie, com 10 repetições por medição

Nome comum	LAI 1	LAI 2	LAI 3	Média	Desvio Padrão
Pinus	3,44	3,78	4,32	3,8	0,44
Jasmim	5,21	5,16	4,91	5,1	0,16
Bambu	5,96	5,95	5,96	6,0	0,01

Figura 44 – Valores de LAI resultantes

Os dados de LAI medidos foram comparados aos valores de atenuação da velocidade do vento nas 3 vegetações e os resultados podem ser vistos no item 4.8.

4.2 Análise dos resultados – Ventos

Foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis para comparações das áreas analisadas; seus resultados não apresentaram diferenças significativas por ausência de intensidade amostral. Para localização das diferenças foi aplicado o teste de Tukey, $p\text{-valor} < 0.05$. No teste de Tukey, a diferença entre os grupos existe quando as diferenças entre as médias forem maiores que o valor da diferença mínima significativa (Dms).

Fazendo-se a análise das velocidades dos ventos por vegetação, foram encontradas seguintes variações significativas:

- BAMBU

Na velocidade média do vento houve diferença significativa entre os 3 pontos de medição. Na velocidade máxima e na amplitude do vento houve diferença significativa entre os Pontos 1 e 2.

Tabela 7 – Resultados - BAMBU

Dado	R ²	Coef. Variância	Média	Valor de F	Pr > F	Dms ^(a)
V média	0.983826	5.927734	0.733643	182.48	<.0001	0.0787
V máxima	0.859133	39.46810	2.324444	18.30	0.0028	0.6695
Amplitude	0.831170	49.44479	2.232222	14.77	0.0048	0.7699

V média		
Teste de Tukey	Média	Ponto
A	0.78242	1
B	0.51355	2
C	0.29338	3

V máxima		
Teste de Tukey	Média	Ponto
A	1.3973	1
B	0.5329	2
B	0.1012	3

Amplitude		
Teste de Tukey	Média	Ponto
A	1.3715	1
B	0.4541	2
B	0.0390	3

(a) Dms= diferença mínima significante = médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade

- JASMIM

Na velocidade máxima do vento e na amplitude, houve diferença significativa entre os 3 pontos de medição.

Tabela 8 – Resultados - JASMIM

Dado	R ²	Coef. Variância	Média	Valor de F	Pr > F	dms
V máxima	0.897176	11.70339	3.328889	26.18	0.0011	0.3357
Amplitude	0.914759	10.69442	3.237778	32.19	0.0006	0.2998

V máxima		
Teste de Tukey	Média	Ponto
A	1.5346	1
B	1.1568	2
C	0.7433	3

Amplitude		
Teste de Tukey	Média	Ponto
A	1.51213	1
B	1.11714	2
C	0.72801	3

- PINUS

Na amplitude, houve diferença significativa entre os Pontos 1 e 3.

Tabela 9 – Resultados - PINUS

Dado	R ²	Coef. Variância	Média	Valor de F	Pr > F	dms
Amplitude	0.737096	15.18341	3.312000	8.41	0.0182	0.478

Amplitude			
Teste de Tukey	Média	Ponto	
A	1.5880	1	
B	1.2317	2	
B	0.9504	3	

Conforme explicitado, fazendo-se a análise da variância da velocidade do vento por vegetação, foram encontradas diferenças significativas entre os 3 pontos de medição no Bambu para velocidade média, e no Jasmim para velocidade máxima e para amplitude. No Pinus houve variação significativa apenas entre os Pontos 1 e 3 na amplitude, indicando menor eficiência deste elemento na barragem aos ventos em relação às outras vegetações estudadas.

Outras análises foram feitas com o *software* Minitab Versão 17, cujos resultados estão a seguir.

Na Figura 45 as intensidades do vento estão agrupadas por vegetação, nos 3 pontos medidos. Pode-se constatar que o Bambu apresenta mais observações de baixas velocidades do vento.

Figura 45 – Intensidades do vento por vegetação

A Figura 46 a seguir apresenta as observações resultantes por planta e por ponto medido. É possível verificar que entre os Pontos 2 (antes da barreira) e 3 (depois da barreira), o Bambu apresenta maior diferença nas velocidades do vento.

Figura 46 – Intensidades do vento por vegetação e por ponto medido

Nos gráficos das Figuras 47 a 49 observa-se os ventos resultantes nas medições in loco, por vegetação, ao longo dos 3 dias, em sequência. As 3 curvas de cada gráfico correspondem às velocidades nos Pontos 1 (campo aberto), 2 (antes da barreira) e 3 (depois da barreira). Os valores dos Pontos 2 e 3 foram corrigidos conforme esclarecido no item 3.5.1.

Figura 47 – Ventos – JASMIM – Pontos 1 a 3 – Dias 06, 07 e 08 ago. 2014

Figura 48 – Ventos – BAMBU – Pontos 1 a 3 – Dias 09, 11 e 15 ago. 2014

Figura 49 – Ventos – PINUS – Pontos 1 a 3 – Dias 06, 08 e 09 set. 2014

Pode-se observar que os valores medidos em campo aberto apresentam picos bem mais acentuados que os valores medidos próximos às barreiras.

Para melhor visualização da influência das barreiras vegetais, nas Figuras 45 a 47 estão retratados apenas os ventos registrados nos Pontos 2 (antes da barreira) e 3 (depois da barreira).

Figura 50 – Ventos – JASMIM – Pontos 2 e 3 - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014

Figura 51 – Ventos – BAMBU – Pontos 2 e 3 - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014

Figura 52 – Ventos – PINUS – Pontos 2 e 3 - Dias 06, 08 e 09 set. 2014

Os ventos medidos no Pinus são mais intensos; as diferenças mais perceptíveis estão entre o Bambu e o Pinus, tanto na intensidade dos ventos quanto nas diferenças entre as medições antes e depois da barreira, indicando novamente a maior eficiência do Bambu na barragem dos ventos.

4.3 Análise dos resultados – Ventos x Temperaturas do ar

Nas figuras 53 a 61 estão os resultados da relação entre ventos e temperaturas do ar, nos três pontos de medição de cada vegetação. Foram considerados os dados médios horários das duas grandezas. Cada gráfico contém separadamente os dados dos três dias (denominados d1 a d3) medidos por vegetação.

Pode-se observar uma tendência de maiores temperaturas do ar quando ocorrem menores velocidades dos ventos.

Figura 53 – Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 1

Figura 54 – Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 2

Figura 55 – Ventos x Temperaturas do ar – Série JASMIM – Ponto 3

Figura 56 – Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 1

Figura 57 – Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 2

Figura 58 – Ventos x Temperaturas do ar – Série BAMBU – Ponto 3

Figura 59 – Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 1

Figura 60 – Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 2

Figura 61 – Ventos x Temperaturas do ar – Série PINUS – Ponto 3

4.4 Análise dos resultados – Comparativo com registros da ESALQ: Ventos, Temperatura e Umidade do ar

4.4.1 Ventos

Foram feitos os comparativos entre os dados registrados na UNIMEP e na ESALQ nos dias correspondentes às medições em campo, a cada 15 minutos. Os dados considerados da UNIMEP são os obtidos nos Pontos 1 (campo aberto) por vegetação. Os resultados estão apresentados nas Figuras 62 a 64.

Figura 62 – Ventos UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014

Figura 63 – Ventos UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014

Figura 64 – Ventos UNIMEP x ESALQ – Série PINUS - Dias 06, 08 e 09 set. 2014

Observa-se que os valores registrados nas duas localidades têm configurações semelhantes; na UNIMEP as rajadas são mais intensas, possivelmente por ser área mais descampada e abrigar menos elementos arbóreos de maior porte do que a ESALQ.

4.4.2 Temperaturas do ar

Os valores de temperatura do ar registrados nos dois sítios estão nas Figuras 65 a 67.

Constata-se considerável correspondência entre os valores obtidos.

Figura 65 – Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014

Figura 66 – Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014

Figura 67 – Temperatura do ar UNIMEP x ESALQ – Série PINUS - Dias 06, 08 e 09 set. 2014

4.4.3 Umidade relativa do ar

A seguir estão as Figuras 68 a 70 com os resultados das medições de umidade relativa do ar nos dois sítios.

Os resultados obtidos na ESALQ são um pouco maiores que os encontrados na UNIMEP, possivelmente devido ao fato de haver na ESALQ maior massa de vegetação no entorno do ponto de medição.

Figura 68 – Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série JASMIM - Dias 06, 07 e 08 ago. 2014

Figura 69 – Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série BAMBU - Dias 09, 11 e 15 ago. 2014

Figura 70 – Umidade relativa do ar UNIMEP x ESALQ – Série PINUS - Dias 06, 08 e 09 set. 2014

4.5 Simulações no ENVI-met® - Dados de saída

Os principais dados de saída escolhidos foram velocidade e direção dos ventos. Os 4 resultados a seguir correspondem ao ocorrido na altura dos pedestres ($z = 1,60\text{m}$), em 2 horários (9h00 e 21h00), com ventos incidentes SE (158°) e ventos E (90°).

Figura 71 – Simulação – Ventos SE (158°) – 09/08/2014 às 9h00

Figura 72 – Simulação – Ventos SE (158º) – 09/08/2014 às 21h00

Figura 73 – Simulação – Ventos E (90°) – 09/08/2014 às 9h00

Figura 74 – Simulação – Ventos E (90°) – 09/08/2014 às 21h00

4.6 Análise comparativa entre os dados medidos e os simulados

As Figuras 75 a 77 apresentam os resultados de velocidades do vento das simulações nos três pontos, por vegetação, dos ventos incidentes a Sudeste (158°). Em seguida, tomando-se como base valores hora a hora, as Figuras 78 e 79 mostram os resultados dos dados medidos (linhas cheias) e dos simulados (linhas tracejadas) para um mesmo período.

Figura 75 – Vento simulado – JASMIM.

Ficaram mantidas as proporções entre os Pontos 1, 2 e 3.

Figura 76 – Vento simulado – BAMBU.

Na medição do Bambu a situação foi invertida, com velocidades mais altas no Ponto 3, indicando que os ventos estavam incidindo na direção oposta da inicialmente prevista.

Figura 77 – Vento simulado – PINUS.

Observa-se de uma maneira geral que nas simulações ficaram mantidas as proporções entre os Pontos 1, 2 e 3 de cada vegetação: no caso do Jasmim e do Pinus está bem evidente (Figuras 75 e 77), com maior intensidade dos ventos no Ponto 1 (campo aberto) em relação aos Pontos 2 e 3; no caso do Bambu a situação foi invertida, com velocidades mais altas no Ponto 3, indicando que os ventos estavam incidindo na direção oposta (Figura 76).

Ainda quanto ao Bambu, houve muita proximidade entre os valores resultantes no Ponto 1 (campo aberto) e no Ponto 2, principalmente no segundo dia de simulação; uma provável justificativa é o fato de haver um afunilamento entre estes pontos (ver Figura 36 b), e uma vez que os ventos incidiram da direção oposta, o modelo considerou o efeito da barreira mas não diferenciou significativamente as diferenças após a barreira. De qualquer maneira, o efeito das barreiras fica evidenciado em todas as simulações.

Os ventos resultantes nas simulações obviamente não consideram as rajadas que ocorrem nas medições em campo. Para viabilizar uma comparação entre os resultados medidos e os simulados, considerou-se as velocidades médias horárias dos ventos medidos em campo, obtidas pela média aritmética entre o máximo e o mínimo colhidos durante o intervalo da hora considerada.

Os resultados estão nas Figuras 78 e 79. O primeiro dia simulado (08 ago 2014) corresponde ao dia de medição no Jasmim; no segundo dia (09 ago 2014) foi

feita a medição no Bambu. Os dados dos ventos medidos estão acompanhados das respectivas curvas de tendência.

Figura 78 – Vento medido (MED) x simulado (SIM) – 08 ago. 2014

Figura 79 – Vento medido (MED) x simulado (SIM) – 09 ago. 2014

A ferramenta de simulação mostrou-se eficiente para indicar quais os pontos de maior ou menor fluxo de ventos no local, e também para obter uma relação entre os pontos avaliados, podendo auxiliar na escolha de estratégias e setores que requerem atenuação dos ventos.

4.7 Análise dos resultados – Conforto térmico

Nas figuras 80 a 88 estão os resultados dos dados medidos para as 3 vegetações, aplicados em índices de conforto tomados como referência, em três horários: às 10h00, às 15h00 e às 20h00, nos pontos P2 e P3 (antes e depois da barreira). Foram considerados os dados médios horários das três grandezas: ventos, temperatura do ar e umidade relativa do ar (médias dos 3 dias).

4.7.1 Carta Bioclimática (Figura 7)

Figura 80 – Carta Bioclimática - JASMIM

Figura 81 – Carta Bioclimática - BAMBU

Figura 82 – Carta Bioclimática - PINUS

Observa-se que no caso do Jasmim os resultados ficaram mais próximos da zona de conforto. No caso do Bambu e do Pinus as diferenças foram menos significativas.

4.7.2 Nomograma de Temperatura Efetiva (Figura 8)

Figura 83 – Nomograma de Temperatura Efetiva - JASMIM

Figura 84 – Nomograma de Temperatura Efetiva - BAMBU

Figura 85 – Nomograma de Temperatura Efetiva - PINUS

Com o uso do nomograma também observa-se que as diferenças foram mais significativas no caso do Jasmim.

4.7.3 Diagrama de Conforto para indivíduos em movimento (Figura 9)

Nos horários de 10h00 e 15h00 foram avaliadas as condições de conforto ao sol e à sombra. As curvas consideram indivíduos em movimento; os pontos saem da zona de conforto nos horários mais quentes, especialmente ao sol, com baixas velocidades do vento.

Figura 86 – Diagrama de Conforto - JASMIM

Figura 87 – Diagrama de Conforto - BAMBU

Figura 88 – Diagrama de Conforto - PINUS

4.8 Relação entre LAI e barreiras arbóreas

Os resultados a seguir foram obtidos com a aplicação do *software* Minitab versão 17. A Tabela 10 apresenta resultados obtidos nas medições em campo, nas relações entre os Pontos 2 e 3 por vegetação, buscando avaliar o desempenho que apresentaram quanto ao funcionamento como barreira aos ventos.

Tabela 10 – Ventos resultantes entre os Pontos 2 e 3 x LAI por vegetação

Rótulos de Linha	Média de VENTO (m/s)	Var de VENTO (m/s)	DesvPad de VENTO (m/s)	Soma de VENTO (%) ^(a)	LAI
BAMBU	0,51	0,11	0,33		5,96
Ponto 2	0,67	0,11	0,34		
Ponto 3	0,34	0,04	0,21	-49,29%	
JASMIM	0,82	0,46	0,67		5,09
Ponto 2	1,07	0,52	0,72		
Ponto 3	0,58	0,27	0,52	-45,78%	
PINUS	1,43	0,49	0,70		3,85
Ponto 2	1,68	0,57	0,75		
Ponto 3	1,19	0,29	0,54	-29,10%	
TOTAL GERAL	0,92	0,50	0,70		

^(a) Soma de vento = % de redução da velocidade do vento entre os Pontos 2 (antes) e 3 (após a barreira), por vegetação, em função de um valor incidente de 100%

Os valores do item Soma de Vento da Tabela 10 foram relacionados com os valores de LAI medidos por planta conforme mostra a Figura 71.

Figura 89 – Gráfico de Tendência - LAI x % de atenuação dos ventos

A tendência verificada no gráfico acima mostra-se compatível com a busca da viabilidade de adoção do LAI como parâmetro na previsão de resultados de desempenho de elementos vegetais como barreira aos ventos.

4.9 Outras considerações

As Figuras 72 e 73 apresentam os valores de ventos instantâneos medidos a cada 3 segundos por 50 minutos, nos Pontos C1 e C2 respectivamente. Os valores foram medidos em períodos com quase uma hora de intervalo; no entanto pode-se observar uma clara diferença de picos de rajada mais intensos nas medições em campo aberto.

Figura 90 – Rajadas de vento – Ponto C1 (Pinus – Campo aberto)

Figura 91 – Rajadas de vento – Ponto C2 (Pinus – Antes da barreira)

5 CONCLUSÕES

É de conhecimento geral que estudos que envolvem medição de ventos são complexos, uma vez que sua variabilidade é instantânea e depende de múltiplos fatores. No entanto faz-se necessário elaborar estudos constantes a respeito, para buscar alguns parâmetros que auxiliem projetistas e outros profissionais que dele dependam para desenvolver suas atividades.

Em relação aos objetivos propostos no presente estudo, pode-se dizer que a abordagem do tema, as pesquisas e as medições efetuadas foram úteis para conceber uma visão inicial a respeito da relação entre vegetação de barreira aos ventos e os índices avaliados. Foi possível quantificar a atenuação dos ventos pelos três arranjos de vegetação propostos e a correspondência entre seus resultados.

Os resultados mostraram evidências de que a busca da correspondência entre o LAI e o desempenho da vegetação como barreira aos ventos apresentou-se como um caminho promissor para pesquisas e estudos mais aprofundados; o método não pôde ser conclusivo por ausência de intensidade amostral.

Na medida em que o tema estudado possa ser melhor avaliado, novas contribuições serão obtidas para aplicação de melhorias no planejamento urbano de praças, parques e outros espaços urbanos abertos. A silvicultura urbana seria beneficiada com maior exploração de estudos dessa natureza.

É importante ressaltar que para quantidades amostrais mais significativas faz-se necessário a obtenção de mais equipamentos de medição, especialmente anemômetros, para permitir a medição simultânea em uma quantidade maior de pontos, além das importantes repetições.

O banco de dados da ESALQ já contém um grande número de resultados de LAI para espécies vegetais, medidos in loco; esses dados poderiam ser explorados em estudos futuros associados a barreiras arbóreas.

A predição de resultados em simulações no programa ENVI-met® também demonstrou ser um caminho de importância significativa para estudo entre ventos e composições arbóreas e que portanto merece ser aprofundado.

REFERÊNCIAS

ALI-TOUDERT, F.; MAYER, H. Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons. **Solar Energy**, Freiburg, v. 81, p. 742-754, 2007.

ASSIS, E.S.; SIRQUEIRA, C.A.; BAMBERG, A.M. Influência da vegetação no microclima em ambiente simulado controlado. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12.; ENCONTRO LATINOAMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 8., 2013, Brasília. **Anais...** Brasília: ENCAC, 2013. p. 324-338.

BARRETTO, A. G. O. P.; SPAROVEK, G.; GIANNOTTI, M. **Atlas Rural de Piracicaba**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais – IPEF, 2006, 76 p.

BITOG, J.P.; LEE, I.-B.; HWANG, H.-S.; SHIN, M.-H.; HONG, S.-W.; SEO, I.-H.; KWON, K.-S.; MOSTAFA, E.; PANG, Z. Numerical simulation study of a tree windbreak. **Biosystems Engineering**, Seoul, v. 3, p. 40-48, 2012.

BLOCKEN, B.; JANSSEN, T.; VAN HOOFF, T. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: general decision framework and case study for the Eindhoven University campus. **Environmental Modelling & Software**, Eindhoven, v. 30, p. 15-34, 2012.

BONAN, G. **Ecological climatology**: concepts and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2002, 690 p.

BOTTILLO, S.; VOLLARO, A.D.L.; GALLI, G.; VALLATI, A. CFD modeling of the impact of solar radiation in a tridimensional urban canyon at different wind conditions. **Solar Energy**, Rome, v. 102, p. 212-222, 2014.

BOURDIN, P.; WILSON, J.D. Windbreak aerodynamics: is computational fluid dynamics reliable? **Boundary-Layer Meteorology**, Edmonton, v. 126, n. 2, p. 181-208, 2007.

BROWN, R.D.; GILLESPIE, T.J. **Microclimatic landscape design**: creating thermal comfort and energy efficiency. New York: John Wiley, 1995.193 p.

BRUSE, M. **ENVI-met 3.1**: online manual. 2009. Disponível em <<http://www.envi-met.com/documents/onlinehelpv3/helpindex.htm>>. Acesso em: 19 maio 2015.

CHEN, L.; NG, E. Outdoor thermal comfort and outdoor activities: a review of research in the past decade. **Cities**, Hong Kong, v. 29, p. 118-125, 2012.

CHU, C.-R.; CHANG, C.-Y.; HUANG, C.-J.; WU, T.-R.; WANG, C.-Y.; LIU, M.-Y. Windbreak protection for road vehicles against crosswind. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Taiwan, v. 116, p. 61-69, 2013.

DOBBERT, L.Y. **Arborização na cidade de Campinas/SP: percepção e conforto.** Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

DONG, Z.; LUO, W.; QIAN, G.; LU, P.; WANG, H. A wind tunnel simulation of the turbulence fields behind upright porous wind fences. **Journal of Arid Environments**, Lanzhou, v. 74, p. 193-207, 2010.

ERELL, E.; PEARLMUTTER, D.; WILLIAMSON, T. **Urban microclimate: designing the spaces between buildings.** London: MPG Books, 2011. 266 p.

FAHMY, M.; SHARPLES, S.; YAHYA, M. LAI based trees selection for mid latitude urban developments: a microclimatic study in Cairo, Egypt. **Building and Environment**, Cairo, v. 45, p. 345-357, 2010.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo.** 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001. 243 p.

GAO, Y.; YAO, R.; LI, B.; TURKBEYLER, E.; LUO, Q.; SHORT, A. Field studies on the effect of built forms on urban wind environments. **Renewable Energy**, Cambridge, v. 46, p. 148-154, 2012.

GEIGER, R. **Manual de climatologia: o clima da camada de ar junto ao solo.** Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1960. 556 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2010.**

Disponível em:

<http://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/tabelas_pdf/tab1.pdf>. Acesso em: 19 maio 2015.

JONES, H. **Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology.** 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. 428 p.

JUNG, W.-S.; PARK, J.-K.; LEE, H.-W.; KIM, E.-B.; CHOI, H.-J. Wind speed variation over the leeward region according to vegetation under the strong wind. In: INTERNATIONAL CONFERENCE WIND EFFECTS ON TREES, 2., 2009, Freiburg. **Proceedings...** Freiburg: Univ. Freiburg, Ber. Meteor. Inst., 2009. p. 255-261.

KOENIGSBERGER, O.H.; INGERSOLL, T.G.; MAYHEW, A.; SZOKOLAY, S.V. **Viviendas y edificios en zonas cálidas y tropicales.** London; Madrid: Paraninfo, 1977. 328 p.

KUHNS, M. **Planting trees for energy conservation: the right tree in the right place.** Utah State of University, 2008. Disponível em: <<http://forestry.usu.edu/html/city-and-town/tree-selection/planting-trees-for-energy-conservation-the-right-tree-in-the-right-place>>. Acesso em: 28 maio 2015.

LEE, K.H.; EHSANI, R.; CASTLE, W.S. A laser scanning system for estimating wind velocity reduction through tree windbreaks. **Computers and Electronics in Agriculture**, Florida, v. 73, p. 1-6, 2010.

LOMBARDO, M.; BIAS, E.S.; BAPTISTA, G.M.M. Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. p. 1741-1748.

LOPES, A.; VASCONCELOS, J. **A influência da morfologia urbana na modificação das brisas do estuário do Tejo na zona oriental de Lisboa.** Lisboa: Universidade de Lisboa, Faculdade de Letras, Centro de Estudos Geográficos, 2007. 360 p.

MASCARÓ, L.R. de. **Ambiência urbana.** 2. ed. Porto Alegre: +4 Editora, 2004. 199 p.

MOCHIDA, A.; LUN, I.Y.F. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Sendai, v. 96, p. 1498-1527, 2008.

MONTEIRO, C.A.F.; MENDONÇA, F. **Clima urbano.** São Paulo: Contexto, 2003. 192 p.

MONTEIRO, E.Z. **Verdes-dentro e verdes-fora:** visões prospectivas para espaços abertos urbanos - privados e públicos - em área habitacional de interesse social. 2007. 272 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Construção) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

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. 2008. 379 p. Tese (Doutorado em Tecnologia da Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MONTEIRO, L.M.; DUARTE, D.; GONÇALVES, J.S.; ALUCCI, M.P. Conforto térmico como condicionante do projeto arquitetônico-paisagístico: o caso dos espaços abertos do novo centro de pesquisas da Petrobras no Rio de Janeiro, CENPES II. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 8, n. 4, p. 61-86, 2008.

NIKOLOPOULOU, M. **Designing open spaces in the urban environment: a bioclimatic approach;** RUROS: Rediscovering the Urban Realm and Open Spaces. Greece: Centre for Energy Resources, Department of Buildings, 2004. 53 p.

OKE, T.R. **Boundary layer climates.** 2nd ed. London; New York: Routledge; John Wiley, 1987. 435 p.

_____. **Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites.** Vancouver: World Meteorological Organization, 2006. 47 p. (Instruments and Observing Methods, Report, 81; WMO/TD, 1250).

OLGYAY, V.; OLGAY, A. **Design with climate:** bioclimatic approach to architectural regionalism. New Jersey: Princeton University Press, 1963. 190 p.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440 p.

PARK, M.; HAGISHIMA, A.; TANIMOTO, J.; NARITA, K. Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: field measurement at a scale model site. **Building and Environment**, Fukuoka, v. 56, p. 38-46, 2012.

PENWARDEN, A.D. Acceptable wind speeds in towns. **Building Science**, London, v. 8, p. 259-267, 1973.

PENWARDEN, A.D.; WISE, A.F.E. **Wind environment around buildings**. London: Department of the Environment BRE, Her Majesty's Stationery Office, 1975. 52 p.

PRATA, A.R. **Dimensionamento do impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano simulando em túnel de vento: o caso de Santos**. 2005. 243 p. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural**. 2. ed. Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores, 1986. 240 p.

SANTAMOURIS, M. **Environmental design of urban buildings: an integrated approach**. London: Sterling, 2006. 322 p.

SANTIAGO, J.L.; MARTÍN, F.; CUERVA, A.; BEZDENEJNYKH, N.; SANZ-ANDRÉS, A. Experimental and numerical study of wind flow behind windbreaks. **Atmospheric Environment**, Madrid, v. 41, p. 6406-6420, 2007.

SARAIVA, J.A.G. Ação do vento e nível de conforto em espaços urbanos. In: ENCONTRO DE PROFESSORES DE CONFORTO AMBIENTAL, 2.; CICLO DE PALESTRAS DE CONFORTO AMBIENTAL E CONSERVAÇÃO DE ENERGIA, 2., 1994, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: UFPB, 1994. p. 23-31.

SHASHUA-BAR, L.; HOFFMAN, M.E. Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees. **Energy and Buildings**, Haifa, v. 31, p. 221-235, 2000.

SILVA FILHO, D.F. da; PIVETTA, K.F.L.; COUTO, H.T.Z.; POLIZEL, J.L. Indicadores da floresta urbana a partir de imagens aéreas multiespectrais de alta resolução. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 67, p. 88-100, 2005.

SIMÕES, J.W.; DURIGAN, G. Quebra-ventos de *Grevillea robusta* A. CUNN: efeitos sobre a velocidade do vento, umidade do solo e produção do café. **IPEF**, Piracicaba, n. 36, p. 27-34, 1987.

STATHOPOULOS, T. Pedestrian level winds and outdoor human comfort. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Montreal, v. 94, p. 769-780, 2006.

SZÜCS, A. Wind comfort in a public urban space: case study within Dublin Docklands. **Frontiers of Architectural Research**, Dublin, v. 2, p. 50-66, 2013.

WATSON, D.J. Comparative physiological studies in the growth of field crops. I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, London, v. 11, p. 41–76, 1947.

WONG, N.H.; CHEN, Y. **Tropical urban heat islands: climate, buildings and greenery**. London; New York: Taylor & Francis, 2009. 259 p.

WU, H.; KRIKSIC, F. Designing for pedestrian comfort in response to local climate. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Guelph, v. 104/106, p. 397-407, 2012.

WU, X.; ZOU, X.; ZHANG, C.; WANG, R.; ZHAO, J.; ZHANG, J. The effect of wind barriers on airflow in a wind tunnel. **Journal of Arid Environments**, Beijing, v. 97, p. 73-83, 2013.

YEH, C.-P.; TSAI, C.-H.; YANG, R.-J. An investigation into the sheltering performance of porous windbreaks under various wind directions. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, Tainan, v. 98, p. 520-532, 2010.

APÊNDICES

Apêndice A

DADOS DE ENTRADA NO ENVI-met – CONFIGURAÇÃO

```

ENVI-met Configuration Editor
File Edit Add Section Help Window

unimep_0429.cf

% ---- Basic Configuration File for ENVI-met Version 3 ----
% ---- MAIN-DATA Block ----
Name for Simulation (Text):                =unimep_0429
Input file Model Area                     =C:\ENVI-met31\input\unimep_0429.in
Filebase name for Output (Text):          =unimep_0429
Output Directory:                        =C:\ENVI-met31\output\
Start Simulation at Day (DD.MM.YYYY):     =07.08.2014
Start Simulation at Time (HH:MM:SS):      =21:00:00
Total Simulation Time in Hours:           =48.00
Save Model State each ? min              =60
Wind Speed in 10 m ab. Ground [m/s]      =3.9
Wind Direction (0:N..90:E..180:S..270:W..) =158
Roughness Length z0 at Reference Point    =0.1
Initial Temperature Atmosphere [K]       =299.59
Specific Humidity in 2500 m [g Water/kg air] =3.2
Relative Humidity in 2m [%]              =81.2
Database Plants                          =C:\ENVI-met31\sys.basedata\Plants.dat
[SOLARADJUST]
Factor of shortwave adjustment (0.5 to 1.5) =0.72
  
```


Apêndice B

DADOS DE ENTRADA NO ENVI-met – VEGETAÇÃO

INSERÇÃO DE PINUS, JASMIM E BAMBU

V3 ----- ENVI-met Database Version 3 ----- this file is only usable with ENVI-met V3.0 or higher -----

ID_C?_TY__rs-

m_a_f_HH.HH.TT.TT_LAD1__LAD2__LAD3__LAD4__LAD5__LAD6__LAD7__LAD8__LAD9__LAD10_RAD1__RAD2__RAD3__RAD4__RAD5__RAD6__RAD7__RAD8__RAD9__RAD10__NAME_____

xx C3 03 200 0.20 00.63 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Grass 50 cm aver. dense

so C3 03 70 0.20 00.63 1.200 1.580 0.820 0.380 0.290 0.270 0.290 0.330 0.400 0.520 0.740 0.000 0.900 0.200 0.200 0.200 0.200 0.200 0.760 0.000 soja 90. soja 63cm

lg C3 03 200 0.20 00.18 03.00 0.300 0.600 0.900 1.200 1.500 1.800 2.000 1.500 1.000 0.700 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 luzerne 18cm

MO C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20m aver. dense., no distinct crown layer

DO C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.110 0.140 0.180 0.270 0.330 0.370 0.360 0.330 0.250 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m dense., no distinct crown layer

DM C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m dense., distinct crown layer

dm C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m dense., distinct crown layer

ds C3 01 400 0.20 10.00 02.00 0.075 0.075 0.075 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 10 m dense.,distinct crown layer

sm C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.150 0.150 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m very dense, distinct crown layer

sk C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.150 0.150 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 15 m very dense, distinct crown layer

H2 C3 01 400 0.20 06.00 01.00 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.500 2.300 2.200 1.500 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Hedge dense, 2m

T1 C3 01 400 0.20 10.00 02.00 0.000 0.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 10 m very dense, leafless base

g C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Grass 50 cm aver. dense

bs C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.000 0.000 0.005 0.075 0.250 1.150 1.060 1.050 0.920 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m dense.,distinct crown layer

sc C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.000 0.000 0.150 0.150 0.650 2.150 2.180 2.050 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20 m very dense, free stem crown layer

w C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.110 0.140 0.180 0.270 0.330 0.370 0.360 0.330 0.250 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Forst 20 m dense., no distinct crown layer

l1 C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree, light 15 m

l2 C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.040 0.060 0.070 0.110 0.130 0.150 0.140 0.130 0.100 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree, light 20 m

h C3 01 400 0.20 02.00 01.00 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 2.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Hedge dense, 2m

m C4 03 200 0.20 01.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Maize, 1.5 m

c C3 03 200 0.20 01.50 00.50 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Corn, 1.5 m

gb C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Grass 50 cm aver. dense

gz C3 03 200 0.20 00.50 00.50 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.300 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Grass 50 cm aver. dense

T2 C3 01 400 0.20 16.00 02.00 0.000 0.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 15 m very dense, leafless base

Tb C3 01 400 0.20 16.00 02.00 2.000 2.000 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 2.180 1.720 0.000 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 15 m very dense

ee C3 01 400 0.20 20.00 02.00 0.500 0.500 1.000 1.110 1.130 1.500 1.800 2.000 1.500 0.800 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 20m aver. dense., no distinct crown layer

TH C3 01 400 0.20 15.00 02.00 0.000 0.000 0.000 0.000 0.400 0.450 0.450 0.490 0.490 0.400 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Tree 15m dense, distinct crown layer, Christer

PN C3 01 400 0.20 22.00 02.00 0.000 0.422 0.422 0.422 0.422 0.422 0.422 0.422 0.422 0.422 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Pinus 22m light

JM C3 01 400 0.20 01.50 02.00 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.510 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Jasmim 1,50m dense

BB C3 01 400 0.20 02.00 02.00 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.600 0.100 0.100 0.100 0.100 0.100
0.100 0.100 0.100 0.100 0.100 Bambu 2m dense

ANEXOS

Anexo A – CERTIFICADOS DE CALIBRAÇÃO

Instrumentos de Medição

Rua Antonio Zingra, 151 - Jd. Chapadão
CEP: 13079-192 - Campinas - SP
FONE/FAX: (19) 3243-5972 / 3213-6404
Esc. Comercial SP: (11) 5686-1999
www.instrucamp.com.br
vendas@instrucamp.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 33149/12

Fl.: 01/02

Cliente: UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Endereço: Cidade Universitária Zeferino Vaz, s/n° - Barão Geraldo - CEP: 13083-970 - Campinas - SP

Instrumento: Registrador de temperatura

Fabricante: Testo

Modelo: 175-T2

Número de Série: -

Cód. Cliente: ERC 3996

Número do Instrumento: 24514

Faixa de Indicação: -35 a 70 °C (int.) / -40 a 120 °C (ext.)

Faixa Calibrada: 0 a 60 °C (int.)

Resolução: 0,1 °C

Procedimento utilizado: A calibração foi realizada conforme o Procedimento Instrucamp PO-07.03 (Revisão 3 - Maio/10). Foram realizadas três leituras não sucessivas para cada ponto selecionado.

Rastreabilidade dos padrões utilizados:

Descrição	Fab.	Modelo	Identificação	Certificado	Validade	Rastreabilidade
Termômetro digital	Testo	720	4400	LV 25409/11	06/10/12	RBC / Visomes

Condições ambientais:

Temperatura ambiente: (22,0 ± 5) °C

Umidade relativa do ar: (66,0 ± 10) %UR

TÉCNICO DO LAB.

John Costa Mendes

GERENTE TÉCNICO

Ennio Flavio Soares Lima

DATA DA EMISSÃO: 17/07/12
DATA DA CALIBRAÇÃO: 17/07/12

PRÓXIMA CALIBRAÇÃO: ____/____/____
(Campo preenchido pelo cliente)

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, e sem nenhuma alteração.

INSTRUCAMP
Instrumentos de Medição

Rua Antonio Zingra, 151 - Jd. Chapadão
CEP: 13070-192 - Campinas - SP
FONE/FAX: (18) 3243-5972 / 3213-6404
Esc. Comercial SP: (11) 5886-1999
www.instrucamp.com.br
vendas@instrucamp.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 33150/12

Fl.: 01/02

Cliente: **UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

Endereço: Cidade Universitária Zeferino Vaz, s/nº - Barão Geraldo - CEP: 13083-970 - Campinas - SP

Instrumento: Registrador de temperatura e umidade

Fabricante: Testo

Modelo: 175-H1

Número de Série: -

Cód. Cliente: ERC 33987

Número do Instrumento: 24527

Faixa de Indicação: -10 a 50 °C / 0 a 100 %UR

Resolução: 0,1 °C / 0,1 %UR

Procedimento utilizado: A calibração foi realizada conforme o Procedimento Instrucamp PO-07.04 (Revisão 4 - Maio/10).

Rastreabilidade dos padrões utilizados:

Descrição	Fab.	Modelo	Identificação	Certificado	Validade	Rastreabilidade
Termohigrômetro digital	Testo	650	4281	LV 14347/12	07/05/13	RBC / Visomes

Condições ambientais:

Temperatura ambiente: (22,0 ± 5) °C

Umidade relativa do ar: (60,0 ± 10) %UR

TÉCNICO DO LAB.

John Costa Mendes

GERENTE TÉCNICO

Ennio Flavio Soares Lima

DATA DA EMISSÃO: 17/07/12
DATA DA CALIBRAÇÃO: 17/07/12

PRÓXIMA CALIBRAÇÃO: ____/____/____
(Campo preenchido pelo cliente)

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, e sem nenhuma alteração.

INSTRUCAMP

Instrumentos de Medição

Rua Antonio Zingra, 151 - Jd. Chapadão
 CEP: 13078-192 - Campinas - SP
 FONE/FAX: (19) 3243-3572 / 3213-6404
 Esc. Comercial SP: (11) 5685-1999
 www.instrucamp.com.br
 vendas@instrucamp.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 33150/12

Fl.: 02/02

Resultados da Calibração**Umidade Relativa**

Temperatura de Referência	Instrumento Valor Indicado (%UR)	Valor do Padrão (%UR)	Resultado da Medição			
			Erro (%UR)	Incerteza ($\pm$ %UR)	k	veff
25,0	43,7	40,2	3,5	1,20	2,00	∞
25,0	66,9	60,5	6,4	1,50	2,00	∞
25,0	87,4	79,7	7,7	1,90	2,00	∞

- TEMPERATURA DE REFERÊNCIA: os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de temperatura de 1990;
- VALOR INDICADO: média aritmética das leituras realizadas no instrumento sob calibração, para cada ponto;
- VALOR DO PADRÃO: média aritmética das leituras realizadas no padrão, para cada ponto;
- ERRO: diferença entre a indicação do instrumento sob calibração e o valor do padrão;
- INCERTEZA DE MEDIÇÃO: incerteza expandida de medição avaliada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com $veff$ graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95 %.

TÉCNICO DO LAB.

John Costa Mendes

GERENTE TÉCNICO

Ennio Flavio Soares Lima

Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. A reprodução deste documento só poderá ser feita integralmente, e sem nenhuma alteração.