



**XII ENCAC** Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído  
**VIII ELACAC** Encontro Latinoamericano de Conforto no Ambiente Construído

BRASÍLIA | 25 a 27 de setembro de 2013

## **ESTIMATIVA DO BALANÇO DE ENERGIA NA SUPERFÍCIE EM CIDADES DO OESTE PAULISTA, BRASIL**

**Elaine Cristina Barboza (1); Antonio Jaschke Machado (2)  
e Adriano Aparecido Franchini (3)**

(1) Graduação em Arquitetura e Urbanismo, ec\_barboza@hotmail.com.

(2) Professor Assistente Doutor do Departamento de Geografia, jaschke.machado@gmail.com.

(3) Graduação em Arquitetura e Urbanismo, adriano\_fiapo@hotmail.com.

Faculdade de Ciências e Tecnologia, UNESP - Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente,  
Cx Postal 957, Presidente Prudente-SP, 19060-900, Tel.: (18) 3229-5680

### **RESUMO**

As modificações sobre a superfície natural do solo acarretam mudanças no balanço de energia em função da destruição do microclima existente; assim como as alterações na superfície urbana interferem na quantidade de energia armazenada. Este projeto tem como objetivo assinalar e discutir os aspectos micrometeorológicos do clima urbano nas cidades do Oeste Paulista: as regiões das cidades de Presidente Prudente, Assis e Iepê. É dada especial atenção ao método utilizado para estimar as principais componentes do balanço de energia na superfície, por meio da estimativa dos fluxos convectivos, como também a caracterização da evolução diurna da camada limite urbana nestas três cidades. As observações mostraram que a razão de Bowen é um indicador diurno do clima local para as três regiões, com uma intensidade entre 0,3 e 0,7, mas com o máximo ocorrendo mais cedo em Iepê, entre 10:00 e 11:00 hora local, mais tarde em Assis, entre 13:00 e 15:00 hora local e ainda mais tarde em Presidente Prudente, entre 16:00 e 17:00 hora local. Os resultados indicam que a razão de Bowen nas três regiões é fortemente modulada pelo balanço radiativo na superfície e pelos diferentes agrupamentos vegetais; indicando ambos, como essenciais a compreensão e composição do ambiente urbano.

Palavras-chave: balanço de energia, cidades médias, clima urbano.

### **ABSTRACT**

The modifications on the natural soil surface cause changes in energy balance due to the destruction of the existing microclimate, as well as changes in urban surface interfering in the amount of stored energy. The objective of this project is to indicate and discuss the meteorological characteristics of urban climate in the cities of the west of São Paulo, Brazil: the regions of the cities of Presidente Prudente, Assis and Iepê. Particular attention is given to the method used to estimate the main components of energy balance at the surface, by means of estimates fluxes, as well as the characterization of the diurnal evolution of the urban boundary layer in these three cities. The observations showed that the Bowen ratio is an indicator of the local weather for the three regions, with an intensity between 0.3 and 0.7, but with the maximum occurring earlier in Iepê, between 10:00 and 11:00 local time, later in Assisi, between 13:00 and 15:00 local time and even later in Presidente Prudente, between 16:00 and 17:00 local time. The results indicate that Bowen ratio in the three regions is strongly modulated by radiative surface and the different plant groups, indicating both as essential to understanding and composition of urban environment.

Keywords: energy balance, medium cities, urban climate.

## 1. INTRODUÇÃO

A investigação do balanço de energia em superfície nas cidades localizadas em áreas tropicais tem recebido menos atenção do que em outras latitudes. A composição da paisagem urbana se dá pela integração (entenda-se por ação de planejamento) do espaço natural e construído. Assim, de maneira geral, são as superfícies edificadas/impermeabilizadas e vegetadas que compõem o sistema urbano (GRIMMOND *and* OKE, 1991).

As alterações sobre a superfície natural do solo implicam na destruição de um microclima pré-existente, independente de qual se trate: um extenso gramado, uma plantação, uma edificação, um caminho com ou sem pavimentação. Do mesmo modo, as modificações sobre a cobertura da superfície urbana implicam alterações da quantidade de energia armazenada. Esta energia armazenada ( $\Delta Q_s$ ) é resultado das modificações dos fluxos radiativos e convectivos pela alternância das propriedades radiativas e térmicas dos materiais.

As cidades do Oeste Paulista apresentam uma malha urbana ainda com contraste bastante marcante nos seus limites com a área rural. Este contraste é bastante evidente através de uma variação espacial abrupta do tipo de cobertura da superfície. Na porção interior da malha urbana este contraste de coberturas pode também ser evidenciado pela alternância existente entre ruas, quadras construídas e parques ou praças urbanas.

Denomina-se Oeste Paulista uma região de 47 cidades junto ao baixo e médio Vale do Paranapanema, representadas neste estudo pelas cidades de Presidente Prudente, Assis e Iepê. Ao todo, estas três cidades ocupam cerca de 1.618 km<sup>2</sup>, com uma população de 310 mil habitantes e uma frota de 100 mil veículos (Tabela 1). Estas três cidades contribuem para quase 1% do produto interno bruto paulista.

Tabela 1: Principais características sociais e econômicas das regiões de Presidente Prudente, Assis e Iepê.

Características	Presidente Prudente	Assis	Iepê
Área (km <sup>2</sup> )	563	460	595
População	207.610	95.144	7.628
Número de veículos	70.290	29.110	1.690
Fração do PIB	0,6 %	0,2 %	0,02 %

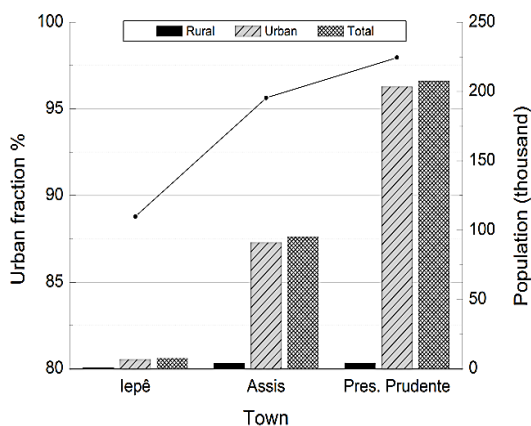


Figura 1 – Relação da população urbana em cada cidade.  
Fonte: IBGE, 2010.

As condições ambientais estudadas nas diferentes cidades, analisadas do ponto de vista dos fluxos de energia, de algum modo devem indicar o impacto das atividades humanas. O grau deste impacto pode ser expresso não apenas pelo número absoluto de seus habitantes (Fig. 1), mas também pela sua frota de veículos e pelo poder econômico do município, o qual pode estar relacionado a diferentes processos de urbanização.

Landsberg (2006) lembra as causas básicas das mudanças climáticas provocadas pela urbanização: a primeira delas é a alteração na superfície; a segunda, a produção de calor pela própria cidade, indo do metabolismo dos seres humanos e animais ao calor liberado nas indústrias, e por milhões de motores de combustão interna; e a terceira influência da cidade sobre o clima, trata-se da alteração da composição da atmosfera.

Uma vez, sendo significativas as diferenças entre as superfícies antropogênicas que compõem o ambiente urbano, e considerando que em diferentes escalas a vegetação é responsável por diversos efeitos climáticos e micrometeorológicos, o reconhecimento da importância da vegetação no meio edificado, pode influenciar de maneira preponderante a distribuição das áreas verdes no tecido urbano.

A estimativa de fluxos de calor sensível e latente trata-se da quantificação da parcela de fluxo radiativo dissipada na atmosfera, na forma turbulenta; a razão entre eles corresponde à razão de Bowen, portanto, um critério para investigar a contribuição dos espaços livres no incremento da qualidade ambiental urbana; de modo que, situações em que prevalece a transferência na forma de calor sensível em relação à

transferência de calor latente seria característica de uma área mais edificada e com pouca vegetação arbórea, enquanto a relevância da transferência na forma de calor latente se estabeleceria em áreas arborizadas.

## 2. OBJETIVO

Utilizar o parâmetro micrometeorológico razão de Bowen como indicador de um diferente padrão urbanístico representado pelas praças e parques urbanos. Este parâmetro é diretamente relacionado às trocas convectivas entre as diferentes superfícies destas praças e a atmosfera urbana.

## 3. MÉTODO

Esta pesquisa foi realizada entre os meses de Junho e Outubro de 2012, dividida em três etapas: (i) definição das áreas de estudo, levantamento fotográfico e descrição paisagística de tais áreas, (ii) coleta de dados atmosféricos, buscando registrar a evolução diária da radiação e sua incidência no ápice solar e (iii) tratamento e análise dos dados, estimativa dos fluxos de calor sensível ( $Q_H$ ) e latente ( $Q_E$ ) e cálculo da razão de Bowen.

### 3.1. Campanha de amostragem de dados observacionais

Nos recintos urbanos foram instalados sensores de vento, radiação, temperatura e umidade do ar. Os sensores foram ligados a um sistema de aquisição de dados Micrologger CR3000, fabricado pela Campbell Inc. A taxa de amostragem foi definida igual a 0,2 Hz e médias de 20-seg a 1-min foram calculadas para todas as variáveis. As características destes sensores são descritas em Machado e Azevedo (2007).

### 3.2. Local e Observações

Medições fixas foram realizadas com um saldo-radiômetro e um pirgeômetro (Kipp-Zonen) e um sensor de temperatura e umidade (Campbell Sci.), em espaços livres caracterizados pelas nítidas diferenças quanto à cobertura vegetal, tratamento de piso e ocupação do entorno.

Em Presidente Prudente, as aferições ocorreram primeiramente em uma praça caracterizada pela presença de vegetação abundante, em um bairro residencial, porém, junto a uma avenida de comércio e serviços; em um grande espaço aberto público com predomínio de vegetação rasteira, o Parque da Juventude, na região oeste da cidade em um fundo de vale de um córrego constituindo-se área de lazer um conjunto habitacional popular conhecido por Cohab; na região leste, numa praça seca junto ao acesso de um viaduto com tráfego intenso de automóveis e de pedestres, Praça do Santuário, caracterizada pela presença de vegetação apenas na sua porção central e inexistência de superfícies gramadas; e por último, uma praça entre o Jd. Itapura II e o Jd. Itapuã na borda leste da malha urbana, em que se verificou a presença de pequenas árvores sem densidade de copa, e um vale bastante profundo e com densa mata ciliar na direção norte.

Em Assis, os levantamentos foram feitos sobre superfície pavimentada diante de vegetação arbórea esparsa, na confluência de duas avenidas com preponderante intensidade de tráfego de veículos e deslocamento de pedestres. Em Iepê, os sensores foram posicionados em uma praça central na porção central da cidade, investigou-se uma superfície mista constituída por pedras, cimento cru e cimento pintado; na presença de vegetação arbórea esparsa e de pequeno porte, e com deslocamento contínuo de pedestres no local.

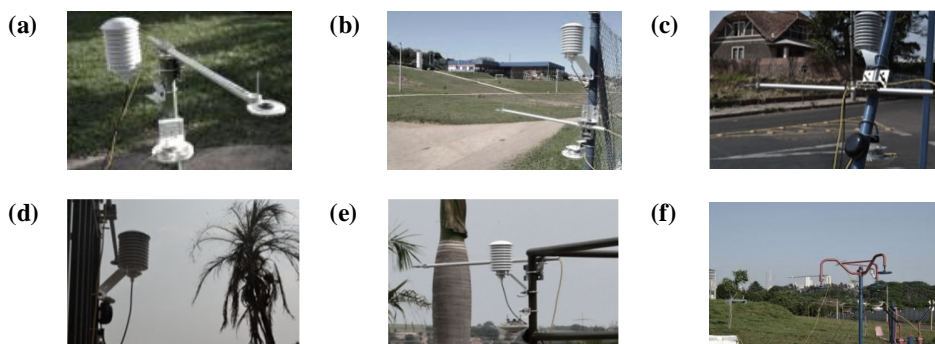


Figura 2 – Local dos estudos observacionais: Cerejeiras (a), Parque da Juventude - Cohab (b), cruzamento das Av. J. V. da Cunha e Silva e Av. Perimetral, Assis (c), Praça do Santuário (d), Praça São Sebastião, Iepê (e) e Jd. Itapura (f). Os locais aparecem na ordem cronológica das aferições.

### 3.3. Balanço de energia

Para a estimativa dos fluxos de calor sensível ( $Q_H$ ) e latente ( $Q_E$ ) equacionam-se os dados observados de temperatura e umidade:

$$Q_H = C_a K_H \left( \frac{\delta \bar{T}_S}{\delta \bar{z}} \right) \quad \text{Equação 1}$$

$$Q_E = L_V K_V \left( \frac{\delta \bar{\rho}_V}{\delta \bar{z}} \right) \quad \text{Equação 2}$$

Onde  $C_a$  vale  $1200 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$ ,  $L_v$  vale  $2,5 \cdot 10^6 \text{ J Kg}^{-1}$  e  $K_H \cong K_V \cong 25 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . A densidade de vapor ( $\rho_v$ ) é obtida diretamente da pressão de vapor adquirida com o CR3000. A temperatura da superfície ( $T_s$ ) é estimada a partir do fluxo radiativo em ondas longas observadas com o pirgeômetro, considerando-se uma emissividade de 0,9. É importante ressaltar que o gradiente vertical é variável, sendo que a sua máxima magnitude ocorre muito próximo ao chão, na subcamada denominada como laminar e cuja dimensão é bastante reduzida, sendo da ordem de  $5 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ .

Por meio dos fluxos de calor e radiação solar incidente tem-se a equação do balanço radiativo expressa por:

$$\Delta Q_S = Q^* - (Q_H + Q_E) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo  $\Delta Q_S$  o calor armazenado pela superfície,  $Q^*$  o saldo radiativo e  $Q_H$  e  $Q_E$  os fluxos convectivos de calor sensível e latente, respectivamente. Note-se que segundo o balanço de energia de uma superfície urbana proposto por Orfelle et al. (2003), estão sendo feitas aqui duas simplificações. Em primeiro lugar, despreza-se o efeito do calor antropogênico, tendo-se em vista que sua magnitude é de uma ordem inferior à magnitude dos fluxos descritos na Equação 3 (AZEVEDO, 2001; FERREIRA et al., 2011). Em segundo lugar, despreza-se a advecção de calor. Apesar de em algumas situações a intensidade do vento não poder ser desconsiderada, supõem-se que as diferenças de temperatura entre os recintos urbanos adjacentes seja consideravelmente inferior em comparação às variações de temperatura entre o chão e o ar sobrejacente.

E por fim, a razão de Bowen ( $\beta$ ):

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} \quad \text{Equação 4}$$

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Descrição Paisagística

Cada um dos ambientes investigados possui características muito peculiares quanto aos fatores climáticos locais como à presença, porte e qualidade da vegetação disponível, variações quanto à topografia, a ocupação do entorno e o tipo de cobertura do solo predominante, representadas abaixo (Figura 3).

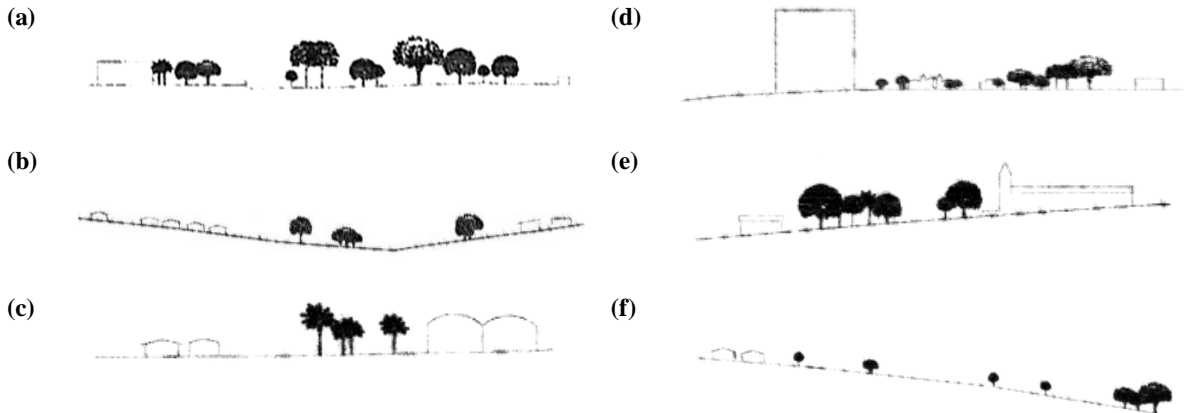


Figura 3 – Esquemas de seção transversal: Cerejeiras (a), Cohab (b), Assis (c), Santuário (d), Iepê (e) e Jd. Itapura (f).

## 4.2. Evolução diurna de $\beta$

A primeira aproximação, concluídas as estimativas de fluxos turbulentos, aponta para um padrão de distribuição referente à evolução diurna. Os valores mais baixos da razão de Bowen, nos dias de céu claro durante todas as investigações, foram sempre encontrados no início da manhã, e gradativamente o fluxo de calor sensível ( $Q_H$ ) passa a ter maior importância que o de calor latente ( $Q_E$ ), fazendo com que os valores de  $\beta$  aumentem. A diferença entre os ambientes analisados, portanto, não está diretamente relacionada aos valores obtidos, mas ao momento que essa relação dos fluxos se altera.

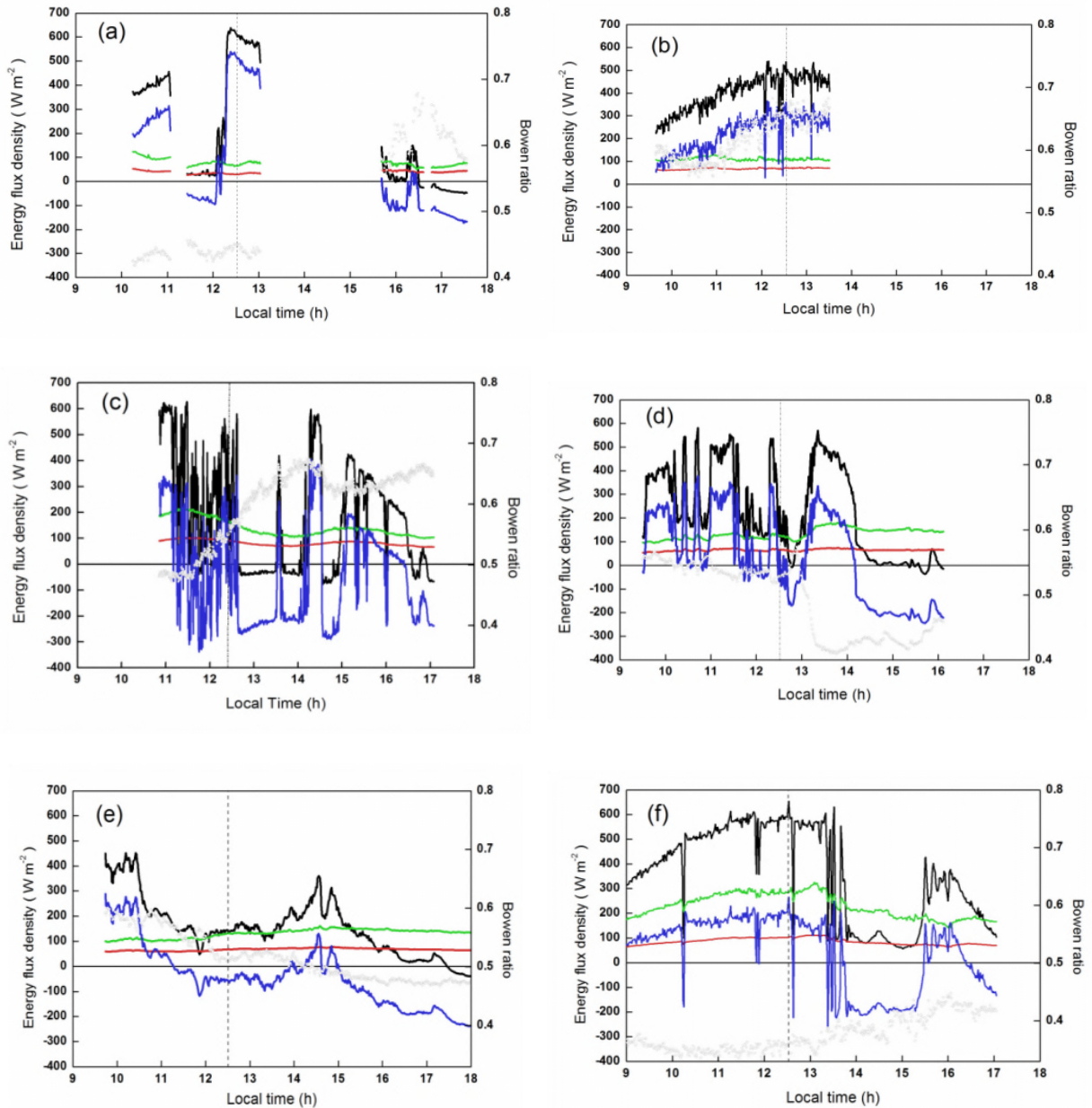


Figura 4 – Balanço de energia (linha contínua azul) e razão de Bowen (círculo claro aberto): Cerejeiras (a), Cohab (b), Assis (c), Santuário (d), Iepê (e) e Itapura (f).

A praça arborizada (Figura 4a) manteve as taxas de  $\beta$  oscilando abaixo de 0,5 mesmo após o ápice solar. Este valor trata-se de quando o fluxo  $Q_H$  corresponde à metade do  $Q_E$ ; valores de  $\beta$  menores que meio, significam que a entrada de calor na atmosfera se dá mais por calor latente, que não contribui para um aumento da temperatura na baixa atmosfera e sim, para um aumento da umidade (OKE, 1987).

A amplitude para os valores da radiação demonstra o efeito do sombreamento da copa das árvores, tal efeito não foi constatado no parque gramado (Figura 4b). Desde o início das medições no parque as taxas

de fluxo sensível eram mais significativas, no entanto, essa preponderância passa a ser maior desde o fim da manhã, havendo um aumento rápido dos valores de  $\beta$  a partir das 11h, que tende a estabilizar aproximadamente uma hora depois.

O mesmo incremento da razão de Bowen irá ocorrer nas superfícies impermeáveis (Figura 4c); os registros da radiação solar têm grande amplitude e frequência em função do sombreamento das palmeiras existentes no local, cujas folhas plumadas barram a passagem da radiação direta ocasionando sombreamento parcial. Verificou-se a ocorrência de um aumento rápido e contínuo dos valores de  $\beta$ , porém sem que haja estabilização em curto prazo; a importância do  $Q_H$  para o balanço de energia será mais duradoura.

No Largo do Santuário (Figura 4d), os registros da manhã são mais similares aos encontrados na Cohab, indicando uma certa similaridade entre um gramado seco e um calçamento de pedras, no entanto as variações observadas durante a tarde entre os fluxos se deve mais às mudanças das condições do céu (passando a nublado), do que propriamente pela presença de vegetação (exemplares de palmeiras e pinheiros).

Em Iepê (Figura 4e), as características locais são de uma cobertura arbórea e regular, as superfícies são gramadas e de calçamento em pedras, mas no início da manhã os valores de  $\beta$  são similares aos obtidos na superfície gramada e sem irrigação. Os valores muito reduzidos de  $\beta$  próximo ao meio-dia, estão associados à presença de muitas nuvens altas durante o experimento; embora houvesse a presença de sol durante a aferição, a densidade de fluxo solar registrada é indicativa das mudanças da condição do céu.

Embora, as condições locais sejam as mesmas que encontradas na Cohab – gramado e vegetação esparsa – na praça do Jd. Itapura, no início da manhã, havia a presença de orvalho e névoa, a presença de umidade levou a uma preponderância do calor latente durante praticamente todo o experimento (Figura 4f); a amplitude registrada no fluxo  $Q^*$  se deve ao surgimento de nuvens em torno do meio-dia, mantendo céu encoberto até às 15h.

### 4.3. Os valores médios de $\beta$

Entende-se que o parcelamento da terra por diferentes categorias (cidade, campos cultivados, superfície natural e mista) implica no modo como a superfície irá transferir parte da energia armazenada para o ar adjacente, gerando aquecimento (energia em sensível) ou resfriamento (energia latente), mas influenciado pelo grau de visibilidade do céu; pela admissão térmica, que modula ciclos de aquecimento e resfriamento de solos e materiais de construção; pelo albedo, que influencia a absorção de calor da superfície; e pelo fluxo de calor antropogênico, que contribui com calor de combustão para o balanço de energia da superfície (STEWART and OKE, 2009).

Esta transferência foi investigada tanto para o fluxo de calor sensível como também para o fluxo de calor latente, e estes equacionados como  $\beta$ , o indicador local, que por sua vez evidencia a composição do ambiente. Assim, embora a média diária de  $\beta$  seja praticamente a mesma entre os ambientes analisados, a principal diferença está relacionada à variação dos valores horários (Figura 5), resultado da alternância entre os fluxos convectivos e o balanço de energia na superfície.

Para o Oeste Paulista (Figura 6) a média dos valores obtidos indica que a máxima de  $\beta$  seja característica do fim de tarde e a mínima para o fim da manhã. Ainda que a margem de erro seja grande para a média em cada uma das faixas horárias, nota-se que o padrão identificado não tem semelhança com nenhum dos seis ambientes analisados, o que ressalta a preponderância dos fatores climáticos locais, se comparados a tendência de homogeneização encontrada para a região de estudo.

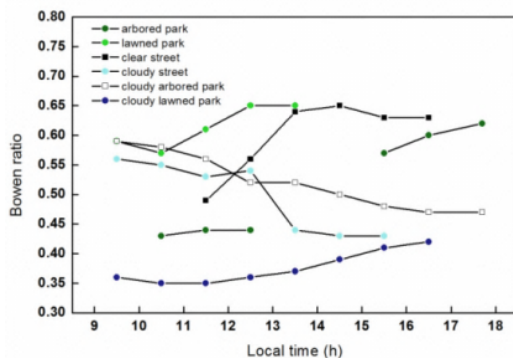


Figura 5 – Média horária para  $\beta$ .

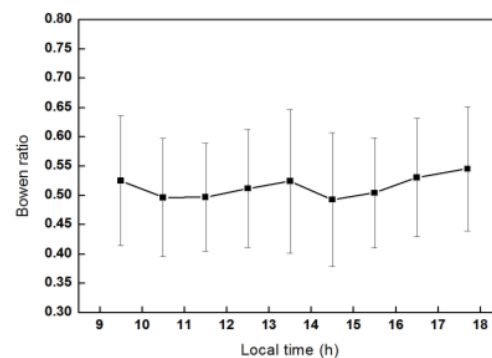


Figura 6 – Evolução diurna de  $\beta$  no oeste paulista.

## 5. CONCLUSÕES

A estimativa dos fluxos de calor em associação com a avaliação da distribuição da ocupação urbana tem demonstrado sua relevância para os estudos do ambiente construído. E ainda, o estudo dos agrupamentos vegetais comprovou os efeitos de sombreamento das copas das árvores; elas atenuam substancialmente a intensidade de radiação solar incidente, como foi demonstrado pelos valores do fluxo do  $Q^*$  para as diferentes espécies e características das folhas. Nota-se, portanto, que a presença da vegetação ajuda a estabilizar os efeitos do clima reduzindo extremos ambientais.

A importância do manejo da vegetação nas áreas urbanas se demonstra pela em manutenção dos valores elevados da densidade de vapor; uma vez que a presença de vegetação é atuante em função da evapotranspiração, resultará em maiores fluxos convectivos através do calor latente ( $Q_E$ ) e valores mais baixos de  $\beta$ .

Os resultados obtidos nesta pesquisa nos levam a identificação da interferência dos ambientes construídos sobre o clima da cidade: comprovou-se que os diferentes materiais que compõe a superfície urbana e os diferentes agrupamentos da vegetação alteram o balanço de energia e; portanto, constituem-se elementos fundamentais para o desenho urbano e o imperativo planejamento ambiental, frente aos avanços da urbanização.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, Tarik Rezende de. O fluxo de calor gerado pelas atividades humanas, **GEOUSP: Os climas na cidade de São Paulo, Teoria & Prática**, São Paulo, 2001, vol. 4, p. 71 – 93.
- FERREIRA, M. J., OLIVEIRA, A. P. de and SOARES, J. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, 2011, vol. 104, p.43-56.
- FRANCO, M. A. R. (2008). **Desenho ambiental: uma introdução a arquitetura da paisagem com o paradigma ecológico**. Annablume: FAPESP, São Paulo, 1997.
- GOUVÊA, L. A. C. **Cidadevida: curso de desenho ambiental urbano**. São Paulo: Nobel, 2008.
- GRIMMOND, C. S. B. and OKE, T.R. An evapotranspiration-interception model for urban areas, **Water Resources Research**, vol. 27, 1739-1755, 1991.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em < <http://www.censo2010.ibge.gov.br/> >. Acessado em 3 de dezembro de 2012.
- LANDSBERG, H. E. (2006). **The climate of towns**. Tradução: Prof. Dr. Tarik Rezende de Azevedo. Revista do Departamento de Geografia, n. 18, p. 95-111.
- LYNCH, Kevin. **A Boa forma da cidade**. Lisboa/Portugal, Edições 70, 1981.
- MACHADO, A. J. e AZEVEDO, T. R. de. A distribuição espacial dos termos do balanço de energia em superfície a partir de imagem orbital e observação de campo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, 2006, vol.19, p. 81–91.
- MACHADO, A. J. e AZEVEDO, T. R. de. Detection of the urban heat-Island effect from a surface mobile platform. **Revista de Teledetección**, Valladolid, 2007, vol.27, p. 59–70.
- MAGNOLI, M. M. O parque no desenho urbano. **Paisagem Ambiente: ensaios** - n. 21, São Paulo, 2006, p. 199–213.
- MASCARÓ, L. e MASCARÓ, J. **Vegetação urbana**. Porto Alegre: Mais Quatro: UFRGS, 2010.
- NUCCI, J. C. **Qualidade ambiental e adensamento urbano: um estudo de ecologia e planejamento da paisagem aplicado ao distrito de Santa Cecília (MSP)**. Curitiba, 2008.
- OFFERLE, B., GRIMMOND, C. S. B. and OKE, T. R. Parameterization of net all-wave radiation for urban areas. **Journal of Applied Meteorology**, 2003, vol. 42, p.1157-1173.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. 2ª ed., London, Routledge, 1987.
- OKE, T.R. The micrometeorology of the urban forest. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, 1989, 324B, p. 335-351.
- OLGYAY, V. **Arquitectura y clima – manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona, Editorial Gustavo Gili, 2008.
- ROMERO, M. A. B. **Princípios Bioclimáticos para o desenho urbano**. São Paulo, ProEditores, 2000.
- STEWART, I.D., and T.R. OKE. Newly developed “thermal climate zones” for defining and measuring urban heat island magnitude in the canopy layer. Preprints, T.R. Oke **Symposium & Eighth Symposium on Urban. Environment**, January 11–15, Phoenix, AZ, 2009.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento deste projeto, processos nº 11/08520-8 e 12/06307-8.