

## FLUXOS RADIATIVOS DA AVENIDA PAULISTA – SÃO PAULO, SP – DISCUTIDOS A PARTIR DA ANÁLISE DAS FORMAS

**Antônio Jaschke Machado**

Prof. Dr. do Departamento de Geografia da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista - FCT/UNESP. Rua Roberto Simonsen, 305, CEP: 19.060-900, Presidente Prudente-SP.  
E-mail: jaschke.machado@fct.unesp.br

### Resumo:

Busca-se verificar como a temperatura interna de um *canyon* urbano é determinada, a partir da interação entre a sua morfologia e a distribuição dos fluxos radiativos em uma cidade tropical. As medições discutidas incluem a densidade do fluxo radiativo multiespectral ( $Q^*$ ), o saldo radiativo em ondas longas ( $L^*$ ), o fluxo radiativo em ondas curtas ( $K^*$ ) derivado dos anteriores e o campo de temperaturas do *canyon* urbano estudado. Uma análise de sensibilidade é avaliada, a partir de observações sobre uma plataforma móvel, para estimar a relação entre os fluxos  $Q^*$  e  $L^*$  para com a distribuição espacial de temperaturas, cobrindo a variabilidade das formas reconhecidas. Os dados são georreferenciados e utilizados na investigação das diversas localidades, buscando-se caracterizar os padrões de interação entre fluxos radiativos e morfologia (altura, forma, área e distribuição espacial de edificações e árvores) no interior de um importante *canyon* urbano de uma metrópole latino-americana. A maioria das localidades situa-se em um centro financeiro, entre um parque urbano e uma área de ocupação mista. Todos os setores apresentaram tendência à homogeneização térmica, a partir de um padrão espacial mais complexo do fluxo  $L^*$ . Simulações numéricas realizadas com o modelo ENVI-met não foram capazes de reproduzir a evolução temporal e as singularidades espaciais observadas no campo de  $L^*$ , superestimando o efeito de um parque urbano.

**Palavras-chave:** observações móveis, radiação, conforto térmico, forma urbana, simulação numérica.

### Radiative fluxes of the Paulista Avenue – São Paulo, Brazil – discussed from the surface form

#### Abstract:

This work searches to see how the internal temperature of an urban canyon is determined by the interaction between morphology and the spatial distribution of radiative fluxes in a tropical city. The measurements discussed include multispectral radiative flux density ( $Q^*$ ), the balance in long-wave radiation ( $L^*$ ), the shortwave radiative flux ( $K^*$ ) derived from previous field experiments and temperatures verified in the canyon walls. A sensitivity analysis is evaluated from observations on a mobile platform, to estimate the importance of the  $Q^*$  and  $L^*$  fluxes to the spatial distribution of temperatures, covering the variability of recognized forms. The dataset is geo-referenced and used in the investigation of various locations, seeking to characterize the patterns of interaction between radiative fluxes and morphology (height, shape, size and spatial distribution of buildings and trees) within a major urban canyon of a metropolis in Latin America. Most of the localities situated in a financial center, between an urban park and an area of mixed occupancy. All sectors showed trend towards thermal equilibrium, from a more complex spatial pattern of the  $L^*$  flux. Numerical simulations performed with the model ENVI-met were not able to reproduce the temporal evolution and spatial singularities observed in the field of  $L^*$ , overestimating the effect of an urban park.

**Key-words:** mobile observations, radiative flux, thermal comfort, urban form, numerical simulation.

## Introdução

As cidades estão entre as superfícies com distribuição radiativa mais complexa. Isto é evidente na distribuição espacial do saldo da densidade do fluxo radiativo em todos os comprimentos de onda ( $Q^*$ ). Como pode ser verificado, por exemplo, a partir do escaneamento da imagem orbital de uma mancha urbana, composta por *canyons* de diferentes alturas ( $h$ ) e larguras ( $w$ ) que são os elementos constituidores de sua forma (MACHADO e AZEVEDO, 2006a). Os valores de  $Q^*$  são fortemente afetados pela complexa distribuição do albedo em uma cidade. O albedo é determinado pelos diversos tipos de materiais de construção utilizados e pela estrutura geométrica das edificações, representada pela relação entre  $h$  e  $w$ . A interpretação do efeito das dimensões de um *canyon* urbano sobre a distribuição do fluxo  $Q^*$  pode ser realizada através de dois procedimentos:

- 1) método *geométrico*, o qual relaciona parâmetros e fluxos radiativos às medições da morfometria superficial;
- 2) método *microclimatológico*, o qual utiliza observações de campo da radiação abaixo da camada de coberturas urbanas (OKE, 1987, p. 279 - 282), para posteriormente parametrizá-las em função das dimensões do *canyon*. Neste caso, a parametrização seria útil na indexação de diversos elementos indiretamente relacionados às formas urbanas, como, por exemplo, o conforto térmico (SILVA e AMORIM, 2010; COSTA et al., 2010; MACHADO e AZEVEDO, 2006b; ALI-TOUDERT and MAYER, 2006; OLGAYAY, 2008).

O perfil da evolução diurna teórica do balanço radiativo sob condições de céu claro, ilustrado na Fig. 1, fornece a explicação do que ocorre quando elementos edificados são adicionados a uma superfície, isto é, como o processo de verticalização em uma cidade modula a disponibilidade da energia radiativa no meio físico.

De fato, Machado (2009) constatou em suas observações de  $Q^*$  na cidade de São Paulo, que mesmo durante o período diurno é possível verificar valores negativos, os quais seriam característicos de uma situação tipicamente noturna. Estes episódios estendiam-se por um período de cerca de 2 horas, tanto após o nascer do Sol, quanto antes ao seu ocaso. Na verdade, dentro de uma cidade tudo funciona como se o dia inicie de modo defasado à realidade de uma superfície plana livre de obstruções, e termine de modo antecipado a esta mesma realidade.

Esporadicamente este efeito pode ser observado no interior da cidade em intervalos de tempo menor, em áreas ocupadas por viadutos, densamente verticalizadas ou arborizadas (MACHADO, 2011). De qualquer modo, não resta dúvidas sobre o impacto da geometria urbana na atenuação da variabilidade diurna e noturna do fluxo  $Q^*$ . Todavia, ainda que possa parecer óbvio, veremos a seguir que não é tão claro o impacto deste efeito sobre as componentes de  $Q^*$ , seja expresso em termos de ondas curtas ( $K^*$ ), seja, sobretudo, quando expresso em termos de ondas longas ( $L^*$ ). E, por conseguinte, o efeito das formas na caracterização térmica do *canyon* urbano.

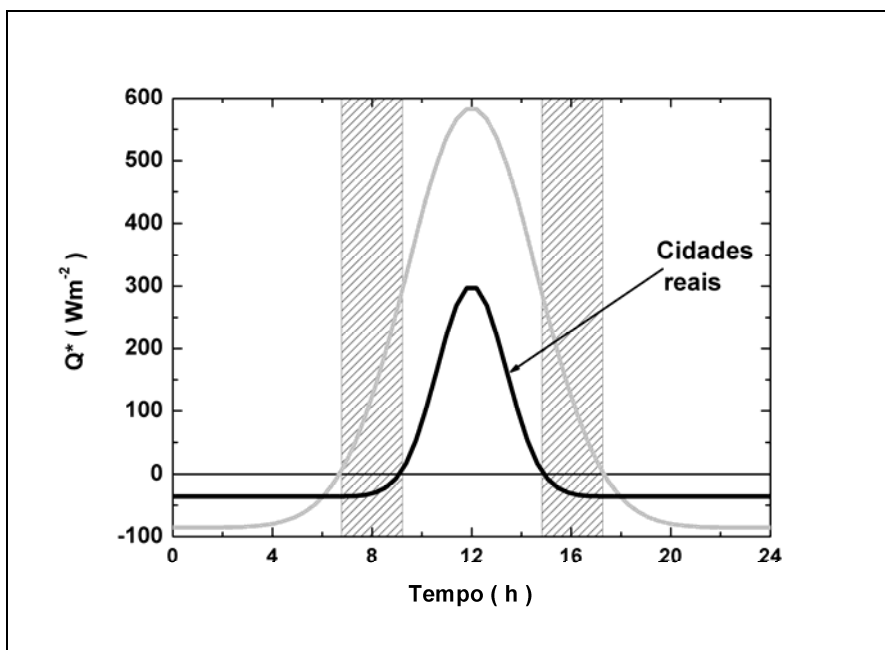


Figura 1: Representação conceitual do balanço radiativo sob condições típicas de inverno em latitudes tropicais, para localidades situadas fora (linha clara) e dentro de uma cidade (linha escura). As áreas hachuradas delimitam o intervalo de tempo decorrido entre o nascer (esquerda) e o pôr do sol (direita) para estas duas localidades hipotéticas. Fonte: Dados hipotéticos estimados a partir de observações realizadas em campo dentro e fora da cidade.

Com o intuito de investigar este problema, é realizada uma série de experimentos em uma área urbana, cujas características morfológicas são representadas de modo simplificado na Fig. 2. Este esquema será útil para a interpretação da relação forma - fluxos radiativo nos gráficos, diagramas e campos apresentados nas seções posteriores.

Três trajetos muito similares, com extensão aproximada de cerca de 3 km, foram percorridos em horários distintos.

Estes trajetos são definidos pelo eixo das Avenidas Paulista e Vergueiro na cidade de São Paulo e estão posicionados próximos a um transeto na direção noroeste - sudeste (NW - SE), desde a esquina da Rua Peixoto Gomide, próxima ao Parque Trianon, até as proximidades da Av. Lins de Vasconcelos, pouco além do metrô Ana Rosa.

Os três experimentos foram realizados durante uma semana no auge da estação seca (inverno) do ano de 2007, sob condições muito próximas a uma situação de céu claro e com uma contribuição crescente do fluxo de calor antropogênico, principalmente devido às fontes veiculares emissoras de ondas longas (AZEVEDO, 2001). Estima-se que durante o inverno, na área urbanizada da cidade de São Paulo, esta contribuição corresponda em média a cerca de 15% do fluxo radiativo total que é observado (FERREIRA et al., 2011).

Em um primeiro momento o trajeto foi percorrido no dia 4 de agosto, um sábado, e durou aproximadamente 7 minutos, desde as 6 horas e 53 minutos da manhã até as 7 horas. O percurso total teve cerca de 3.209 m e foi percorrido em uma situação ensolarada, com presença de cirrus esparsos, muito orvalho no início da manhã, névoa e vento fraco a seguir, sob uma condição meteorológica pré-frontal.

Em um segundo momento o trajeto foi percorrido no dia 7 de agosto, uma terça-feira, e durou aproximadamente 9 minutos, desde as 17 horas e 15 minutos (fim da tarde) até as 17 horas e 24 minutos. O percurso total teve cerca de 2.711 m e foi percorrido em uma situação também ensolarada, com presença de ar muito seco, poluição em todo trajeto, vento moderado a fraco, sob uma condição meteorológica também pré-frontal, mas sem ocorrência de brisa marítima.

E, finalmente, em um terceiro momento o trajeto foi percorrido no dia seguinte, 8 de agosto, uma quarta-feira, e também durou aproximadamente 9 minutos, desde as 19 horas e 48 minutos (início da noite) até as 19 horas e 57 minutos. O percurso total teve cerca de 3.397 m e foi percorrido em uma situação de céu estrelado, passando a parcialmente nublado com presença de stratus esparsos, névoa seca passando a úmida (mais densa na região do ABC, como foi observado *a posteriori*, e com nevoeiro denso no dia seguinte), vento fraco a moderado, sob uma condição meteorológica pós-frontal, com ocorrência de brisa marítima e infiltração de SE.

Apesar deste trabalho buscar inicialmente estimar a relação das componentes do fluxo radiativo com os parâmetros  $h$  e  $w$ , usando um método microclimatológico, ele também fornece a possibilidade de se prognosticar o impacto da forma urbana sobre as propriedades dos fluxos radiativos na cidades. Tal como, padrões de distribuição espacial da energia radiante disponível e o modo pelo qual a componente de ondas longas modula este padrão.

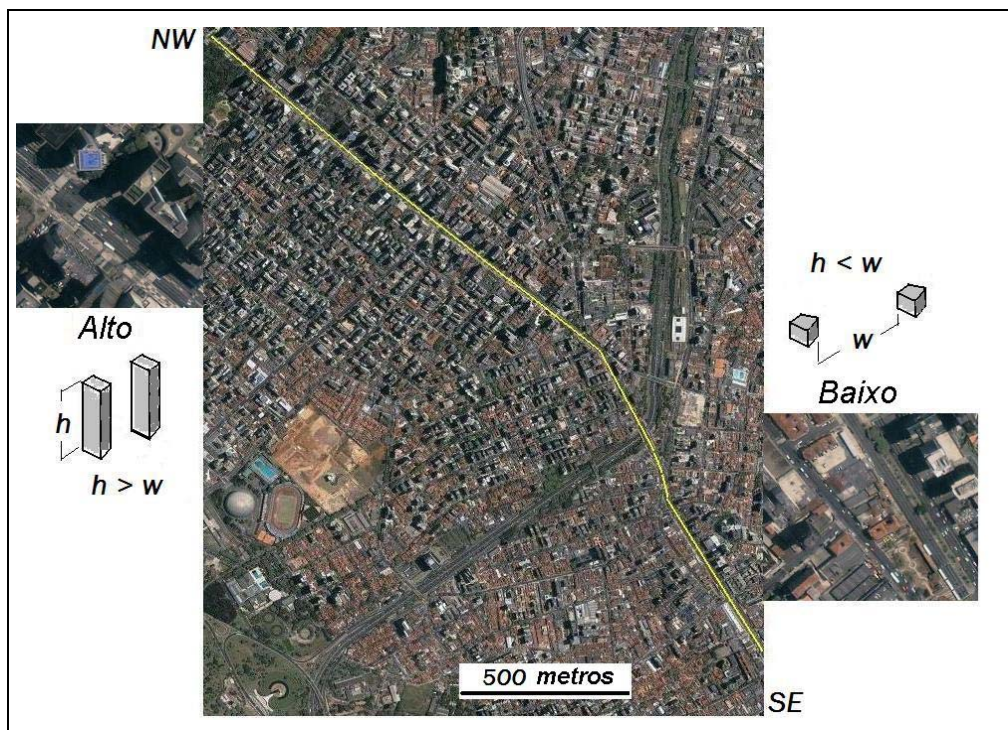


Figura 2: Imagem da natureza física da morfometria urbana em uma região que envolve os entornos do eixo Av. Paulista e Av. Vergueiro (linha clara contínua), desde o cruzamento com a Rua Peixoto Gomide (NW) até as proximidades da Av. Lins de Vasconcelos (SE). Dois setores, com características morfométricas distintas são apresentados em destaque, à esquerda um setor composto por *canyons* tipicamente verticalizados, enquanto à direita um setor composto

por *canyons* relativamente mais amplos. A relação entre altura ( $h$ ) e largura ( $w$ ) do *canyon* é esboçada graficamente, com fatores mais elevados a noroeste ( $h > w$ ) e inferiores ( $h < w$ ) a sudeste da região. Fonte: Imagens do satélite SPOT.

### **Método microclimatológico para determinar a distribuição dos fluxos radiativos e os padrões térmicos derivados**

A dependência de  $Q^*$  e de suas componentes com relação ao tamanho, à forma, à densidade e à distribuição das edificações tem sido estudada utilizando-se modelos físico-escalares, investigações analíticas, modelagem numérica e observação em campo. A proposta deste estudo é enfatizar o procedimento observacional, baseando-se a análise dos dados microclimatológicos sob a perspectiva daquilo que o observador apreende das formas que compõem a paisagem urbana. Ou seja, não se tem por objetivo a realização de medições geométricas das formas urbanas encontradas em campo, ou a realização de medições acuradas e exaustivas dos fluxos radiativos em uma localidade específica. A meta é utilizar radiômetros e sensores térmicos tipicamente encontrados em estudos microclimatológicos, porém, em uma quantidade mínima e adaptados a uma plataforma móvel (MACHADO e AZEVEDO, 2007), de maneira que diferentes setores da cidade, sob distintos tipos de ocupação do solo, e em conseqüência, sob influência de graus variados da proporção entre os parâmetros morfométricos  $h$  e  $w$ , possam ser percorridos. Além disso, pretende-se demonstrar que o efeito da forma urbana não possui implicações complexas apenas sobre as propriedades aerodinâmicas observadas no interior de uma cidade (GRIMMOND e OKE, 1999), mas de modo similar também implica em alterações profundas nas características das trocas energéticas, conduzindo em especial, a um panorama intrincado da natureza dos fluxos radiativos em um meio urbanizado.

#### *O Método*

O esquema microclimatológico convencional fundamenta-se em um transeito simples de  $Q^*$ , ao qual se garante que, para uma aproximação de primeira ordem,  $h$  e  $w$  estão diretamente relacionados à magnitude do fluxo. Porém, durante a aquisição de dados em campo percebeu-se que esta relação é muito mais complexa. Com o intuito de tentar demonstrar que esta relação nem sempre pode ser expressa de maneira direta, selecionou-se, em meio ao grande conjunto de dados levantados por Machado (2009), um setor transitório (Fig. 2), bastante localizado no contexto da metrópole, situado entre dois tipos de ocupação distintas, onde a abrupta abertura de um *canyon* urbano clássico pode fazer transparecer ao máximo o detalhamento da variabilidade dos fluxos radiativos, de um modo que tende a se repetir através de outros setores da mancha urbana.

Além disso, a seleção dos três episódios já descritos na parte introdutória deste trabalho, visam representar não apenas o que ocorre na transição espacial, mas também o que ocorre durante a transição temporal da

evolução diurna e noturna dos fluxos entre padrões distintos que se estabelecem.

Ao final dos experimentos, têm-se um levantamento dos fluxos radiativos verticais no eixo do *canyon* urbano, bem como a distribuição térmica desde as paredes deste *canyon* até o ar que o preenche, em uma cota que corresponde a uma altura média dos indivíduos que por ele transitam.

A partir das temperaturas das paredes o fluxo radiativo em ondas longas dos limites laterais pode ser recuperado, e interpolado com os fluxos observados, obtendo-se ao final um panorama da distribuição espacial em uma secção horizontal no interior do *canyon* urbano. Complementando este estudo, o modelo tridimensional ENVI-met (BRUSE, 2004) foi utilizado em sua versão 3.1.

### *Sensibilidade do método*

A sensibilidade do método às mudanças nas dimensões e espaçamento das edificações é dada pela análise do aparato móvel apresentado na Fig. 3.

O veículo é dotado de um pirradiômetro, inserido em um anel atenuador ao efeito do próprio veículo utilizado, para medição de  $Q^*$  em um nível próximo à base do *canyon*.

Acima, a cerca de 1,5 m desta base, situa-se a plataforma móvel, propriamente dita, com um pirgeômetro e um termômetro em tubo aspirado, ao centro, e dois termômetros infravermelhos de precisão (IRT) fixos a duas polias nas extremidades laterais.

No interior do veículo estão o *datalogger*, que representa o sistema automático de aquisição, além de um *gps* de utilização manual que viabiliza o georreferenciamento instantâneo dos dados.

O tempo de resposta destes sensores varia entre 2 e 10 segundos, por este motivo, o intervalo de amostragem dos sinais, pelo sistema de aquisição de dados, é de 2 segundos, enquanto o período de armazenamento dos dados, que por sua vez define a resolução temporal destes, é de 10 segundos. Com isto, garante-se a máxima resolução temporal possível, observando-se a limitação dos próprios sensores.

Por outro lado, a questão da resolução espacial é mais complexa, pois esta é variável e depende fundamentalmente da velocidade do veículo amostrador.

Durante os experimentos foi possível desenvolver uma velocidade média entre 20 e 30  $\text{kmh}^{-1}$ , deste modo, a resolução espacial média foi da ordem de 100 m, aproximadamente, podendo ser ainda superior em algumas situações específicas, como proximidade a semáforos ou a trechos de trânsito lento.

Enfim, para que a sensibilidade do método fosse testada nas situações práticas, armazenou-se juntamente ao valor médio dos sinais amostrados, também o desvio padrão correspondente, bem como os valores extremos observados, e, como veremos nas seções a seguir a variabilidade

amostral parece não comprometer a variabilidade espacial e temporal do fenômeno propriamente verificado.



Figura 3: Laboratório móvel em perspectiva frontal. Na proa do veículo dispositivo com saldo-pirradiômetro. Acima, plataforma móvel composta por termômetro inserido em tubo ventilado (centro, à direita), pirgeômetro com proteção (centro, à esquerda) e polias com termômetros infravermelhos de precisão (IRTs) fixos nas extremidades laterais, tanto à direita, como à esquerda do veículo. O sistema de aquisição de dados está posicionado à direita do condutor, no interior do veículo e não pode ser visualizado nesta foto (MACHADO, 2009; 2011). Fonte: acervo fotográfico do Prof. Dr. Tarik.Rezende de Azevedo.

## Observações móveis contínuas das características dos fluxos radiativos de uma cidade

Os resultados observados pelo método discutido na seção anterior, para o *canyon* de morfologia variada da imagem analisada, são apresentados na Fig.4. Todos os valores apresentados incluem *a priori* tanto o efeito dos edifícios, como o efeito da vegetação e dos veículos presentes no *canyon*. Os dados são apresentados de modo a permitir considerações sobre a amplitude dos valores observados ao se aplicar o método, sobre a variabilidade dos fluxos entre setores distintos do *canyon* e sobre as possíveis diferenças destes fluxos entre *canyons* devido às suas formas superficiais características.

Estas observações podem ser aplicadas em diversos estudos da camada de coberturas urbanas. Dentre estes estudos, recomenda-se a aplicação na validação, calibração e análise de sensibilidade de modelos numérico-matemáticos que estudam o balanço dos fluxos energéticos entre as paredes de um *canyon* urbano e o seu ambiente interno (MARCIOTTO et al., 2010). As medições móveis contínuas fornecem uma elevada resolução temporal e, sobretudo, uma detalhada distribuição espacial dos fluxos radiativos no interior do *canyon* urbano, sendo, portanto, mais adequadas do que as observações micrometeorológicas convencionais adquiridas em estações fixas, geralmente posicionadas acima de uma cobertura individual.

### *Densidade do saldo de fluxo radiativo multiespectral (Q\*)*

Os valores de  $Q^*$  observados a partir da aplicação do método, entre o entardecer e o amanhecer, tipicamente permanecem no intervalo de  $-60$  a  $-40$   $Wm^{-2}$ ; no setor aberto do *canyon* ao entardecer fica em torno de  $-70$   $Wm^{-2}$ , e no início da noite ele fica em torno de  $-30$   $Wm^{-2}$  (Figs. 4a e 4b).

No setor a razão  $h/w$  relativamente elevada (tipicamente no lado esquerdo da Fig. 4) a amplitude dos valores observados dos fluxos é relativamente pequena.

Para toda a extensão do *canyon*, a variabilidade mínima é encontrada ao amanhecer. A relação entre variabilidade e altura das edificações pode ser real ou pode ainda esconder uma relação com outro elemento do meio físico.

Nos setores com  $h/w$  menor, observações de  $Q^*$  tendem a ser maiores, mas este viés é perdido conforme a temperatura média diminui.

O método falha consistentemente ao produzir um viés positivo no início da noite (Fig. 4b) porque as paredes do *canyon* estão se resfriando mais rapidamente do que o ar.

Existem também os casos nos quais a razão  $h/w$  não pode ser utilizada diretamente porque  $Q^*$  permanece fora da amplitude de aplicabilidade da relação linear; os mais notáveis são os mínimos observados no início da manhã.

Quando relacionadas a  $h/w$ , as observações podem ser comparadas aos limites dos intervalos destacados na Fig. 1, sendo possível avaliar a viabilidade do método. Dado o esquema instrumental aplicado para observar os fluxos



radiativos e as características térmicas da área de estudo (Fig. 2), a parametrização dos fluxos em função da forma urbana vai além de uma relação simples com a temperatura do ar ou das paredes do *canyon* (Fig. 5).

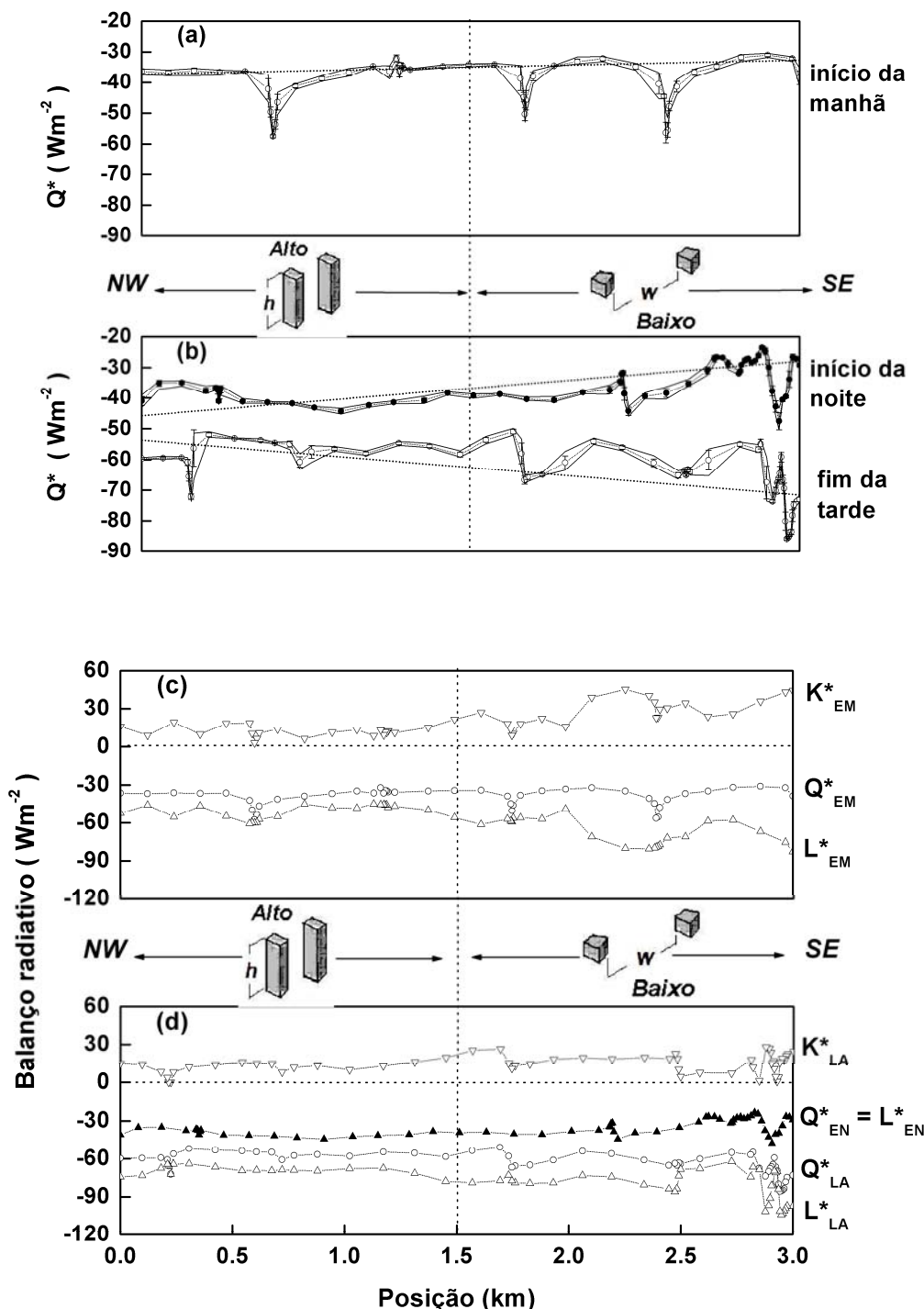


Figura 4: Características radiativas observadas através do eixo Paulista – Vergueiro apresentado na Figura 2, tanto para a resultante total (a, b) do balanço radiativo ( $Q^*$  - círculos), como para suas componentes (c, d) curta ( $K^*$  - triângulos para baixo) e longa ( $L^*$  - triângulos para cima), em três intervalos distintos: no início da manhã (EM – símbolos claros), no fim da tarde (LA – símbolos claros) e no início da noite (EM – símbolos escuros). As barras de erro e

as linhas contínuas (a, b) representam, respectivamente, o desvio padrão e os valores extremos observados. As linhas pontilhadas (a, b) representam as retas de tendência interpoladas.

### Saldo radiativo em ondas longas ( $L^*$ )

Os saldos dos fluxos em ondas longas para os setores verticalizados e abertos, conforme observado pelo método, tipicamente permanecem na faixa de  $-30$  a  $-90 \text{ Wm}^{-2}$  (Figs. 4c e 4d); somente o setor com maior visão do céu (ao fim da tarde entre o metrô Ana Rosa e a Av. Lins de Vasconcelos, borda direita da Fig. 4d) tem valores acima de  $-100 \text{ Wm}^{-2}$ . O valor noturno para toda a extensão do *canyon* varia muito pouco com uma mediana de cerca de  $-40 \text{ Wm}^{-2}$ . No início da manhã e no fim da tarde é mais difícil avaliar uma magnitude característica dada a dispersão verificada a partir de cerca de  $-50$  até  $-110 \text{ Wm}^{-2}$ . Conforme foi encontrado com  $Q^*$ , a variabilidade setorial absoluta está relacionada à altura média dos elementos edificados. Todos os setores fornecem observações próximas relativamente agrupadas, exceto para o setor mais aberto tanto à noite como à tarde, e com menor intensidade para o setor verticalizado próximo ao Parque Trianon em todos horários. Os valores observados da temperatura das paredes (Fig. 5) fornecem resultados não muito diferentes ao se aplicar este método, sendo que as maiores amplitudes estão associadas às paredes sombreadas.

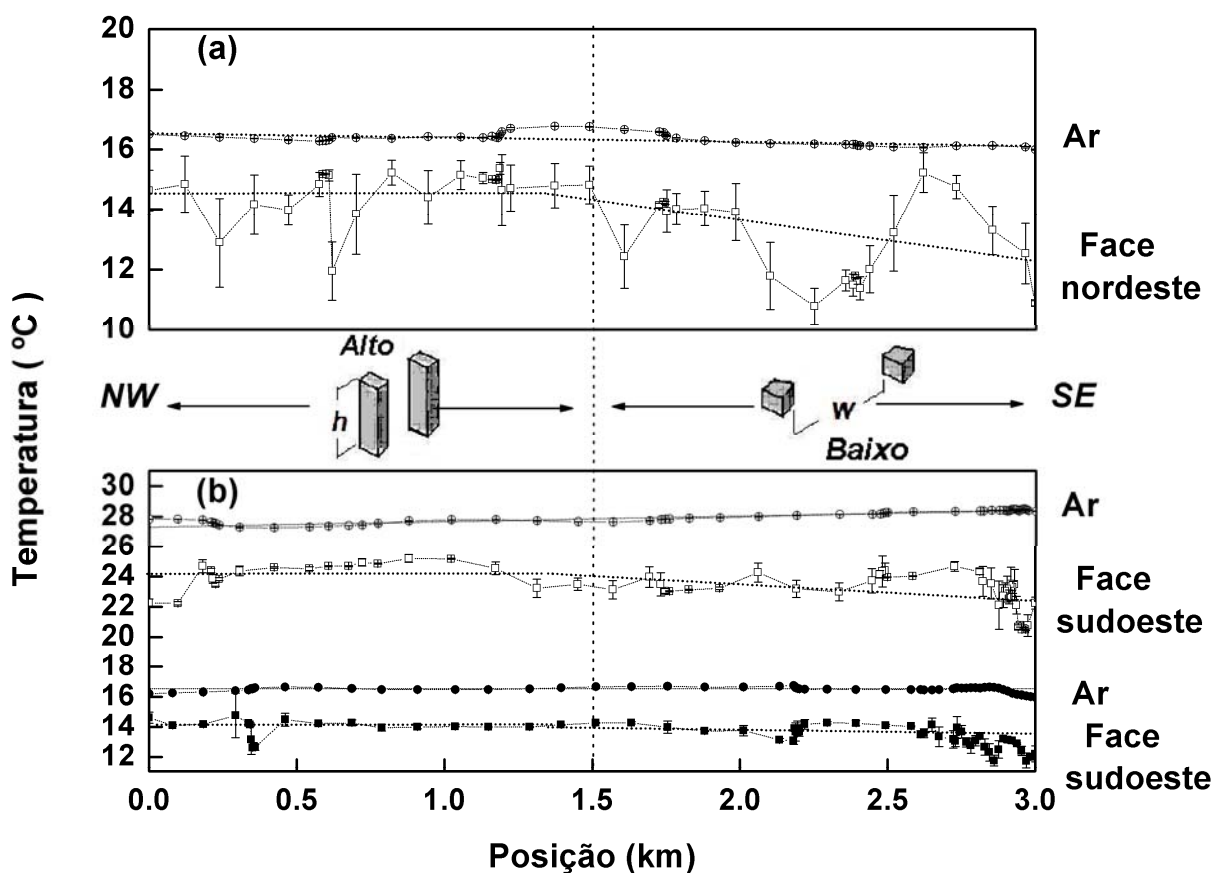


Figura 5: Valores observados da temperatura do ar (círculos) e das temperaturas das paredes sombreadas (quadrados) do *canyon* urbano, para os mesmos intervalos identificados na Fig. 4: início da manhã (a) e o período entre fim da tarde e início da noite (b). Símbolos claros representam uma condição diurna, enquanto símbolos escuros representam uma condição noturna. As barras de erro indicam o desvio padrão, enquanto as linhas pontilhadas as retas de tendência interpoladas.

### *Saldo radiativo em ondas curtas ( $K^*$ )*

Os valores estimados de  $K^*$  (Figs. 4c e 4d) cobrem plenamente um vasto intervalo de valores absolutos, mas valores entre 0 e  $30 \text{ Wm}^{-2}$  são típicos para intervalos que antecedem ou precedem o período noturno.

O fluxo combinado  $K^*$  dá alguma idéia da altura mínima pela qual pode-se esperar que uma camada de coberturas exerça influência radiativa sobre uma certa área urbanizada.

Desde que as dimensões da extensão superior de uma camada de coberturas influencia o alcande do setor sombreado, que tipicamente varia de uma fração até algumas dezenas de vezes a altura da edificação, e que as paredes destas coberturas favorecem a multi-reflexão da radiação solar que atinge as suas porções mais elevadas, parece razoável supor que uma camada real de coberturas pode nem sempre obscurecer a superfície inferior do *canyon*, especialmente sobre áreas onde a cobertura do solo muda em escalas inferiores a algumas dezenas de metros.

### *Distribuição térmica*

Por serem superfícies tão irregulares, as cidades exibem uma elevada variabilidade da distribuição térmica.

Portanto, a partir da energia radiativa disponível elas facilitam a troca turbulenta melhor do que a maioria dos outros tipos de superfícies mais suaves.

Os valores observados para as superfícies das paredes predominantemente sombreadas (Fig. 5) a uma altura em torno de 1,5 m acima do piso preferencialmente situam-se em um intervalo de 0,5 a 7 °C abaixo da temperatura característica do ar.

A temperatura do ar pode amplificar-se ainda mais entre o período noturno e o diurno, e vice-versa, mas o viés característico observado entre as paredes e o ar é mantido.

Os valores de amplitude térmica do setor com proporção h/w elevada (à esquerda da Fig. 5), de cerca de 2 °C, são excepcionalmente baixos para o que se poderia esperar de um *canyon* densamente urbanizado.

Este resultado ocorre porque a altura de referência (1,5 m) é muito inferior à altura de referência dos sensores orbitais (próxima a altura do topo do *canyon*).

Se nós padronizamos a escala de altura utilizando o sensor a uma mesma em todos os locais, então estas observações se traduzem em um panorama térmica mais próximo à realidade no interior da cidade.

## **Distribuição térmica determinada pelas características dos fluxos radiativos de uma cidade**

Os dados de temperatura superficial das paredes, selecionados dentre os elementos urbanos sombreados, são plotados na Fig. 6 junto com as retas de regressão melhor interpoladas para os períodos de transição sugeridos na Fig. 1.

Para ajudar a interpretação, os resultados noturnos e os resultados dos períodos transitórios são apresentados separadamente.

Em cada um dos períodos a temperatura superficial é plotada versus as medições do saldo da densidade de fluxo radiativo vertical em ondas longas, através do eixo central do *canyon*.

O resultado noturno expresso pela Fig. 6 é desapontador, apesar de relações bem mais evidentes serem obtidas para os períodos transitórios entre o dia e a noite, conforme discutido na introdução.

O espalhamento dos valores das temperaturas superficiais das paredes em função de  $L^*$  é particularmente notável, permanecendo uma relação positiva para os períodos transitórios e uma relação negativa para o período noturno.

De modo geral, as observações de temperatura superficial e  $L^*$  apresentam uma relação esparsa em função da amplitude de densidade de fluxos verificada em campo.

Além de um maior espalhamento noturno, observa-se que ao invés das temperaturas mais baixas associarem-se às taxas de resfriamento radiativo mais elevado, conforme se evidencia no fim da tarde e início da manhã, a relação seria de tendência inversa.

## **Comparação das medições de temperatura e do fluxo em ondas longas**

As observações da temperatura superficial das paredes, da temperatura do ar, do saldo dos fluxos radiativos em ondas longas entre as paredes e o ar e do saldo entre a base e o topo do *canyon* em seu eixo central são interpolados espacialmente na cota de 1,5 m e são plotados na Fig. 7.

Não é feita aqui consideração ao problema da divergência vertical desta componente do fluxo radiativo (MACHADO e AZEVEDO, 2008), o que aumentaria ainda mais a complexidade da análise.

Note que o número de observações que estão disponíveis para realizar a análise em cada posição longitudinal do *canyon* é de três valores na direção transversal correspondente.

O padrão temporal, correspondente aos 3 horários inicialmente apresentados na Fig. 4, varia para as observações em cada um dos trajetos fundamentalmente porque, ou não há radiação solar disponível sobre a superfície de ao menos alguma parede do *canyon* (isto é,  $K^* = 0$ ), ou o saldo da densidade do fluxo radiativo em ondas longas entre as superfícies e o ar vai

além dos limites que convencionalmente se observa em uma situação diurna de céu claro (isto é,  $|L^*| < |K^*|$ ).

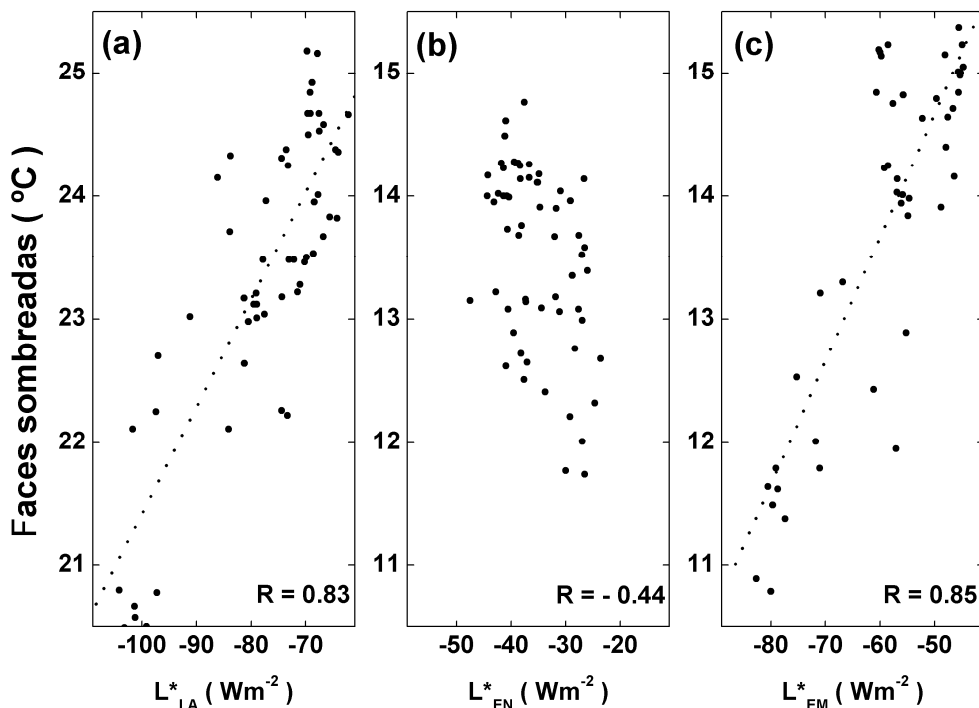


Figura 6: Relação entre a temperatura observada remotamente na superfície das paredes sombreadas que compõem o *canyon* urbano e o balanço radiativo em ondas longas ( $L^*$ ) próximo ao centro da base do *canyon*, para três situações distintas: fim da tarde (a), início da noite (b) e início da manhã (c). As linhas pontilhadas representam a reta interpolada aos dados, enquanto R indica o coeficiente de regressão linear obtido.

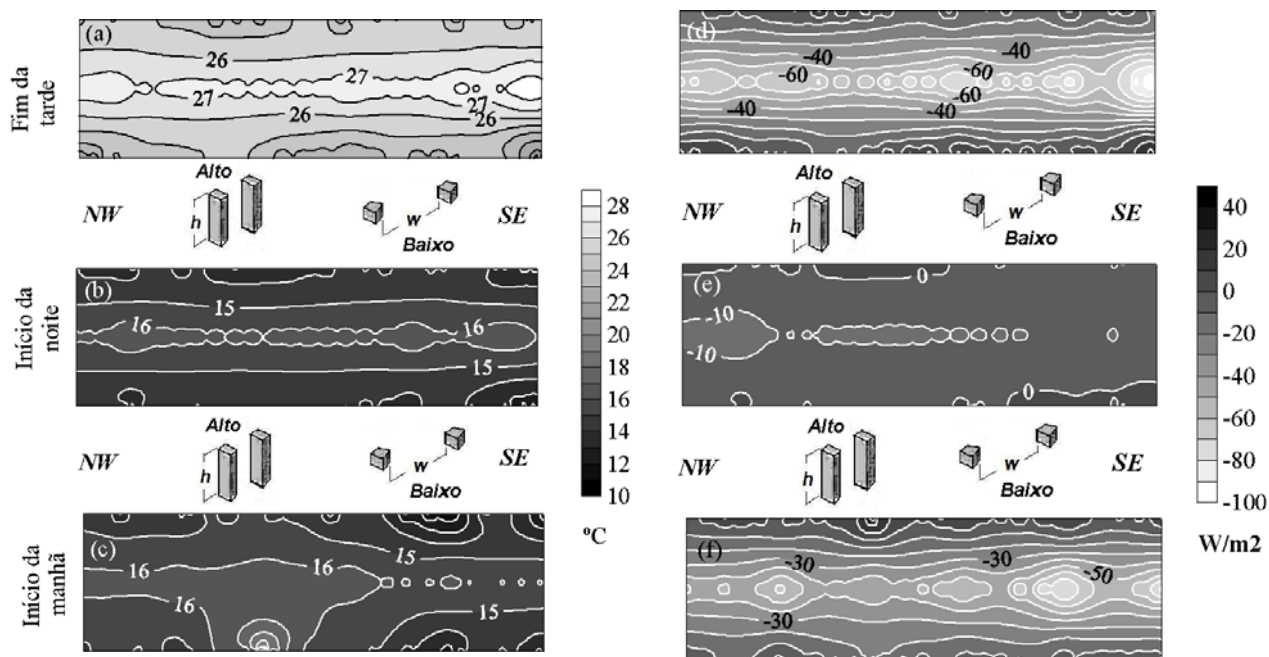


Figura 7: Distribuição horizontal interpolada em um plano em torno de 1,5 m de altura, a partir de observações da temperatura (a, b, c) e do fluxo  $L^*$  (d, e, f) no interior do *canyon* urbano, em três instantes distintos: fim da tarde (acima), início da noite (centro) e início da manhã (abaixo).

### Estudo de sensibilidade com um modelo numérico

A investigação é concluída utilizando-se o modelo numérico tridimensional ENVI-met (Fig. 8), que simula mudanças micro climáticas no interior de ambientes urbanos, associadas à forma e à orientação do *canyon* urbano (ALI-TOUDERT and MAYER, 2006), com uma elevada resolução espacial e temporal (BRUSE, 2004).

Para a validação do modelo optou-se em utilizar uma de suas variáveis de saída associada ao fluxo em ondas longas do ambiente urbano ( $L_{ENVI}$ ). Esta variável está associada a uma parcela de  $L^*$ , descontada a componente relativa à porção da abóboda celeste, compreendida pelo ângulo sólido definido pelo fator de visão do céu. Ou seja, é a parcela de  $L^*$  que está unicamente sob a influência das edificações. Além desta variável, ser estimada pelo modelo, ela também pode ser derivada pelas observações realizadas por Machado (2009) nos transetos da Av. Paulista. Para isto, substituiu-se a estimativa de  $L^*$  baseada nas observações com o pirgeômetro, pelas observações com os sensores IRTs.

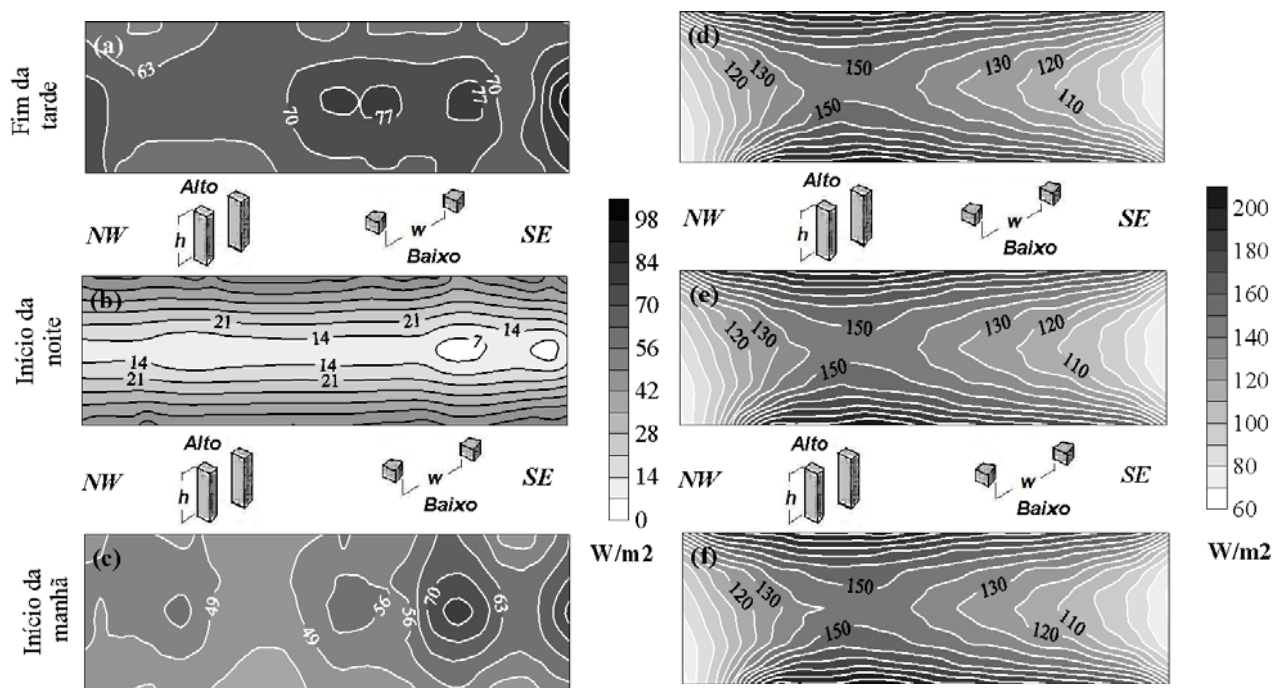


Figura 8: Distribuição horizontal interpolada em um plano em torno de 1,5 m de altura (esquerda) e 1,2 m (direita), do fluxo  $L_{ENVI}$  observado (a, b, c) e modelado (d, e, f) no interior do *canyon* urbano, em três instantes distintos: fim da tarde (acima), início da noite (centro) e início da manhã (abaixo).

Observa-se que para uma cota fixa, em torno de 1,25 m acima da base do *canyon*, o modelo superestima o fluxo  $L_{ENVI}$  (Fig. 8d a 8f), bem como alguns dos efeitos superficiais. Além disso, apresenta uma sensibilidade insignificante à variabilidade temporal para uma cota fixa. Apesar de apresentar valores máximos tendenciosamente deslocados a NW, como seria de se esperar, pois é o setor mais verticalizado, a magnitude deste fluxo é exagerada em cerca de 100% para o fim da tarde, atingindo-se um máximo de desvio da magnitude modelada para o período noturno. O mínimo a SE parece ser coerente com um setor onde prevalece um maior fator de visão do céu, porém, o mínimo a WNW, associado à presença do Parque Trianon, também é significativamente exagerado.

As observações indicam um padrão semelhante ao modelado para o período noturno (Fig. 8b), se bem que a magnitude é na verdade muito mais reduzida do que a observada no fim da tarde (Fig. 8a) ou durante as primeiras horas da manhã (Fig. 8c). Enquanto a influência do Parque inserido no *canyon* urbano parece ser insignificante, ao menos do ponto de vista do fluxo radiativo em ondas longas emitido pelas paredes do *canyon*. Mas é identificado um setor com grande variabilidade temporal para o fluxo  $L_{ENVI}$  observado, que se destaca como um mínimo noturno, evoluindo a um máximo durante as primeiras horas da manhã, e parecendo manter-se como um máximo durante o dia, tendo em vista a sua presença, já fragmentada, no fim da tarde, a partir do momento em que deve novamente evoluir a um mínimo. Este setor extremamente dinâmico do ponto de vista radiativo, identificado nas observações e cujo vestígio sequer aparece no modelado, situa-se logo após a transição do setor intensamente verticalizado a NW para o setor aberto a SE.

Ainda é verificada a variabilidade vertical obtida numericamente (Fig. 9), percebendo-se que o modelo é sensível, como seria de se esperar, ao aumento do fator de visão do céu para cotas mais elevadas. Percebe-se pelo resultado modelado que o fluxo  $L_{ENVI}$  vai gradativamente reduzindo-se a partir da base do *canyon* em direção ao topo, sendo que próximo ao topo (Fig. 9c) enquanto ainda se mantém no setor NW resquícios do padrão verificado abaixo, no setor SE a influência das edificações desaparece.

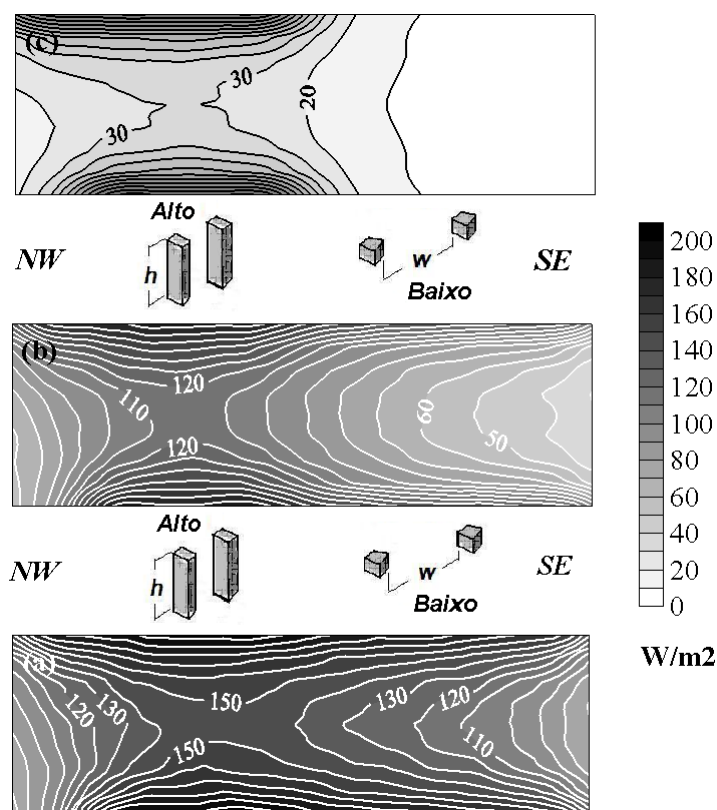


Figura 9: Distribuição vertical interpolada em um plano do fluxo  $L_{ENVI}$  modelado no interior do *canyon* urbano, em três cotas distintas: próximo à base do *canyon* (abaixo), no centro do *canyon* (centro) e próximo ao topo do *canyon* (acima).

### Análise geográfica dos fluxos radiativos na metrópole

Os resultados observados através de técnicas empregadas em micrometeorologia são úteis para descrever os padrões de evolução temporal e distribuição espacial dos fluxos radiativos em uma região metropolitana. Um ambiente, em geral, mais aquecido pela liberação de calor proveniente das atividades antrópicas, mas que, porém repercute uma complexa variabilidade espacial da energia disponível, tendo-se em vista sua intrincada rede de tipos de uso da terra.

A inserção de resultados estimados a partir de modelagem numérica serve, sobretudo, para tratar da questão da crença generalizada que predomina nos dias atuais no que diz respeito a uma série de efeitos



ambientais, particularmente climáticos, oriundos da possível intervenção humana, sua magnitude, abrangência espacial e sua sustentação ou efemeridade no decorrer do tempo.

Porém, mais, muito mais importante do que submergir a um debate infrutífero sobre a sustentabilidade ou não destes efeitos climáticos, é perceber e assimilar quão importantes são estas medições micrometeorológicas para a compreensão do clima urbano.

Não se trata aqui apenas aprimorar a técnica de medição para fornecer subsídio ao desenvolvimento de modelos matemáticos. Mas trata-se, sobretudo, de aprofundar a compreensão a respeito do canal de percepção termodinâmico (MONTEIRO, 1976). A utilização de sensores mais sofisticados possibilita-nos a ir além das medições de temperatura e investigar o que decorre diretamente das interações entre os fluxos de energia. Estes fluxos são na verdade o alicerce do canal termodinâmico cujo reflexo final é o estado térmico que percebemos no meio ao qual estamos imersos.

## Considerações finais

Este trabalho se concentrou na interpretação da natureza, sensibilidade e magnitude dos fluxos radiativos obtidos com a utilização de um método microclimatológico, a partir de observações móveis contínuas no contexto da forma da estrutura física de um importante *canyon* urbano da cidade de São Paulo.

A análise de sensibilidade do método, através das características dos sensores, mostra que os argumentos morfológicos levantados para explicar a variabilidade dos valores de  $Q^*$  observado geram relações razoavelmente bem definidas.

Similarmente, na maioria das relações morfológicas exploradas para  $L^*$  observa-se valores intuitivamente razoáveis para os períodos transitórios do início da manhã e fim da tarde, mas esta mesma interpretação fundamentada apenas na forma parece falhar para as relações observadas entre  $L^*$  e a temperatura das paredes durante a noite.

É possível, que durante a noite o padrão térmico das paredes que constituem a forma do *canyon* não se constitua no efeito determinante sobre a magnitude de  $L^*$ .

O saldo dos fluxos em ondas longas ( $L^*$ ) pode ter sua evolução noturna dirigida de maneira mais preponderante pelas características e constituição química da atmosfera sobre a cidade.

Ou seja, conforme as paredes se resfriam, parte da energia radiativa perdida é absorvida pelo ar, devido à presença dos poluentes e vapor d'água. Por este motivo o ar que preenche o *canyon* urbano apresenta um resfriamento mais lento. Este efeito, juntamente com a geometria verticalizada do *canyon* contribui para que o saldo observado em ondas longas, dentro da cidade, seja predominantemente mais reduzido do que fora.

Simulações numéricas do fluxo ambiental urbano em ondas longas, validadas perante observações radiométricas realizadas próximas à base do

*canyon* urbano, indicam ser capazes de reproduzir apenas as características gerais do impacto gerado pela forma do *canyon* no ambiente urbano, superestimando, em geral, este efeito, sobretudo no que se refere à presença de um parque urbano. A importância do modelo parece ser mais significativa no que se refere à simulação da estrutura radiativa na direção vertical, mas conforme observa-se em campo, a evolução temporal da distribuição espacial dos padrões radiativos no interior do *canyon* ainda são muito mal representados quando utilizado um modelo do tipo CFD, que fundamenta-se apenas na solução média da energia cinética turbulenta, desprezando-se os termos de ordem superior. Talvez esteja implícita nesta observação a influência dos termos turbulentos dissipadores de energia na própria evolução dos padrões radiativos em ondas longas no interior da *Urban Canopy Layer*, a porção da camada limite abaixo das coberturas urbanas, e o seu impacto, principalmente, sobre o estado de conforto térmico experimentado pelos habitantes da cidade.

O padrão complexo de distribuição espacial do fluxo  $L_{ENVI}$  observado no interior do *canyon* urbano parece ser modulado em termos gerais pela forma deste *canyon*. No entanto, há singularidades (Fig. 8 a-c) que talvez possam ser explicadas pela influência dos fluxos de energia antrópicos, em setores confinados, principalmente nos períodos transitórios entre o dia e a noite, bem como, entre a noite e o dia, quando a componente em ondas curtas do fluxo radiativo apresenta magnitude inferior à componente em ondas longas. Deste modo, os padrões radiativos observados podem corroborar com a hipótese levantada por Ferreira et. al. (2011) sobre a complexidade da variabilidade espacial do fluxo antropogênico de calor na cidade São Paulo, sobretudo, no que se refere à sua componente emissora veicular. Mas por outro lado, não se espera que esta variabilidade esteja associada aos registros de intensas ilhas de calor para a cidade de São Paulo (MONTEIRO, 1976), tendo-se em vista que muitos destes registros estão relacionados às ilhas de calor de superfície, com intensos gradientes que não se sustentam por muito tempo, devido ao poder dissipador da turbulência. É muito mais provável que esta variabilidade espacial complexa dos fluxos em ondas longas, de influência antrópica, esteja associada a padrões muito mais tênues e difíceis de serem observados, relacionados às ilhas de calor atmosféricas (STEWART, 2011), conforme Machado e Azevedo (2007) relata em um estudo de caso bem documentado na cidade de São Paulo.

## **Agradecimento**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo nº 05/56287-0.

## **Referências bibliográficas**

ALI-TOUDERT, Fazia and MAYER, Helmut. Numerical study on the effects of the aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. **Building and Environment**, vol. 41, p.94-108, 2006.

AZEVEDO, Tarik Rezende de. O fluxo de calor gerado pelas atividades humanas, **GEOUSP: Os climas na cidade de São Paulo, Teoria & Prática**, São Paulo, vol. 4, p. 71 – 93, 2001.

BRUSE, M. ENVI-met homepage: [www.envi-met.com](http://www.envi-met.com), 2004.

COSTA, Eduíno Rodrigues da; SARTORI, Maria da Graça Barros; FANTINI, Vanessa. Análise do conforto térmico do Parque Itaimbé – Santa Maria/RS sob condições atmosféricas de domínio da massa polar velha em situação sazonal de primavera. **Geografia: Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 16 – 26, 2010.

FERREIRA, Maurício Jonas, OLIVEIRA, Amauri Pereira de and SOARES, Jacyra. Anthropogenic heat in the city of São Paulo, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 104, p. 43-56, 2011.

GRIMMOND, C. S. B. and OKE, T. R. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. **Journal of Applied Meteorology**, vol. 38, p.1262-1292, 1999.

MACHADO, Antonio Jaschke. Análise do balance radiativo na Avenida Queiroz Filho – São Paulo/SP sob condição de céu claro na estação seca, **Geografia: Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, vol.15, n.1, p. 7–16, 2011.

MACHADO, Antonio Jaschke. Distribuição espacial do fluxo radiativo em ondas longas na Região Metropolitana de São Paulo. 2009. 273f. **Tese (Doutorado em Geografia Física) – Departamento de Geografia – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, USP**, São Paulo.

MACHADO, Antonio Jaschke; AZEVEDO, Tarik Rezende de. A divergência radiativa na camada próxima ao chão, in: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA**, 8, 2008. Alto Caparaó, Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Minas Gerais, UFU, 2008, cd-rom.

MACHADO, Antonio Jaschke; AZEVEDO, Tarik Rezende de. Detection of the urban heat-island effect from a surface mobile platform, **Revista de Teledetección**, Valladolid, vol.27, p. 59–70, 2007.

MACHADO, Antonio Jaschke; AZEVEDO, Tarik Rezende 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, vol.19, p. 81–91, 2006a.

MACHADO, Antonio Jaschke; AZEVEDO, Tarik Rezende de. Parametrização da emissão termoradiativa aplicada à análise do conforto urbano, **GEOUSP: Teoria & Prática**, São Paulo, vol. 19, p. 179 – 198, 2006b.

MARCIOTTO, Edson R., OLIVEIRA, Amauri Pereira de and HANNA, Steven R. Modeling study of the aspect ratio influence on urban canopy energy fluxes with a modified wall-canyon energy budget scheme. **Building and Environment**, vol. 45, p.2497-2505, 2010.

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Teoria e clima urbano. In: **Série Teses e Monografias**, n.25, 1976 - Instituto de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, pp 181.

OKE, Timothe R. **Boundary Layer Climates**. London: Routledge, 2<sup>nd</sup> ed, 1987. 435p.

OLGYAY, Victor. **Arquitectura y Clima** – manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 2<sup>nd</sup> ed, 2008.

SILVA, Liliane Pimentel da e AMORIM, Margarete Cristiane da Costa Trindade. O conforto térmico em Presidente Prudente – SP: uma análise do ano de 2008 e das salas de aula da FCT / UNESP. **Caderno Prudentino de Geografia**, Presidente Prudente, vol.1, n.32, p. 67–91, 2010.

STEWART, Iain D. A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. **International Journal of Climatology**, vol. 31, pp 200 – 217. 2011.

*Recebido em: 30 de setembro de 2011.*

*Aceito para a publicação em: 27 de dezembro de 2011.*