

ILHA DE CALOR E GEOMETRIA URBANA NA CIDADE DE SÃO CARLOS-SP

Léa Cristina Lucas de Souza, Dr^a em Ciências da Engenharia Ambiental
Departamento de Arquitetura, Urbanismo e Paisagismo - FAAC - UNESP-Bauru
Rua Eng^o Luiz Edmundo Carrijo Coube, s/n CEP 17.033-360 Bauru/SP
Tel.: (014) 230-2111 ramal 146 E-mail: leacrist@azul.bauru.unesp.br

Arthur Mattos, Dr. em Hidráulica e Saneamento
Departamento de Hidráulica e Saneamento - EESC - USP - São Carlos
Avenida Dr. Carlos Botelho 1465 - Caixa Postal 359 - CEP 13.560-970 São Carlos/SP
Tel. (016) 274-3444 ramal 3033

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo verificar a existência de ilha de calor na cidade de São Carlos-SP e avaliar o papel da geometria urbana nos padrões térmicos desta cidade. Durante o período de um ano foram comparadas as áreas urbanas e rurais a partir de dados de temperatura máxima, média e mínima do ar. Outra etapa verifica a influência da forma urbana sobre a temperatura do ar ao nível do pedestre. Os resultados apontam que apesar da existência da ilha de calor na cidade, a temperatura do ar ao nível do pedestre é apenas fracamente relacionada à geometria urbana.

ABSTRACT

The aim of this work is to verify the existence of urban heat island in the city of São Carlos-SP and to evaluate the role of the urban geometry on thermal patterns of this city. During one year, the maximum, medium and minimum temperatures of the air on urban and rural areas have been compared. Another step of this research is to verify the influence of urban form on the air temperatures at the pedestrian level. The results show that although an urban heat island exists, the air temperature at the pedestrian level is weakly related to the urban geometry.

A IMPORTÂNCIA DA GEOMETRIA URBANA

O espaço urbano, resultado da ocupação antrópica do meio, possui características climáticas diferenciadas daquelas ocorridas no espaço rural, que se manifestam devido à inter-relação de fenômenos, muitos deles causados pela própria urbanização. Esta situação climática específica das cidades é chamada de *clima urbano*.

As considerações, relativas ao clima urbano, podem ser verificadas em várias escalas: regional, urbana e intra-urbana. Para cada um desses níveis, os efeitos da urbanização sobre o clima podem ser notados, sobretudo quando é considerada a distribuição térmica do ar nas cidades. A tendência em haver um aumento de temperatura da periferia para o centro das cidades é um fenômeno bastante estudado, e que, por sua configuração espacial, é denominada *ilha de calor*.

Para LANDSBERG (1981), a ilha de calor é o resultado do total das mudanças climáticas provocadas pelas alterações humanas sobre a superfície. Várias são as causas apontadas para a ilha de calor: poluição do ar, calor despreendido no processo de combustão, superfícies impermeáveis, propriedades térmicas das superfícies e geometria urbana (OKE, 1981). Estes elementos alteram o balanço de energia, fazendo com que haja um aumento de armazenamento de calor na superfície terrestre. No entanto, como aponta PADMANABHAMURTY (1990/91) existe uma tendência de redução da intensidade da ilha de calor, a medida que a cidade está mais próxima do equador.

Para cidades brasileiras, no entanto, existe uma lacuna de informações sobre climas urbanos. Enquanto o processo de verticalização das cidades se desenvolve rapidamente, poucas são as informações quantitativas relacionadas às consequências desta verticalização sobre o ambiente.

A medida que são alteradas e verticalizadas as superfícies urbanas, são criadas diferentes configurações espaciais que podem causar aumento de absorção à radiação solar, diminuição de transferência de calor por turbulência e redução na perda de calor por ondas longas. Porém poucos são os dados disponíveis que permitam verificar a ordem de grandeza destas alterações para cidades brasileiras.

Considerando, portanto, a geometria urbana como um importante elemento para o balanço de energia, este trabalho tem por objetivo verificar a existência de *ilha de calor* na cidade de São Carlos-SP e avaliar o papel da geometria urbana nos padrões térmicos desta cidade.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram consideradas duas etapas metodológicas básicas: uma comparação térmica entre a área rural e urbana e uma investigação intra-urbana das condições térmicas associadas aos padrões geométricos.

Como forma de se comprovar a existência de *ilha de calor* urbana, são comparados dados de temperatura do ar coletados na área rural com dados coletados na área urbana. Os dados da área rural correspondem àqueles registrados pela estação meteorológica, localizada no Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA-USP no Broa); enquanto os dados da área urbana referem-se a um posto de coleta implantado na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), onde foi instalado um termohigrógrafo. Os registros foram efetuados durante o período de um ano. A correlação destes dados permite estabelecer um modelo de previsão da temperatura urbana em função da temperatura rural.

Para a avaliação intra-urbana, são selecionados pontos de observação e caracterizados seus padrões geométricos. Para que as diferenças de temperatura encontradas não sejam resultantes da posição específica de cada ponto, a seleção dos pontos de observação baseia-se nos seguintes critérios: semelhantes posições relativas dentro da malha urbana em relação à periferia; pontos com altitudes semelhantes; pontos com semelhantes fluxos viários; os pontos que representam uma síntese de diversas situações geométricas na malha urbana.

São selecionados 21 pontos de observação. Cada ponto selecionado corresponde à configuração morfológica observada a partir do ponto situado à "meia-quadra", para que represente às características médias geométricas daquela quadra. Foram evitadas assim as situações de cruzamentos de vias, que seriam microclimaticamente mais complexas. A caracterização geométrica é feita através de duas unidades básicas: o **fator de visão do céu (FVC)** e a relação entre a altura e a largura da via (**relação H/W**). A unidade do **fator de visão do céu** considera a abóbada celeste como um importante fator determinante da perda de calor por ondas longas, ou seja, a capacidade de resfriamento das superfícies urbanas está relacionada à obstrução do seu horizonte. Quanto maior a capacidade de visão de uma superfície para o céu, maior a sua capacidade de resfriamento. A **relação H/W** corresponde a um perfil de via urbana de forma retangular, composto por duas superfícies verticais H e por uma superfície horizontal W, geralmente representativas das fachadas das edificações e da via de circulação urbana, respectivamente. O procedimento para determinação desses valores é detalhadamente descrito por SOUZA (1996).

Para cada um dos pontos de observação são coletados dados noturnos de temperatura e umidade. A coleta desses dados, é feita através de medições móveis com um termômetro capaz de registrar temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, instalado em um automóvel.

O CLIMA DE SÃO CARLOS

Localizada em área pertencente à bacia hidrográfica do rio do Monjolinho, que está entre 21°57'S e 22°06'S de latitude e 47°50'O e 48°05'O de longitude, a cidade de São Carlos tem como coordenadas geográficas básicas: 22°01'S de latitude, 47°54'O de longitude e 854m de altitude, situando-se no estado de São Paulo (Região Sudeste). Estando entre a parte meridional e central do Brasil, que se apresenta, respectivamente, com o clima úmido e com períodos secos e úmidos, a região sudeste é, segundo NIMER (1989), de grande diversificação climática e de transição entre os climas quentes das latitudes baixas e os climas mesotérmicos das latitudes médias. Para o mesmo autor o caráter transitório do clima na região tem como característica mais importante a sua marcha estacional, que determina uma estação muito chuvosa e outra seca. Atua sobre São Paulo, a massa de ar equatorial continental (de origem na região amazônica), que inicia sua expansão pelo estado na primavera, com alta temperatura, atingindo-o com alta umidade relativa, condensação e instabilidade, predominantemente, no verão. Sobre ele atuam ainda: a massa tropical atlântica, no outono, inverno e primavera, com calmaria, baixa umidade e céu limpo e a massa polar atlântica, no inverno.

A topografia e falta de obstáculos naturais nos quadrantes NE e SE favorecem à ventilação na área urbana de São Carlos, sendo, os ventos de nordeste, dominantes, com maior frequência em maio e os ventos mais frequentes, os de sudeste, no início e fim da estação quente.

Apresenta escassa precipitação de maio a setembro e conseqüente baixa umidade relativa do ar, de junho a outubro, com ocorrência de maior taxa de precipitação e umidade, no verão.

As temperaturas médias do ar são mais altas de dezembro a março, sendo janeiro o mês de temperaturas mais elevadas. O inverno é a estação com maiores amplitudes térmicas, sendo verificada, em julho, a média das temperaturas mínimas mais baixa. Os meses de agosto e setembro apresentam as menores umidades.

INDÍCIOS DA ILHA DE CALOR

Para a comparação entre as áreas rural e urbana, foram consideradas base de dados de temperaturas médias, máximas e mínimas do ar, correspondendo a valores diários e médias mensais.

Os dados colhidos durante o período de observação de um ano foram tratados, resultando em médias mensais e desvios padrão apresentados na Tabela 1.

LOCAL POSIÇÃO E DISPERSÃO	BROA						USP					
	MÉDIAS			DESVIOS PADRÃO			MÉDIAS			DESVIOS PADRÃO		
	MESES/ANO	Mn.	Mx.	Md.	Mn.	Mx.	Md.	Mn.	Mx.	Md.	Mn.	Mx.
maio/94	13,2	26,7	19,2	2,6	2,7	1,8	16,4	25,4	20,2	2,3	2,3	1,9
junho/94	9,3	24,3	16,0	3,3	3,8	3	12,9	23,5	17,8	4,2	3,3	3,3
julho/94	8,2	25,9	16,3	3,7	4,3	3,4	13,4	24,4	18,4	3,9	4,2	3,9
agosto/94	9,1	27,6	18,0	2,6	3,5	2,4	13,8	27,2	20,0	3,8	3,4	3,4
setembro/94	12,1	30,5	21,1	1,9	3,5	2,2	16,2	30,2	22,6	3,2	3,0	3,1
outubro/94	15,5	31,1	23,2	1,9	2,8	1,7	17,4	29,6	22,8	2,0	2,6	1,7
novembro/94	15,6	29,5	22,2	2,3	3,7	2,1	17,5	28	22,2	2,6	3,7	2,8
dezembro/94	16,5	29,9	23,6	1,8	1,9	1,0	18,7	27,9	22,8	1,3	2,1	1,4
janeiro/95	18,8	30,2	24,3	1,6	2,5	1,3	19,2	28,0	22,9	1,1	2,5	1,6
fevereiro/95	16,8	28,2	23,6	0,9	4,0	2,0	18,8	25,9	21,7	1,4	4,2	2,5
março/95	15,4	29,4	22,2	2,7	2,8	1,7	18,1	27,5	22,1	1,5	2,8	1,8

ANÁLISE DOS RESULTADOS

• Temperaturas Máximas

Para as temperaturas máximas, as médias mensais revelam haver um comportamento padrão para todo o ano, indicando que a área urbana apresenta temperaturas máximas menores do que a área rural. As diferenças encontradas entre os dados médios mensais variam de 0,4 a 2,3°C a mais para as temperaturas rurais, sendo agosto e setembro os meses de menores diferenças e fevereiro o mês que apresentou maior diferença entre as médias das máximas. A diferença média anual é de 1,5°C com desvio padrão de 0,7°C, indicando haver uma grande variação das diferenças em relação a média.

O valor mais freqüente de temperaturas máximas na área urbana foi de 27,8°C e na área rural de 28,7°C. Quanto as diferenças de temperaturas máximas entre a área urbana e a rural, o valor mais freqüente foi de 1,8°C a menos para a área urbana.

Tomando-se os dados diários, a temperatura máxima confirma a tendência das diferenças encontradas, com ressalva para os meses de agosto e setembro, para os quais ocorre o maior número de dias com temperaturas rurais máximas mais baixas do que as urbanas (podendo significar uma atipicidade).

Os dados das temperaturas máximas revelam o menor acesso solar ocorrido na área urbana, podendo estar relacionado não só ao número de edificações como também à emissão de poluentes, que resulta em maior turbidez da atmosfera urbana.

As temperaturas máximas apresentaram uma relação uniforme, possibilitando o desenvolvimento de um modelo, com um alto coeficiente de correlação, boa distribuição dos resíduos e histograma, que se aproxima de uma curva normal.

Para um nível de confiança de 95 %, a equação resultante é $y = 0,95 + 0,91.x$, com um coeficiente de determinação $r^2=0,91$, onde: y é o valor da temperatura máxima ocorrida na área urbana e x é o valor da temperatura máxima ocorrida na área rural.

A grande correlação entre as temperaturas máximas pode indicar que a influência da morfologia urbana tende a ser menor para os horários de grande insolação do que para os horários noturnos, uma vez que não é necessária a inserção de nenhuma outra variável no modelo.

• Temperaturas Mínimas

A análise permite ressaltar a existência de praticamente 2 fases de comportamento da curva de temperaturas mínimas: a primeira fase, que se estende de maio/94 a setembro/94, e uma segunda fase, que se estende de outubro/94 a abril/95.

A primeira fase apresenta-se com maiores diferenças entre as temperaturas mínimas, onde a área urbana tem suas médias mensais de 3,2 a 5,2°C mais altas do que as da área rural, resultando numa diferença média de 4,2° C com o desvio padrão de 0,8°C. Para o mês de julho, que, segundo o boletim CLIMANÁLISE (n° 7/94), apresentou condições climáticas típicas do regime de inverno (estação seca e fria), foram registradas as maiores diferenças entre as médias das mínimas. Os dias de maiores diferenças corresponderam ao dia 15 de julho, 14 de agosto e 31 de agosto, com valores diferenciais de 8,8; 10 e 10° C, respectivamente.

A segunda fase da curva é representada por menores diferenças de temperatura, variando em média de 0,4°C a 2,7°C a mais para as médias das temperaturas mínimas urbanas, com uma média das diferenças de 1,7° C e desvio padrão de 0,8°C. A grandeza do desvio padrão representa uma grande variação de temperatura, quando comparada às médias das diferenças encontradas.

O mês de janeiro, que, segundo o boletim CLIMANÁLISE (n°1/95), esteve sob condições típicas do regime de verão (estação quente e úmida) está associado ao menor intervalo das médias das temperaturas mínimas. O mês de janeiro caracterizou-se como o de maior ocorrência de temperaturas mínimas diárias urbanas mais baixas do que as rurais.

O intervalo de variação entre a temperatura mínima urbana e a rural mais freqüente foi de 3°C, sendo a moda das temperaturas mínimas urbanas 19°C e a moda das temperaturas mínimas rurais 16,5°C.

De um modo geral, as maiores diferenças encontradas entre a área rural e a urbana se referem às temperaturas mínimas, sendo as médias das mínimas registradas na área urbana sempre maiores do que aquelas da área rural.

A grande variação da relação entre as temperaturas mínimas urbanas e as rurais dificulta a sua modelagem, pois seu comportamento irregular resulta em um baixo coeficiente de determinação entre as duas. A equação encontrada é $y = 7.4 + 0.66x$, com coeficiente de determinação $r^2 = 0,64$, onde: y é o valor da temperatura mínima da área urbana e x é o valor da temperatura mínima da área rural.

Mesmo quando é feito um tratamento dos dados, submetendo-os a transformações para que se estabeleça uma regressão linear, este coeficiente é baixo.

A ocorrência de maior temperatura mínima na cidade representa a formação de uma *ilha de calor*, e pode indicar a menor capacidade de emissão de ondas longas para o espaço, uma vez que as mínimas ocorrem nos horários em que este é o processo de transferência de calor predominante.

Este resultado demonstra que, para a modelagem das temperaturas mínimas urbanas, seria necessário considerar outras variáveis que fazem com que a temperatura urbana se diferencie da área rural.

Apesar da baixa correlação encontrada, é possível constatar o maior desenvolvimento da *ilha de calor* no período de inverno. Para os meses de verão e os meses de transição entre inverno e verão ou vice-versa, a *ilha* é mais fraca. É portanto, observada a maior formação da *ilha* para meses de céu claro e baixa umidade do ar.

• **Temperaturas Médias**

Quanto às temperaturas médias do ar, suas médias mensais revelaram haver dois períodos distintos, em relação ao seu comportamento: um período de maio/94 a set/94, para o qual as temperaturas urbanas são mais altas do que as rurais, e o período de outubro/94 a abril/95, para o qual as temperaturas rurais são mais altas do que as urbanas.

O intervalo de variação para o período de maio a setembro é de 1,0 a 2,1°C a mais para a área urbana, com média de 1,7°C e desvio padrão de 0,5 °C, enquanto para o período de outubro a abril é de 0 a 1,9°C a mais para a rural, com média de 0,8°C e desvio padrão de 0,7°C (desvio muito grande quando comparado à média). As maiores variações correspondem aos meses de julho e agosto e as menores a novembro e março. A diferença média anual das médias é de 0,3°C com desvio padrão de 1,4°C.

A diferença das médias mais freqüente no período analisado foi de 0,4°C a menos para a área urbana, enquanto a temperatura média mais freqüente na área rural foi de 23,6°C e na área urbana de 21,7°C.

Para as temperaturas médias, o mesmo tipo de análise estatística, feita para as temperaturas máximas e mínimas, também indicou a dificuldade na sua modelagem. Sua equação é descrita por $y = 5.50 + 0,75x$, com coeficiente de determinação $r^2 = 0.74$, onde: y é o valor da temperatura média na área urbana e x é o valor da temperatura média da área rural.

A análise permite verificar, mais uma vez, o maior desenvolvimento da *ilha*, nos meses de inverno, para os quais as temperaturas médias urbanas são sempre mais altas do que as rurais. Pela análise das temperaturas médias, fica definido o comportamento transitório do mês de outubro, a partir do qual o acúmulo de calor na cidade, em comparação com a área rural, é menor. Assim, para os meses de maior nebulosidade e umidade, a capacidade de perda de ondas longas das áreas urbana e rural tende a se igualar.

GEOMETRIA URBANA X TEMPERATURA

Os padrões geométricos encontrados para a cidade de São Carlos variaram de 3% a 84% para a relação H/W, enquanto para o FVC a variação compreende um intervalo de 58% a 99%.

Relacionando-se graficamente essas unidades aos padrões de temperatura encontrados, pode ser observado que a temperatura do ar ao nível do pedestre é apenas fracamente regida pela geometria urbana em São Carlos. Um dos dias de medição, que apresentou um comportamento médio, é demonstrado no Gráfico 1 em função da relação H/W ou em função do FVC.

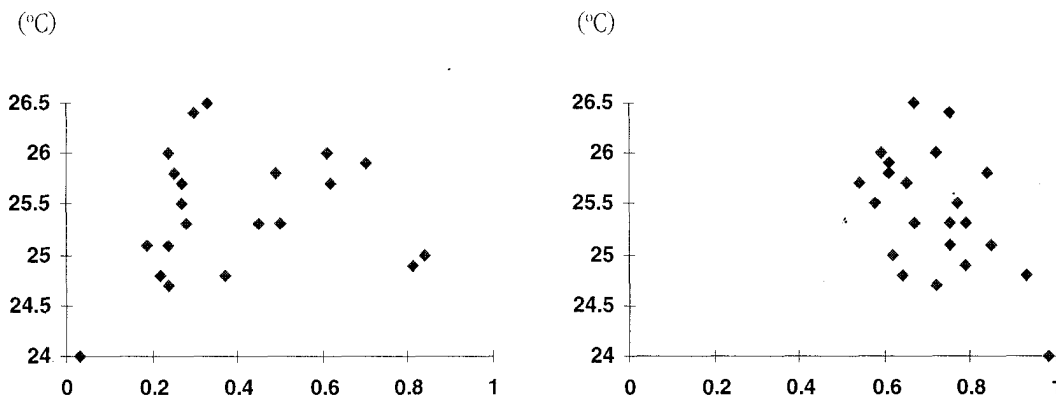


Gráfico 1 - Desempenho térmico urbano
 a. em função de H/W
 b. em função do fator de visão do céu



Apesar do ponto de menor obstrução do horizonte apresentar padrões de temperatura sempre inferiores aos demais, os pontos com maiores obstruções nem sempre são os que apresentam maior temperatura do ar. A análise de todos os dias de medição sugere a existência de duas faixas de comportamento térmico. A primeira faixa é representada por aquela com valores da relação H/W inferiores a 20% ou valores do FVC superiores a 90%, ou seja, área com baixa verticalização. A segunda faixa é representada por valores de H/W entre 20% e 85% ou valores de FVC entre 90% e 60%, que correspondem a áreas medianamente verticalizadas.

Para todos os dias investigados, pontos localizados na segunda faixa apresentaram em média 1°C a mais do que pontos localizados na primeira faixa. Este fato indica que, o aumento de verticalização, de maneira a causar obstruções acima de 20% para a unidade H/W ou inferior a 90% para o FVC, tem influência significativa no padrão de temperatura do ar ao nível do pedestre. Porém, uma análise entre os pontos da segunda faixa mostram que a variação de H/W de 20% a 85% ou de FVC de 90% a 60% não tem um comportamento homogêneo, indicando a sua fraca relação com a geometria urbana.

CONCLUSÕES

Pelo estudo apresentado pôde ser constatado que, apesar de São Carlos se tratar de uma cidade de porte médio, sua área urbana está sujeita ao desenvolvimento de *ilhas de calor*. A conformação convexa de seu relevo e a altitude mais elevada do que as cidades circunvizinhas, embora favoreçam às trocas térmicas e eliminação de calor, não são suficientes para impedir a manifestação deste fenômeno.

A influência da área urbana sobre as características térmicas mostrou-se mais significativa para períodos sem incidência da radiação solar, aspecto que pôde ser evidenciado quantitativamente pela modelagem matemática estabelecida, através de uma alta correlação entre temperaturas máximas do ar para as áreas rural e urbana.

Em termos da geometria urbana, as características identificadas para a cidade de São Carlos indicam que seus perfis morfológicos apresentam, hoje, índices de verticalização que podem ser classificados de médio a baixo. Seus padrões geométricos apresentaram valores de H/W abaixo de 85% e valores de FVC acima de 58%.

Os resultados para a temperatura do ar ao nível do pedestre mostram que sua correlação com a geometria urbana é fraca para áreas de média verticalização, ou seja, para intervalos de variação de H/W entre 20 e 85% e de FVC entre 58 e 90%. Estes resultados sugerem que para São Carlos o aumento de verticalização especificamente dentro destes intervalos não causa diferenças térmicas significativas. Porém áreas de baixa verticalização, ou seja H/W de 20% ou FVC acima de 90%, tendem a apresentar temperaturas do ar mais baixas do que áreas medianamente verticalizadas.

É importante destacar, portanto, que, para São Carlos, parece ser mais danoso termicamente aumentar a obstrução de áreas de baixa verticalização, do que otimizar a verticalização de áreas que já se encontram medianamente verticalizadas, desde que mantido o limite máximo aqui estudado (H/W = 85% e FVC = 58%). Nada pôde ser inferido para limites acima dos aqui estudados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática (1994). São José dos Campos, v.9, n.7. jul.
- CLIMANÁLISE - Boletim de Monitoramento e Análise Climática (1995). São José dos Campos, v.10, n.1. jan.
- LANDSBERG, H.E. (1981). *The urban climate*. New York, Academic.
- NIMER, Edmon. (1989) *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro, IBGE.
- OKE, T.R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, v.1, n.1-4, p.237-254.
- PADMANABHAMURTY, B. (1990/91). Microclimates in tropical urban complexes. *Energy and Buildings*, v.15, n.1-2, p.83-92.
- SOUZA, L.C.L. (1996) *Influência da geometria urbana na temperatura do ar ao nível do pedestre*. São Carlos. 125p. Tese (doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.